



THAILAND
AUTOMOTIVE
INSTITUTE
สถาบันยานยนต์



รายงานฉบับสมบูรณ์

การศึกษาเทคโนโลยีและนวัตกรรมยานยนต์ไฟฟ้า

โครงการ “การศึกษาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า”

ภายใต้ศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่อการพัฒนา
อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า

(สัญญาเลขที่ สยย. 006/60)

จัดทำโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

30 พฤศจิกายน 2560

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ	1-1
1.2 นโยบายส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย	1-4
1.2.1 ประเทศสหรัฐอเมริกา	1-6
1.2.2 ประเทศญี่ปุ่น	1-7
1.2.3 ประเทศจีน	1-8
1.2.4 ประเทศอินเดีย	1-12
1.2.5 ประเทศอินโดนีเซีย	1-14
1.2.6 ประเทศมาเลเซีย	1-14
1.2.7 ประเทศไทย	1-15
1.3 การพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าและทิศทางในอนาคต	1-28
1.4 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า	1-32
1.5 เอกสารอ้างอิง	1-38

บทที่ 2 เทคโนโลยีแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

2.1 บทนำ และ ประเภทแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	2-1
2.1.1 แบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว (Lead Acid Battery)	2-5
2.1.2 แบตเตอรี่ประเภทนิเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium)	2-7
2.1.3 แบตเตอรี่ประเภทนิเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH Battery)	2-8
2.1.4 แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน (Li-ion Battery)	2-10
2.1.5 แบตเตอรี่ประเภทเมทัล-แอร์ (Metal-Air Battery)	2-15
2.2 การพัฒนาแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนในประเทศไทย	2-21

2.2.1 ประเทศเกาหลีใต้	2-22
2.2.2 ประเทศญี่ปุ่น	2-22
2.2.3 ประเทศสหรัฐอเมริกา	2-23
2.2.4 ประเทศไทย	2-24
2.3 เทคโนโลยีระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่	2-25
2.4 เปรียบเทียบแบตเตอรี่ขับเคลื่อนของ Nissan Leaf และ BMW i3	2-27
2.5 เอกสารอ้างอิง	2-28

บทที่ 3 เทคโนโลยีมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

3.1 ระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	3-1
3.2 ประเภทมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	3-5
3.2.1 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)	3-5
3.2.2 มอเตอร์กระแสสลับ (AC Motor)	3-9
3.2.3 มอเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบอื่นๆ ทั้งแบบกระแสตรงและกระแสสลับ	3-16
3.3 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง	3-18
3.3.1 อินเวอร์เตอร์	3-18
3.3.2 DC-DC Converter	3-20
3.4 เปรียบเทียบระบบขับเคลื่อนของ Nissan Leaf และ BMW i3	3-20
3.5 มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้ารุ่นต่างๆ	3-21
3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	3-23
3.7 เอกสารอ้างอิง	3-25

บทที่ 4 เทคโนโลยีวัสดุและโครงสร้างน้ำหนักเบา

4.1 ชนิดและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม	4-2
4.1.1 ชนิดและองค์ประกอบทางวิทยาศาสตร์ด้านกายภาพและด้านเคมีของวัสดุคอมโพสิต	4-2

4.1.2 สมบัติของวัสดุคอมโพสิตทั่วไปที่ใช้ในงานโครงสร้างทางวิศวกรรม	4-9
4.2 วัสดุคอมโพสิตใช้ในชิ้นส่วนยานยนต์	4-9
4.2.1 ชนิดของวัสดุที่ประกอบกันเป็นวัสดุคอมโพสิตในงานด้านยานยนต์ สมบัติเชิงกล และกระบวนการผลิตและขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์	4-9
4.2.2 การประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิตในชิ้นส่วนยานยนต์	4-11
4.3 สมบัติของวัสดุคอมโพสิตในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์	4-14
4.3.1 สมบัติทางการไหลตัว การบ่มตัว และการหดตัว ของวัสดุพื่นในวัสดุคอมโพสิต สมบัติความแข็งแรง แข็งแรง และการยึดจับกับวัสดุพื่นของเส้นใย	4-14
4.3.2 วัสดุเติมแต่งเพื่อปรับสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเพื่อการผลิตและการใช้งาน	4-15
4.4 สมบัติของวัสดุคอมโพสิตต่อการรับภาระทางกลในชิ้นส่วนยานยนต์	4-21
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของวัสดุคอมโพสิต เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์	4-21
4.4.2 กลศาสตร์ของวัสดุ และกลเม็ดในการออกแบบ	4-22
4.4. กระบวนการผลิตชิ้นส่วนที่ทำด้วยวัสดุคอมโพสิต	4-34
4.4.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยเส้นใยสั้นและเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง	4-34
4.5 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยแบบต่อเนื่อง สำหรับการใช้งานด้านยานยนต์และการขนส่ง	4-38
4.5.1 Resin Transfer Molding (RTM)	4-38
4.5.2 การโม่แบบฉีด (Infusion Molding)	4-39
4.5.3 การโม่แบบอโตเคลฟ (Autoclave Molding)	4-39
4.6 การวิเคราะห์กระบวนการผลิต	4-39
4.6.1 ปัจจัยที่จำเป็นในการผลิตวัสดุคอมโพสิต	4-39
4.6.2 การวิเคราะห์ราคาและต้นทุนของวัสดุคอมโพสิตสำหรับการออกแบบ	4-40
4.7 การเชื่อมต่อชิ้นส่วนยานยนต์ที่ทำจากวัสดุคอมโพสิต	4-42

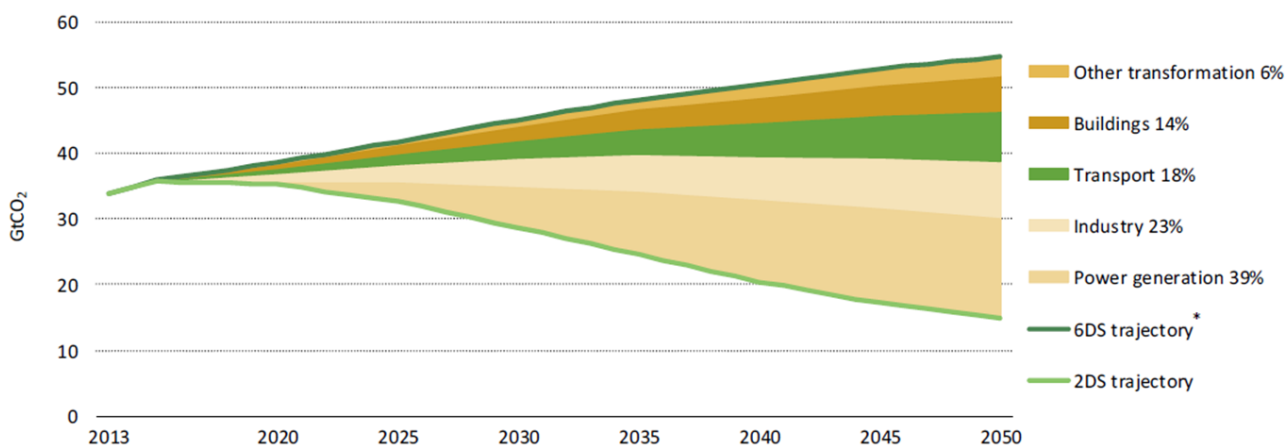
4.7.1 เทคนิคการเชื่อมต่อทางกล (Mechanical Fastening)	4-43
4.7.2 เทคนิคการใช้กาวประสาน (Adhesive Bonding)	4-43
4.7.3 เทคนิคการเชื่อมประสาน (Welding)	4-44
4.8 เอกสารอ้างอิง	4-45
บทที่ 5 แนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต	
5.1 เอกสารอ้างอิง	5-9

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากการศึกษาของ International Energy Agency (IEA) ได้มีการคาดการณ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคส่วนต่างๆ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 ถึง ค.ศ. 2050 ดังแสดงในรูปที่ 1-1 โดยการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและหากไม่มีมาตรการใดๆ เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก จะส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้นถึง 6 องศาเซลเซียส (6°C Scenario, 6DS) อย่างไรก็ตามจากการประชุมรัฐภาคีกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 21 (COP-21) ณ กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2558 ได้มีข้อตกลงร่วมกันที่จะลดการเพิ่มของอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวโลกให้ต่ำกว่า 2 องศาเซลเซียส (2°C Scenario, 2DS) ซึ่งจะต้องลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปี ค.ศ. 2050 ลงประมาณ 15 กิกะตันเทียบกับปี ค.ศ. 2030 โดยหากพิจารณาการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคขนส่ง พบว่าจะต้องลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 18 เทียบกับการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคส่วนอื่นๆ



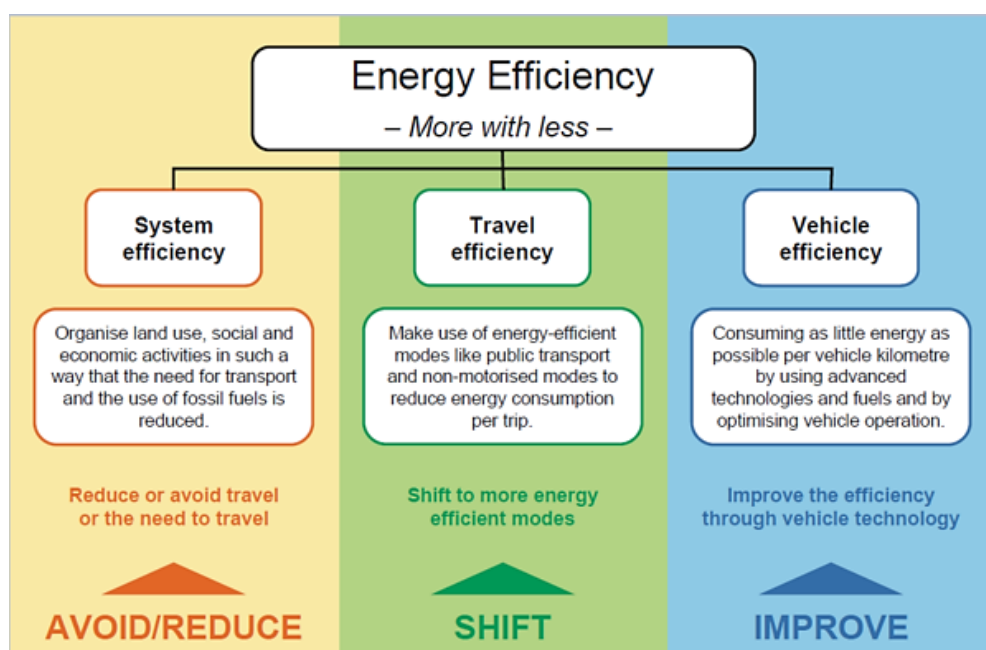
รูปที่ 1-1 การคาดการณ์การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคส่วนต่างๆ โดย IEA [1]

หากพิจารณาแนวทางการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคขนส่ง Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) ได้เสนอแนวทางการลดการใช้พลังงานในภาคขนส่งโดยแบ่งเป็น 3 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 1-2 ดังนี้

1. การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่ง (System efficiency) โดยการบริหารจัดการกิจกรรมทางสังคมต่างๆ เพื่อลดการเดินทางและการขนส่ง ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานในภาคขนส่ง

2. การเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินทาง (Travel efficiency) โดยการใช้วิธีการเดินทางที่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูง เช่น การใช้ระบบขนส่งสาธารณะและการเดินทางที่ไม่ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

3. การเพิ่มประสิทธิภาพของยานยนต์ (Vehicle efficiency) โดยใช้ยานยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดพลังงาน หรือใช้เชื้อเพลิงทดแทนประเภทอื่น เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ในการขับเคลื่อนยานยนต์



รูปที่ 1-2 แนวทางการลดการใช้พลังงานในภาคขนส่ง โดย GIZ [2]

จากแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวโลก ซึ่งนำไปสู่การกำหนดกรอบแนวทางการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคขนส่งของหน่วยงานต่างๆ ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเพิ่มปริมาณการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าบนท้องถนน ซึ่งจะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปัญหามลภาวะในเมืองใหญ่ได้อย่างมีนัยสำคัญ และหากส่งเสริมให้มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาด เช่น ลม แสงอาทิตย์ หรือน้ำ เป็นต้น จะทำให้การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากยานยนต์เป็นศูนย์โดยสมบูรณ์

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีและนวัตกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันและแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคต
2. เพื่อเผยแพร่องค์ความรู้และงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีและนวัตกรรมยานยนต์ไฟฟ้าให้กับประชาชนทั่วไป ผู้ประกอบการด้านยานยนต์ไฟฟ้า และหน่วยงานภาครัฐที่สนใจ

กลุ่มเป้าหมาย

1. ประชาชนทั่วไป
2. ผู้ผลิตและจำหน่ายยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ
3. ผู้ผลิตและจำหน่ายชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้า
4. ผู้ประกอบการที่สนใจในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า
5. หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง

ขอบเขตการดำเนินงาน

1. ศึกษาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน และแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต โดยเน้นประเภทรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

วิธีวิจัยและแผนการดำเนินงาน

1. รวบรวมองค์ความรู้และงานวิจัยจากหน่วยงานต่างๆ จากทั้งในและต่างประเทศ และจัดทำรายงานผลการศึกษาด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมยานยนต์ไฟฟ้า
2. เผยแพร่ความรู้ด้านยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อต่อธุรกิจแก่กลุ่มผู้ประกอบการด้านยานยนต์ไฟฟ้าและชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้ประกอบการที่สนใจในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและผู้ประกอบการที่อาจได้รับผลกระทบจากการสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้า และใช้เป็นแนวทางในการดำเนินนโยบายภาครัฐ

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินการ									
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
1. การศึกษาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า										
1.1 รวบรวมองค์ความรู้จากหน่วยงานต่างๆ	→									
1.2 จัดเตรียมข้อมูลสำหรับการอบรม และจัดทำคู่มือการอบรม		→								
1.3 จัดการอบรมเชิงปฏิบัติการ (Train the Trainers) ให้ผู้ประกอบการอย่างน้อย 10 หน่วยงาน จำนวน 5 ครั้ง					→					
1.4 สรุปผลการดำเนินงาน									→	

ผลลัพธ์และผลผลิตของโครงการ

1. รายงานการศึกษาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต จำนวน 1 ฉบับ

ความคุ้มค่าและประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ไทย

1. ประโยชน์โดยตรงต่อผู้ประกอบการและหน่วยงานภาครัฐ

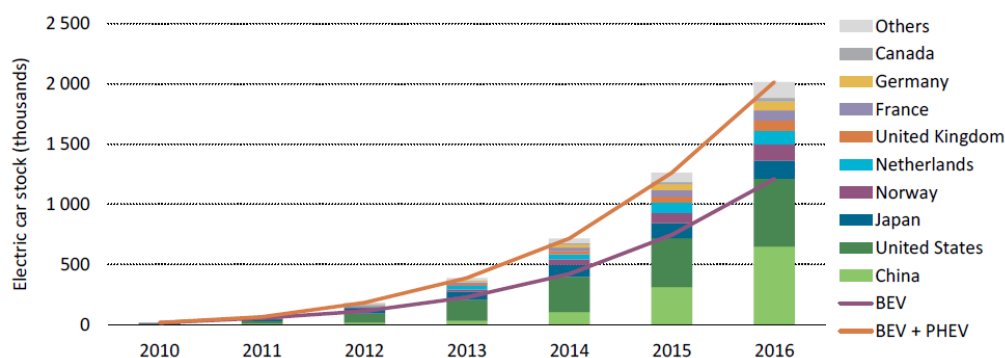
- ผู้ประกอบการและหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องได้รับทราบถึงเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ข้อจำกัด ปัญหาและอุปสรรคในปัจจุบัน และแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคต เพื่อใช้เป็นข้อมูลต่อยอดในการวิจัยและพัฒนา รวมถึงการกำหนดนโยบายในการส่งเสริมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย

2. ประโยชน์โดยอ้อมต่อสังคมและอุตสาหกรรมยานยนต์

- ประชาสังคมได้รับทราบข้อมูลที่ถูกต้อง เหมาะสม เกี่ยวกับเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า และมีความรับรู้ (Awareness) ถึงประโยชน์จากการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าและหันมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

1.2 นโยบายส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศต่างๆ

ในปัจจุบันมีการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและประเภแบตเตอรี่ร่วมกันทั่วโลกเกินกว่า 2 ล้านคัน ดังแสดงในรูปที่ 1-3 ทั้งนี้เป็นผลมาจากมาตรการที่หน่วยงานของประเทศต่างๆ และหน่วยงานระดับนานาชาติเสนอเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การวิจัยและพัฒนาชิ้นส่วนสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ มอเตอร์ขับเคลื่อน และระบบควบคุมต่างๆ เป็นต้น ส่งผลให้ราคาของชิ้นส่วนสำคัญดังกล่าวลดลง อีกทั้งมีการเกิดขึ้นของบริษัทผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ ทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศจีน ประเทศญี่ปุ่น รวมไปถึงประเทศอินเดีย เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1-4 อีกด้วย



รูปที่ 1-3 ปริมาณการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและแบตเตอรี่ทั่วโลก [1]

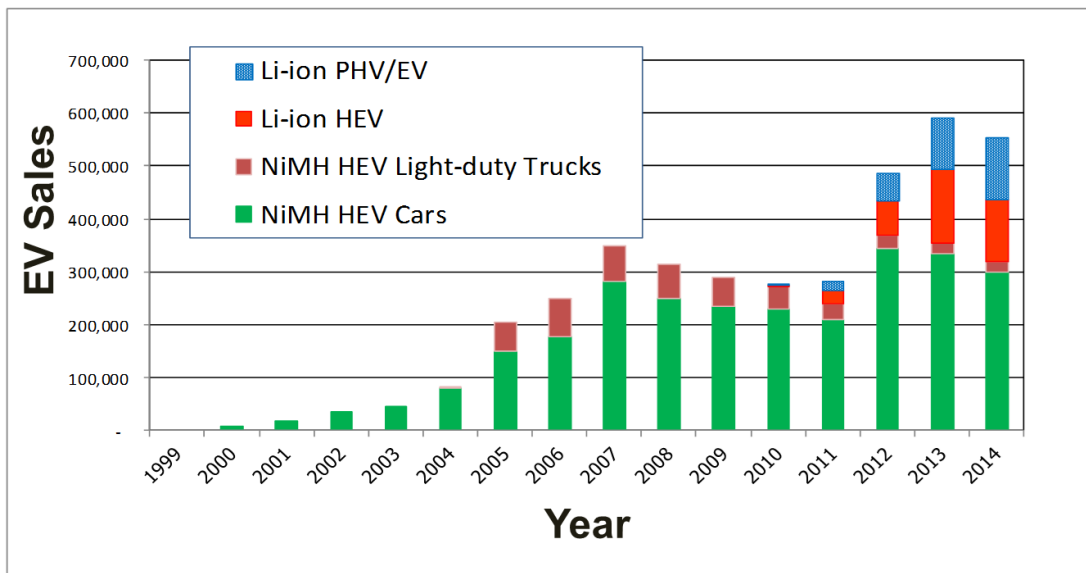


รูปที่ 1-4 บริษัทผู้ผลิทยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศต่างๆ ทั่วโลก [3]

หากพิจารณานโยบายของรัฐบาลประเทศต่างๆ พบว่า หลายประเทศรวมถึงประเทศไทยมีการสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้าทั้งในด้านการผลิต วิจัยและพัฒนา การใช้ และการเตรียมความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐานในการอัดประจุไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 ประเทศสหรัฐอเมริกา

ข้อมูลสถิติการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าทั้งประเภทไฮบริด ปลั๊กอินไฮบริด และประเภทแบตเตอรี่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 1-5 พบว่า ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 จนถึงปี ค.ศ. 2007 โดยปริมาณการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยหลังจากปี ค.ศ. 2007 ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากปัญหาเศรษฐกิจชะลอตัว และได้รับความนิยมมากขึ้นอย่างมากอีกครั้งในปี ค.ศ. 2012 โดยเฉพาะยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและประเภทแบตเตอรี่ เมื่อรัฐบาลให้การสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้าอย่างจริงจังและเพิ่มความเข้มงวดของข้อกำหนดในการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของยานยนต์



รูปที่ 1-5 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา [4]

รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้ให้ความสำคัญในการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีสำคัญๆของยานยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศ อันจะเห็นได้จากการมุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า เช่น เทคโนโลยีแบตเตอรี่ขั้นสูง ระบบขับเคลื่อน และโครงสร้างน้ำหนักเบา เป็นต้น นอกจากนี้รัฐบาลยังให้ความสำคัญกับโครงสร้างพื้นฐานในการอัดประจุไฟฟ้า โดยมีการกำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้องและแนวทางการเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า สำหรับการสร้างตลาดยานยนต์ไฟฟ้า รัฐบาลได้จัดให้มีการเผยแพร่ความรู้สำหรับผู้บริโภค ให้การสนับสนุนด้านการเงินสำหรับผู้ซื้อยานยนต์ไฟฟ้า และเป็นต้นแบบในการใช้ยานยนต์ไฟฟ้า เช่น จัดซื้อยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อใช้ในหน่วยงานภาครัฐ เป็นต้น ทั้งนี้ ประเทศสหรัฐอเมริกาได้กำหนดเป้าหมายของการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ในปี ค.ศ. 2022 ดังนี้

- ราคา 125 เหรียญสหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง
- พลังงานจำเพาะ (Specific Energy) 250 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม
- ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) 400 วัตต์-ชั่วโมงต่อลิตร
- กำลังจำเพาะ (Specific Power) 2,000 วัตต์ต่อกิโลกรัม

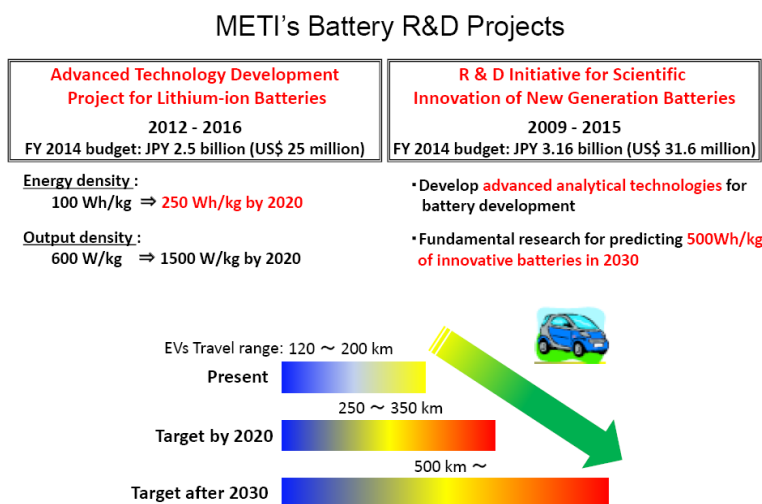
1.2.2 ประเทศญี่ปุ่น

ประเทศญี่ปุ่นเป็นอีกหนึ่งประเทศที่มีผู้ผลิตรายานยนต์ไฟฟ้าหลายรายและรัฐบาลของประเทศญี่ปุ่นเล็งเห็นถึงความสำคัญในการสนับสนุนทั้งในด้านการผลิต การวิจัยและพัฒนา และการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศ โดยมีการตั้งเป้าให้ปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและประเภทแบตเตอรี่มีสัดส่วนเทียบเคียงกับยานยนต์ทั้งหมดสูงถึงร้อยละ 15-20 ภายในปี ค.ศ. 2020 และร้อยละ 20-30 ภายในปี ค.ศ. 2030 ดังแสดงในตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 เป้าหมายสัดส่วนของยานยนต์ประเภทต่างๆ ในปี ค.ศ. 2020 และ ค.ศ. 2030 [5]

Vehicle segment	2020	2030
Current vehicles	50-80%	30-50%
Next generation vehicles	20-50%	50-70%
HEV	20-30%	30-40%
PHEV and BEV	15-20%	20-30%
FCEV	up to 1%	up to 3%
Clean diesel vehicles	up to 5%	5-10%

ในด้านการวิจัยและพัฒนา ประเทศญี่ปุ่นได้ตั้งงบประมาณในปี ค.ศ. 2014 สูงถึง 25 ล้านเหรียญสหรัฐ สำหรับการพัฒนาแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน โดยมีเป้าหมายในการเพิ่มความหนาแน่นพลังงานให้เป็น 250 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ภายในปี ค.ศ. 2020 และตั้งงบประมาณอีก 31.6 ล้านเหรียญสหรัฐ เพื่อการวิจัยและพัฒนาแบตเตอรี่สมัยใหม่ (Next Generation Batteries) โดยตั้งเป้าที่จะพัฒนาแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นพลังงาน 500 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมภายในปี ค.ศ. 2030 ทั้งนี้จากโครงการวิจัยทั้ง 2 โครงการ คาดว่าจะสามารถพัฒนาให้ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่มีระยะทางการวิ่งต่อการอัดประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้งสูงถึง 500 กิโลเมตรในปี ค.ศ. 2030 ดังแสดงในรูปที่ 1-6



รูปที่ 1-6 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ของประเทศญี่ปุ่น [6]

ในด้านการเตรียมความพร้อมโครงสร้างพื้นฐานการอัดประจุไฟฟ้า ประเทศญี่ปุ่นได้จัดเตรียมเครื่องอัดประจุไฟฟ้าทั้งแบบกระแสตรง (อัดประจุเร็ว) และกระแสสลับ (อัดประจุช้า) ในบริเวณที่อยู่อาศัย เช่น พื้นที่จอดรถของคอนโดมิเนียม เป็นต้น อาคารสำนักงาน พื้นที่สาธารณะและศูนย์การค้า และสถานีบริการน้ำมัน และร้านสะดวกซื้อ เป็นต้น

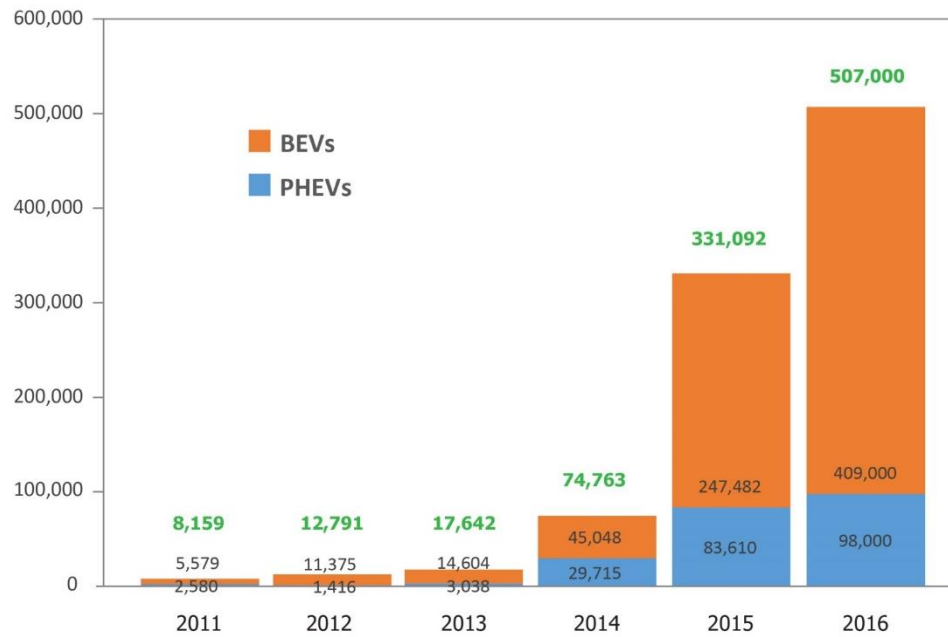
1.2.3 ประเทศจีน

รัฐบาลประเทศจีนได้ให้ความสำคัญในการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้า ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากปัญหามลภาวะในเมืองใหญ่ โดยรัฐบาลได้กำหนดเป้าหมายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและประเภทแบตเตอรี่ ดังนี้

- ปี ค.ศ. 2020 มียานยนต์ไฟฟ้าสะสม 5 ล้านคัน โดยเป็นยอดจดทะเบียนใหม่ 2 ล้านคัน
- ปี ค.ศ. 2025 มีส่วนแบ่งตลาดยานยนต์ไฟฟ้าร้อยละ 20 โดยเป็นยอดจดทะเบียนใหม่ 7 ล้านคัน
- ปี ค.ศ. 2030 มีส่วนแบ่งตลาดยานยนต์ไฟฟ้าร้อยละ 30

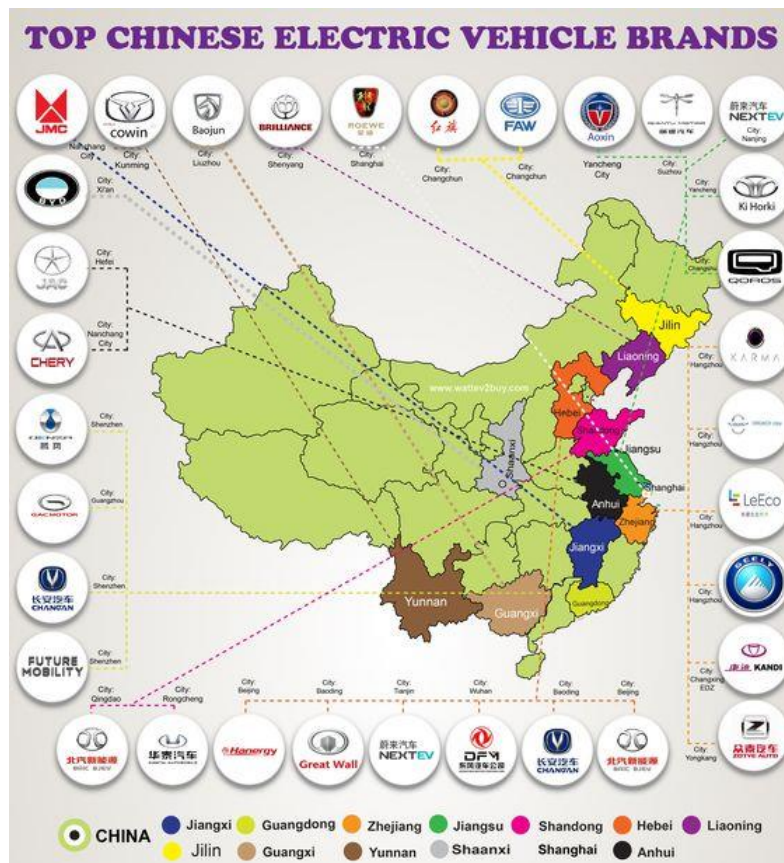
อย่างไรก็ตามจากข้อมูลในปี ค.ศ. 2014 พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและประเภทแบตเตอรี่ที่เป็นรถยนต์ส่วนบุคคลมีจำนวนประมาณ 75,000 คัน รถโดยสารไฟฟ้า 36,500 คัน และรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสูงถึง 230 ล้านคัน ทั้งนี้ ในปี ค.ศ. 2015 และ 2016 จำนวนของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและประเภทแบตเตอรี่ที่เป็นรถยนต์ส่วนบุคคลเพิ่มสูงขึ้นเป็น 331,000 คัน และ 507,000 คัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1-7 โดยหากเปรียบเทียบระหว่างยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและประเภทแบตเตอรี่พบว่ายอดจดทะเบียนส่วนใหญ่เป็นยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการที่ประเทศจีนมีผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคลจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 1-8 และ 1-9 ส่งผลให้เกิดการแข่งขันในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและยานยนต์ไฟฟ้ามีราคาลดลง ทำให้ผู้บริโภคสามารถเลือกซื้อยานยนต์ไฟฟ้าตามกำลังซื้อและเหมาะสมต่อการใช้งานได้ อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งเสริมให้ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความนิยมจากผู้บริโภคในประเทศจีนคือ รัฐบาลมีแนวทางในการส่งเสริมการใช้อย่างจริงจัง โดยทั้งรัฐบาลกลางและรัฐบาลท้องถิ่นมีการสนับสนุนด้านการเงินแก่ผู้ที่ซื้อยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 1-2 พร้อมทั้งในบางเมืองยังให้สิทธิประโยชน์สำหรับผู้ขับขี่ยานยนต์ไฟฟ้าอีกด้วย อาทิเช่น การยกเว้นค่าธรรมเนียมในการจดทะเบียน การอนุญาตให้เฉพาะยานยนต์ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ในพื้นที่ เป็นต้น

จำนวนรถ (คัน)



ปี ค.ศ.

รูปที่ 1-7 ยอดจำหน่ายยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและประเภทแบตเตอรี่ในประเทศจีน [7]



รูปที่ 1-8 ผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้าชั้นนำในประเทศจีน [8]



รูปที่ 1-9 ตัวอย่างยานยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคลในประเทศจีน [9]

ตารางที่ 1-2 ตัวอย่างการสนับสนุนด้านการเงินแก่ผู้ที่ซื้อยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศจีน [9]

Type	Driving Range (km)	Allowance (RMB/car)					
		2013	2014	2015	2016**	2017-2020**	
EV passenger car	[80 -150]*	35,000	cut down by 5% of 2013 standard	cut down by 10% of 2013 standard	25,000	In 2017~2018, cut down by 20% of 2016 standard; in 2019~2020, cut down by 40% of 2016 standard	
	[150 -250]	50,000			45,000		
	R≥250	60,000 (~\$10k)			55,000		
PHEV passenger car	R≥50	35,000			30,000		
Special purpose EV		1800 rmb/kwh, no more than 135,000/car					
Fuel Cell passenger car		200,000	190,000	180,000	200,000		
FC commercial vehicle		450,000					

* Since 2016, the driving range interval will be [100,150]

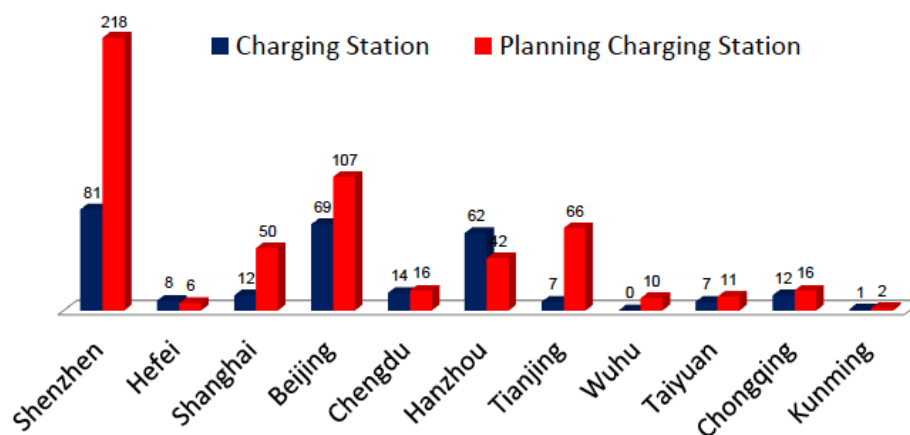
** http://jjs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefagui/201504/t20150429_1224515.html

Total subsidy value* reaches (\$) (in 2015)

Type	Driving Mileage/R (km)	Allowance(\$/car)				
		Beijing	Tianjin	Shanghai	Shenzhen & Guangzhou	Others
EV passenger car	[80 -0150]	9,807	9,807	11,130	~\$10,000	Shanxi Province, Changzhou, Chongqing ...
	[150 - 250]	14,010	14,010	13,232	~\$15,000	
	R≥250	16,812	16,812	14,633	~\$18,000	
PHEV passenger car	R≥50	5,448	9,807	9,574	~\$10,000	About 39 cities support EV progress via favorable policies.
Special purpose EV		560/kwh	560/kwh	592/kwh	592/kwh	
FC passenger car		56,042	28,021	112,083	112,083	
FC commercial vehicle		224,166	224,166	448,333	448,333	

* Total subsidies should not be more than **60%** of MSRP.

ในด้านโครงสร้างพื้นฐานในการอัดประจุไฟฟ้า ประเทศจีนยังคงมีจำนวนเครื่องอัดประจุไฟฟ้าสาธารณะเฉพาะในเมืองใหญ่และยังมีจำนวนไม่มากนัก อย่างไรก็ตามรัฐบาลได้มีการกำหนดแผนการติดตั้งเครื่องอัดประจุไฟฟ้าเพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 1-10



รูปที่ 1-10 ปริมาณเครื่องอัดประจุไฟฟ้าและแผนการติดตั้งในเมืองต่างๆ ของประเทศจีน

1.2.4 ประเทศอินเดีย

ประเทศอินเดียได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า โดยรัฐบาลได้กำหนดแผนพันธกิจแห่งชาติด้านยานยนต์ไฟฟ้า (Indian National Electric Mobility Mission Plan หรือ NEMMP 2020) ตั้งแต่นั้น

ค.ศ. 2013 ดังแสดงในรูปที่ 1-11 โดยมีเป้าหมายหลักในการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง น่าเชื่อถือ และราคาสมเหตุสมผล โดยเน้นการสร้างความร่วมมือระหว่างภาครัฐและภาคเอกชน และตั้งเป้าหมายให้มีปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าสะสม 6-7 ล้านคัน ในปี ค.ศ. 2020 ทั้งนี้ เพื่อให้แผนดังกล่าวบรรลุผลสำเร็จ รัฐบาลอินเดียได้ตั้งคณะทำงานขึ้น 3 คณะ โดยคณะที่ 1 เน้นการวิจัยและพัฒนาชิ้นส่วนสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ มอเตอร์ การประกอบระบบต่างๆ และการทดสอบชิ้นส่วน เป็นต้น และจะจัดตั้งศูนย์ความเป็นเลิศของเทคโนโลยีต่างๆ ดังกล่าวขึ้น คณะที่ 2 เน้นด้านโครงสร้างพื้นฐาน โดยจะศึกษาเทคโนโลยีและกำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งจัดตั้งเมืองสาธิตขึ้น คณะที่ 3 เน้นด้านอุปสงค์และอุปทาน โดยจะศึกษานโยบายการส่งเสริม รวมไปถึงกลไกในการบริหารจัดการและการติดตามผล รวมไปถึงการส่งเสริมการดัดแปลงยานยนต์ไฟฟ้า โดยสรุป จากแผนพันธกิจดังกล่าว รัฐบาลอินเดียมุ่งเน้นการสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้าประเภท 2 และ 3 ล้อ ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไมโครไฮบริดและไฮบริด และชิ้นส่วนในการดัดแปลงยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1-12

Unveiling of NEMMP at PM Residence – 9th January 2013



รูปที่ 1-11 แผนพันธกิจแห่งชาติด้านยานยนต์ไฟฟ้า (Indian National Electric Mobility Mission Plan หรือ NEMMP 2020) [10]

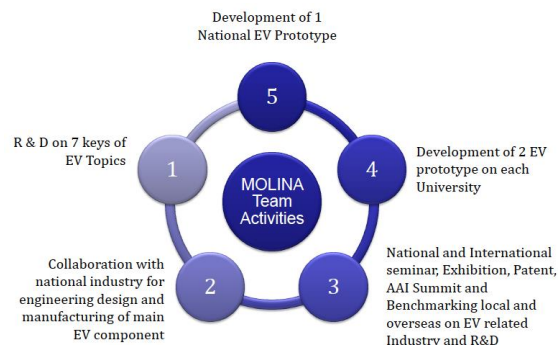
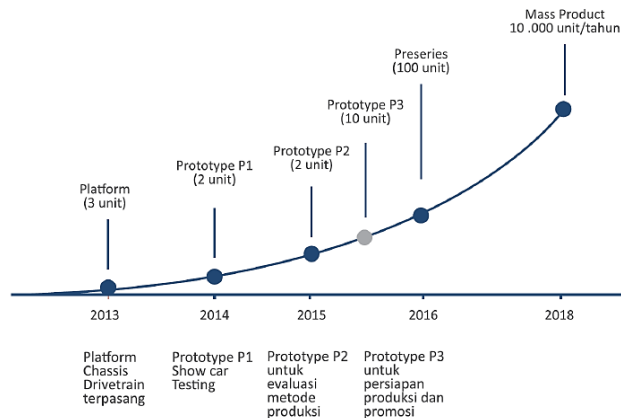


รูปที่ 1-12 ประเภทยานยนต์ไฟฟ้าที่รัฐบาลอินเดียส่งเสริม [10]

1.2.5 ประเทศอินโดนีเซีย

ประเทศอินโดนีเซียมุ่งเน้นการสร้างต้นแบบยานยนต์ไฟฟ้าขึ้นโดยรัฐบาลได้กำหนดแผนที่นำทางในการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบและมีการวางแผนจะจำหน่ายเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ. 2018 ดังแสดงในรูปที่ 1-13 โดยในการวิจัยและพัฒนาต้นแบบดังกล่าวภาครัฐได้กำหนดความร่วมมือกับมหาวิทยาลัย ผู้ประกอบการ ขึ้นส่วนภายในประเทศในการออกแบบทางวิศวกรรมและผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้าที่สำคัญ และมุ่งเน้นการวิจัยและพัฒนา 7 ด้านสำคัญ ประกอบด้วย

1. ระบบกักเก็บพลังงาน
2. ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า
3. ระบบควบคุม
4. ระบบสาธารณูปโภค
5. ระบบโครงสร้างพื้นฐานการอัดประจุไฟฟ้า
6. โครงสร้าง ตัวถัง และการตกแต่งภายใน
7. การรวมระบบ

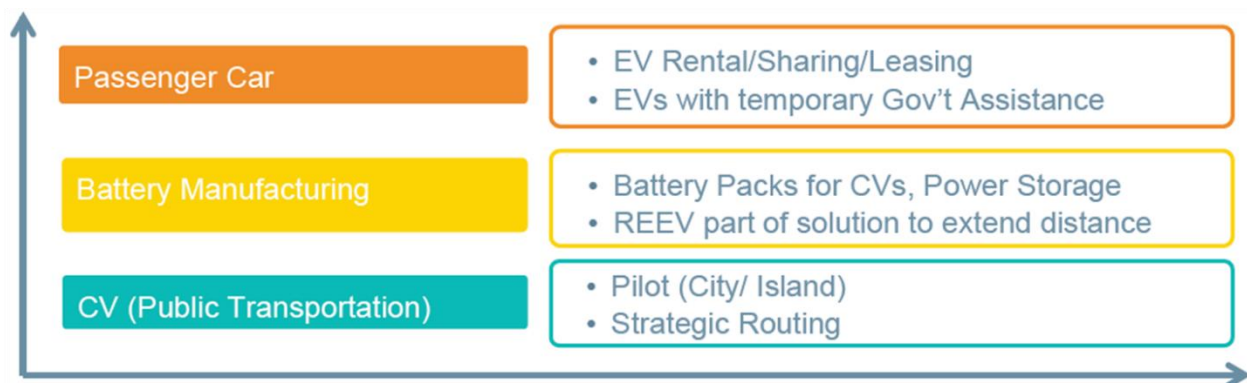


รูปที่ 1-13 แผนที่น่าทางการวิจัยและพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบของประเทศอินโดนีเซีย [11]

1.2.6 ประเทศมาเลเซีย

รัฐบาลประเทศมาเลเซียได้กำหนดแผนส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1-14 โดยมุ่งเน้น 3 ด้านสำคัญได้แก่

1. ยานยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคล โดยเน้นธุรกิจให้เช่า (Rental) และร่วมใช้ (Sharing)
2. การผลิตแบตเตอรี่ โดยมุ่งเน้นการผลิตแพ็คเกจแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ และยานยนต์ไฟฟ้าประเภทยืดระยะ (Range Extended Electric Vehicle หรือ REEV)
3. ยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ โดยเน้นการใช้งานในเมืองสาธิต และกำหนดเส้นทางการใช้งาน



NOTE:

CV – Commercial Vehicle

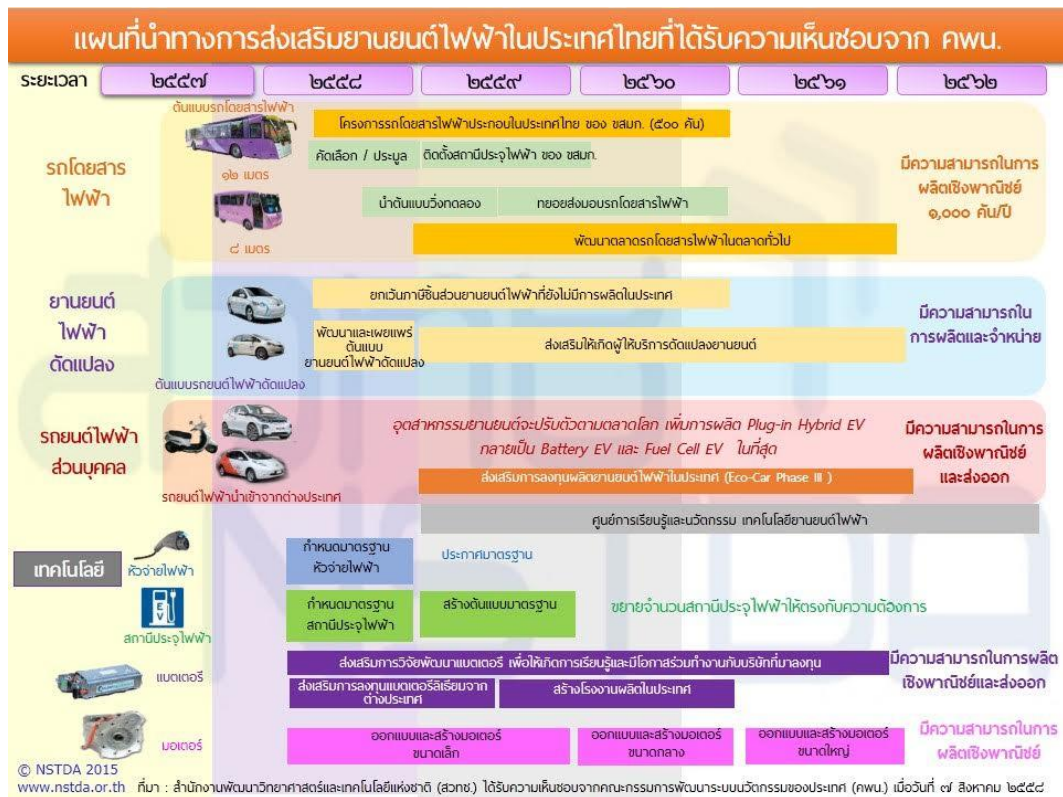
REEV – Range Extender Electric Vehicle

รูปที่ 1-14 แผนส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศมาเลเซีย [12]

1.2.7 ประเทศไทย

สำหรับประเทศไทย พลเอก ประยุทธ์ จันทร์โอชา นายกรัฐมนตรี ได้กล่าวถ้อยแถลงต่อที่ประชุมรัฐภาคีกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 21 (COP-21) ถึงจุดยืนของประเทศไทยในการลดโลกร้อน ซึ่งมีเป้าหมายในการลดก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 25 ภายในปี ค.ศ. 2030 โดยมุ่งเน้นการลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล และหันมาใช้พลังงานทดแทนเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พร้อมผลักดันเรื่องการลดการขนส่งทางถนนเปลี่ยนเป็นการขนส่งทางราง ผลักดันการใช้พลังงานทดแทนในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (Power Development Plan : PDP) ของไทยให้มากขึ้น ขจัดการบุกรุกป่า และทำแผนการบริหารจัดการน้ำอย่างบูรณาการ ซึ่งจะยึดหลักเศรษฐกิจพอเพียงเป็นแนวทางการดำเนินงาน จากถ้อยแถลงดังกล่าว หน่วยงานภาครัฐหลายหน่วยงานในประเทศไทยได้เล็งเห็นความสำคัญของการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยมลพิษในภาคขนส่ง ดังเช่นกระทรวงพลังงานโดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ได้จัดทำแผนอนุรักษ์พลังงาน (พ.ศ. 2558 – 2579) ขึ้นเพื่อกำหนดมาตรการในการลดการใช้พลังงานในภาคส่วนต่างๆ ซึ่งสำหรับภาคการขนส่งมีการคาดการณ์ว่าจะลดการใช้พลังงานลง 30,213 กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) จากเป้าหมายทั้งหมด 56,142 กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) โดยหนึ่งในมาตรการเพื่อลดการใช้พลังงาน คือ การเพิ่มสัดส่วนของยานยนต์ที่ใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนต่อยานยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งจากแผนอนุรักษ์พลังงานมีเป้าหมายส่งเสริมให้มีการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าสะสม 1.2 ล้านคัน ในปี พ.ศ. 2579

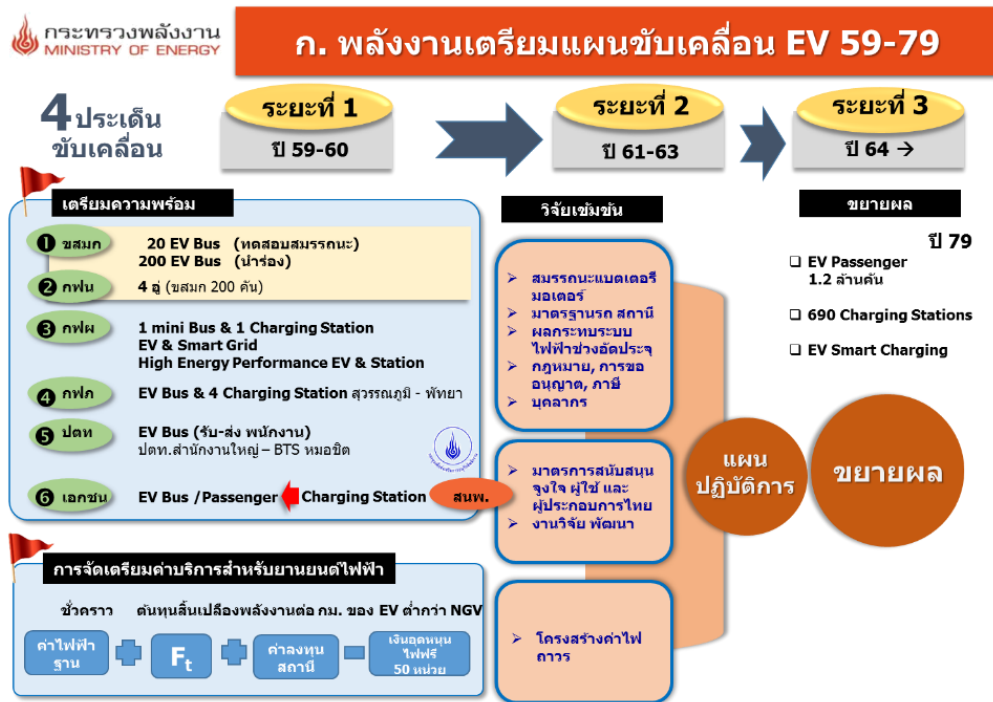
นอกจากแผนอนุรักษ์พลังงานจากกระทรวงพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ได้จัดทำแผนที่นำทางเพื่อส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย (พ.ศ. 2557 – 2562) ดังแสดงในรูปที่ 1-15 ซึ่งแผนที่นำทางดังกล่าวได้รับการเห็นชอบจากคณะกรรมการพัฒนาระบบนวัตกรรมของประเทศ (คพน.) เมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2558 ซึ่งมีนายกรัฐมนตรีเป็นประธาน โดยแผนที่นำทางเพื่อส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้กำหนดการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้า 3 ประเภท ได้แก่ 1.) รถโดยสารไฟฟ้า 2.) ยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง และ 3.) ยานยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคล นอกจากนี้ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ ที่จะได้รับการสนับสนุนแล้ว แผนที่นำทางฉบับนี้ยังมุ่งเน้นที่จะส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาชิ้นส่วนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศอีกด้วย เช่น มอเตอร์ขับเคลื่อน แบตเตอรี่ และสถานีและอุปกรณ์ประจุไฟฟ้า เป็นต้น



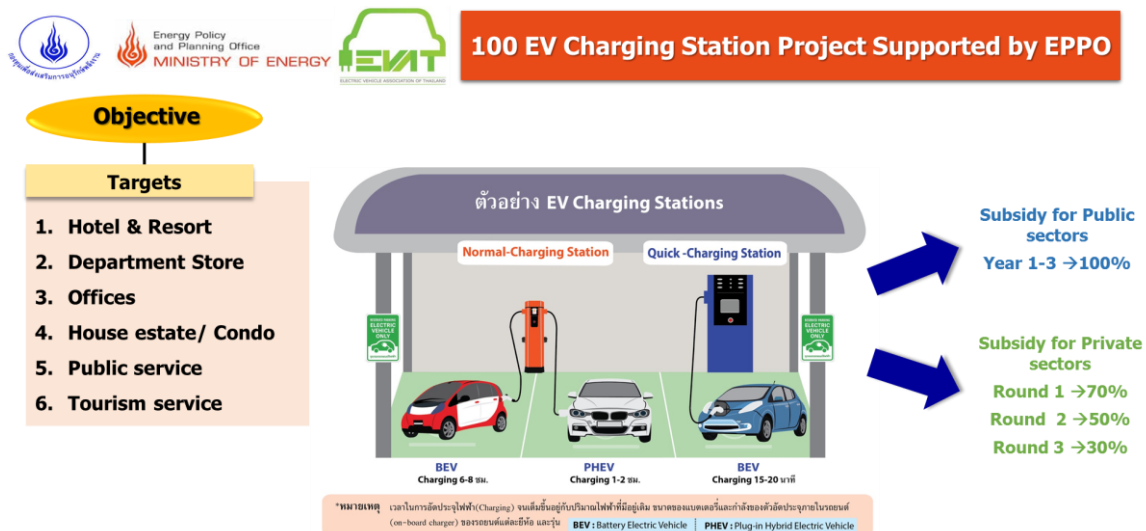
รูปที่ 1-15 แผนที่นำทางการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย [13]

เพื่อให้การส่งเสริมการใช้และอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยมีความยั่งยืน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน ได้จัดทำแผนขับเคลื่อนการกิจด้านการส่งเสริมการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า หรือ EV Action Plan ดังแสดงในรูปที่ 1-16 ซึ่งได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) โดยแผนดังกล่าวแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ระยะ ดังนี้ ระยะที่ 1 เป็นระยะเตรียมความพร้อม โดยมุ่งเน้นเรื่องการสาธิตการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าและศึกษาอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระยะที่ 2 เป็นระยะวิจัยเข้มข้น โดยมุ่งเน้นการวิจัยชิ้นส่วนที่สำคัญสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ มอเตอร์ขับเคลื่อน เป็นต้น รวมไปถึงการศึกษผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าในช่วงอัดประจุและมาตรการสนับสนุนต่างๆ รวมทั้งการกำหนดโครงสร้างค่าไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระยะที่ 3 เป็นระยะขยายผล โดยมีเป้าหมายให้มีการใช้ยานยนต์ส่วนบุคคลไฟฟ้า 1.2 ล้านคัน สถานีอัดประจุไฟฟ้า 690 สถานี และระบบอัดประจุอัจฉริยะ ภายในปี พ.ศ. 2579 นอกจากนี้สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน ได้ดำเนินการตามแผนขับเคลื่อนการกิจด้านพลังงานเพื่อส่งเสริมการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในระยะที่ 1 โดยได้จัดสรรเงินงบประมาณจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานเพื่อใช้สนับสนุนการสร้างสถานีอัดประจุให้กับยานยนต์ไฟฟ้า โดยให้สมาคมยานยนต์ไฟฟ้าไทย ทำหน้าที่บริหารโครงการ และมีคณะทำงาน และคณะกรรมการขับเคลื่อนทำหน้าที่กำกับทิศทางโครงการสนับสนุนการลงทุนสถานีอัดประจุไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมความพร้อมรองรับการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต และสร้างความเชื่อมั่นต่อการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศ และกระตุ้นให้ประชาชนทั่วไปหันมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยสนับสนุนงบประมาณบางส่วนให้กับสวน

ราชการ หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ องค์กรมหาชน สถาบันการศึกษาของรัฐและหน่วยงานของรัฐประเภทอื่น (ที่ไม่ใช่ส่วนราชการ) และภาคเอกชน ในการลงทุนส่งเสริมสถานีอัดประจุไฟฟ้า (Charging Station) ให้กับยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีจำนวนเป้าหมายอย่างน้อย 100 หัวจ่าย ดังรายละเอียดแสดงในรูปที่ 1-17



รูปที่ 1-16 แผนขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า พ.ศ. 2559 – 2579 โดยกระทรวงพลังงาน



รูปที่ 1-17 โครงการสนับสนุนการลงทุนสถานีอัดประจุไฟฟ้า

ในด้านการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า กระทรวงคมนาคมโดยกรมการขนส่งทางบก ได้ปรับปรุงประกาศกรมการขนส่งทางบก เรื่อง กำหนดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตามกฎหมายว่าด้วย

รถยนต์ พ.ศ. 2560 โดยเพิ่มข้อกำหนดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า 4 ล้อขนาดเล็กที่ใช้สำหรับขนส่งผู้โดยสารและสินค้า โดยยานยนต์ไฟฟ้าประเภทดังกล่าวจัดอยู่ในยานยนต์ประเภท L7e ตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรป และเป็นประเภทยานยนต์ไฟฟ้าที่มีแนวโน้มว่าจะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในอนาคต ทั้งนี้ พิกัดกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนและความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ ตามประกาศกรมการขนส่งทางบก ฉบับปี พ.ศ. 2560 สามารถสรุปได้ดังปรากฏในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1-3 ข้อกำหนดเกี่ยวกับขนาดกำลังมอเตอร์และความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้า
ตามประกาศกรมการขนส่งทางบก ปี พ.ศ. 2560

ประเภทยานยนต์ไฟฟ้า	ข้อกำหนดขนาดกำลังมอเตอร์และความเร็วสูงสุด
1. รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า	- กำลังพิกัดมอเตอร์ (Rated Power) ไม่น้อยกว่า 250 วัตต์ - ความเร็วสูงสุดไม่น้อยกว่า 45 กม./ชม.
2. ยานยนต์ไฟฟ้า 3 ล้อ	- กำลังพิกัดมอเตอร์ (Rated Power) ไม่น้อยกว่า 4 กิโลวัตต์ - ความเร็วสูงสุดไม่น้อยกว่า 45 กม./ชม.
3. ยานยนต์ไฟฟ้า 4 ล้อ	- กำลังพิกัดมอเตอร์ (Rated Power) ไม่น้อยกว่า 15 กิโลวัตต์ - ความเร็วสูงสุดไม่น้อยกว่า 90 กม./ชม.
	- น้ำหนักพร้อมใช้งานไม่รวมแบตเตอรี่น้อยกว่า 450 กิโลกรัม (รถยนต์นั่งส่วนบุคคล) หรือ - น้ำหนักพร้อมใช้งานไม่รวมแบตเตอรี่น้อยกว่า 600 กิโลกรัม (รถยนต์บรรทุกส่วนบุคคล) - กำลังพิกัดมอเตอร์ (Rated Power) ไม่น้อยกว่า 4 กิโลวัตต์ - ความเร็วสูงสุดไม่น้อยกว่า 45 กม./ชม. 
4. รถบดถนนและรถแทรกเตอร์	กำลังมอเตอร์ไม่น้อยกว่า 15 กิโลวัตต์

นอกจากนี้ คณะรัฐมนตรียังมีมติเห็นชอบมาตรการกระตุ้นตลาดภายในประเทศ โดยให้ส่วนราชการและรัฐวิสาหกิจสามารถซื้อยานยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ได้ และมีเป้าหมายให้มีสัดส่วนการใช้รถประมาณร้อยละ 20 ของรถยนต์ใหม่ทั้งหมดที่หน่วยงานจัดซื้อ และให้ บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) จัดทำแผนเช่ารถยนต์ โดยเพิ่มการนำเข้ายานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่เพื่อเป็นรถยนต์บริการของสนามบิน (ลิมูซีน) ในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น และให้การนิคมอุตสาหกรรมและกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นำยานยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่มาใช้งานในพื้นที่ปลอดมลพิษ ภายใต้โครงการพัฒนาระเบียงเขตเศรษฐกิจพิเศษ (EEC) รวมทั้งให้สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ศึกษาความ

เป็นไปได้ในการนำรถยนต์สี่ล้อรับจ้าง (แท็กซี่) มาปรับเปลี่ยนเป็นรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าเพื่อต่อยอดองค์ความรู้ ในลักษณะที่มีการดำเนินการเช่นเดียวกับรถยนต์สามล้อไฟฟ้ารับจ้าง (รถตุ๊กตุ๊ก) และให้กรมศิลปากรพิจารณานำรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ มาให้บริการในเขตอุทยานประวัติศาสตร์ขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นที่นิยมของนักท่องเที่ยว เช่น อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย เป็นต้น

ในการเตรียมความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐาน คณะรัฐมนตรีมอบหมายให้กระทรวงพลังงานและกระทรวงคมนาคม ร่วมกันศึกษาแผนการติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้าในพื้นที่เป้าหมายและถนนหลักที่เชื่อมต่อพื้นที่เป้าหมาย และให้สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) เร่งดำเนินโครงการศูนย์ทดสอบยานยนต์และยางล้อแห่งชาติ รวมทั้งพิจารณาจัดหาเครื่องมือ อุปกรณ์และจัดเตรียมความพร้อมด้านบุคลากรเพื่อรองรับการทดสอบยานยนต์หรือชิ้นส่วนยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าต่อไป

ด้านการจัดทำมาตรฐานรถยนต์ไฟฟ้า มอบหมายให้สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) จัดทำมาตรฐานยานยนต์ไฟฟ้าให้ครบถ้วน 4 ประเภทหลัก ได้แก่ ระบบการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า และมีเตอร์กระแสตรงเพื่อใช้ในการจำหน่ายไฟฟ้า

ในด้านการบริหารจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้ว ให้กรมโรงงาน บริหารและจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้ว รวมทั้งจัดทำแผนการบริหารและกำจัดซากแบตเตอรี่รถยนต์ และให้กรมควบคุมมลพิษ กำหนดผลิตภัณฑ์แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ไว้ในพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และซากผลิตภัณฑ์ อื่น ๆ

นอกจากนี้ยังกำหนดให้สถาบันยานยนต์ ดำเนินโครงการเพิ่มผลิตภาพ เน้นการพัฒนาระบบรับรองความสามารถบุคลากร ระยะเวลา 5 ปีแบบต่อเนื่อง เพื่อรองรับอุตสาหกรรมยานยนต์แห่งอนาคตได้

ในด้านการกระตุ้นการลงทุนจากต่างประเทศ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI) ได้ออกประกาศ เรื่อง นโยบายส่งเสริมการลงทุนการผลิตรถยนต์ไฟฟ้า ชิ้นส่วน และอุปกรณ์ โดยมีมาตรการสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้า 3 ประเภท ได้แก่

- 1) ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle – HEV)
- 2) ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in Hybrid Electric Vehicle – PHEV)
- 3) ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle – BEV)

ทั้งนี้ มาตรการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ แบ่งการสนับสนุนออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ประเภท L M และ N ตามการแบ่งประเภทยานยนต์ของสหภาพยุโรป (ดังสรุปในตารางที่ 1-4) และการสนับสนุนรถโดยสารไฟฟ้า นอกจากนี้มาตรการส่งเสริมดังกล่าวยังมุ่งเน้นการส่งเสริมชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า โดยเน้นเทคโนโลยีหลักของยานยนต์ไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ มอเตอร์ขับเคลื่อน (Traction Motor) ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System – BMS) และอุปกรณ์

ควบคุมการขับเคลื่อน (Drive Control Unit – DCU) เป็นต้น และมุ่งเน้นการสร้างห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) ที่เข้มแข็งภายในประเทศ โดย

- 1) บังคับให้ผลิตหรือใช้ชิ้นส่วนสำคัญอย่างน้อย 1 ชิ้นในโครงการผลิตรถยนต์
- 2) ให้สิทธิเพิ่มกรณีผลิตหรือใช้เร็ว หรือจำนวนมากกว่า 1 ชิ้น
- 3) เปิดประเภทให้ส่งเสริมการลงทุนเฉพาะชิ้นส่วนเพิ่มเติม

ตารางที่ 1-4 การแบ่งประเภทยานยนต์ไฟฟ้าของสหภาพยุโรป

ประเภท	ประเภทย่อย	คำนิยาม
L	L ₁	ยานยนต์ 2 ล้อที่มีความจุกระบอกสูบไม่เกิน 50 ซีซี และมีความเร็วออกแบบสูงสุดไม่เกิน 50 กม./ชม.
	L ₂	ยานยนต์ 3 ล้อที่มีความจุกระบอกสูบไม่เกิน 50 ซีซี และมีความเร็วออกแบบสูงสุดไม่เกิน 50 กม./ชม.
	L ₃	ยานยนต์ 2 ล้อที่มีความจุกระบอกสูบมากกว่า 50 ซีซี และมีความเร็วออกแบบสูงสุดมากกว่า 50 กม./ชม.
	L ₄ – L ₅	ยานยนต์ 3 ล้อแบบอสมมาตร (รถจักรยานยนต์มีพ่วงข้าง) และแบบสมมาตรตามลำดับ ที่มีความจุกระบอกสูบมากกว่า 50 ซีซี และมีความเร็วออกแบบสูงสุดมากกว่า 50 กม./ชม.
	L ₆ – L ₇	ยานยนต์ 4 ล้อขนาดเล็ก
M	M ₁	ยานยนต์ที่มี 4 ล้อขึ้นไปและใช้สำหรับขนส่งผู้โดยสาร มีที่นั่งไม่เกิน 8 ที่นั่ง ไม่รวมที่นั่งคนขับ
	M ₂	ยานยนต์ที่มี 4 ล้อขึ้นไปและใช้สำหรับขนส่งผู้โดยสาร มีที่นั่งมากกว่า 8 ที่นั่ง ไม่รวมที่นั่งคนขับ และมีมวลสูงสุดไม่เกิน 5 ตัน
	M ₃	ยานยนต์ที่มี 4 ล้อขึ้นไปและใช้สำหรับขนส่งผู้โดยสาร มีที่นั่งมากกว่า 8 ที่นั่ง ไม่รวมที่นั่งคนขับ และมีมวลสูงสุดมากกว่า 5 ตัน
N	N ₁	ยานยนต์ที่มี 4 ล้อขึ้นไปและใช้สำหรับขนส่งสินค้า และมีมวลสูงสุดไม่เกิน 3.5 ตัน
	N ₂	ยานยนต์ที่มี 4 ล้อขึ้นไปและใช้สำหรับขนส่งสินค้า และมีมวลสูงสุดมากกว่า 3.5 ตัน แต่ไม่เกิน 12 ตัน

ประเภท	ประเภทย่อย	คำนิยาม
	N ₃	ยานยนต์ที่มี 4 ล้อขึ้นไปและใช้สำหรับขนส่งสินค้า และมีมวลสูงสุดมากกว่า 12 ตัน

ในด้านโครงสร้างพื้นฐานการประจุไฟฟ้า สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุนได้กำหนดมาตรการสนับสนุนการเตรียมความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ ทั้งนี้เพื่อสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภค

ทั้งนี้ รายละเอียดของมาตรการส่งเสริมการลงทุนของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ และขึ้นส่วนสำคัญ รวมไปถึงสถานีอัดประจุไฟฟ้า มีดังนี้

ตารางที่ 1-5 มาตรการส่งเสริมการลงทุนของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ

เงื่อนไขและสิทธิประโยชน์	ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (HEV)	ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (PHEV)	ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (BEV)	รถโดยสารไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่
จะต้องเสนอเป็นแผนงานรวม (Package) ประกอบด้วย โครงการผลิตรถยนต์และชิ้นส่วนสำคัญ เช่น แผนนำเข้าเครื่องจักรและชิ้นส่วน / แผนพัฒนาสถานีอัดประจุไฟฟ้า / แผนจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้ว / แผนพัฒนาผู้ผลิตวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนในประเทศ	✓ (ยกเว้น แผนพัฒนาสถานี อัดประจุไฟฟ้า)	✓	✓	✓
จะต้องผลิตหรือใช้ชิ้นส่วนสำคัญอย่างน้อย 1 ชิ้น นับจากวันออกบัตรส่งเสริม	ภายใน 3 ปี	ภายใน 3 ปี	ในปีที่ 6	ภายใน 3 ปี

เงื่อนไขและสิทธิประโยชน์	ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (HEV)	ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (PHEV)	ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (BEV)	รถโดยสารไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่
1) แบตเตอรี่ 2) มอเตอร์ 3) BMS 4) DCU				
จะต้องผ่านมาตรฐานการรับรองแบบ (Type Approval) โดยอ้างอิงข้อกำหนดของสหประชาชาติ (UN Regulations) สำหรับยานยนต์ประเภท L M หรือ N	✓	✓	✓	✗
เงื่อนไขอื่นๆ	✗	✗	ภายใน 3 ปี นับแต่วันออกบัตรส่งเสริม จะต้องมีการประกอบรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่	✗
ยื่นคำขอภายในวันที่	31 ธ.ค. 60	31 ธ.ค. 61	31 ธ.ค. 61	31 ธ.ค. 61
สิทธิประโยชน์	- ยกเว้นอากรขาเข้าสำหรับเครื่องจักร - สามารถนับปริมาณการผลิตจริงเป็นอีโคโนคาร์ได้	- ยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคล 3 ปี และเพิ่มขึ้น 1 ปี ต่อขึ้น สำหรับโครงการที่มีการผลิตชิ้นส่วนสำคัญมากกว่า 1 ชิ้น แต่รวมแล้วไม่เกิน 6 ปี - ยกเว้นอากรขา	- ในปีที่ 1 – 2 นับแต่วันออกบัตรส่งเสริม จะอนุญาตให้นำเข้ายานยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ทั้งคัน (CBU) โดยได้รับยกเว้นอากรขาเข้าเพื่อทดลองตลาดได้ ในปริมาตรที่คณะกรรมการให้ความเห็นชอบและ	- ยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคล 3 ปี และเพิ่มขึ้น 1 ปี ต่อขึ้น สำหรับโครงการที่มีการผลิตชิ้นส่วนสำคัญมากกว่า 1 ชิ้น แต่รวมแล้วไม่เกิน 6 ปี - ยกเว้นอากรขา

เงื่อนไขและสิทธิประโยชน์	ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (HEV)	ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (PHEV)	ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (BEV)	รถโดยสารไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่
		เข้าสำหรับเครื่องจักร - สามารถนับปริมาณการผลิตจริงเป็นอีโคคาร์ได้	จะต้องติดตั้งสายการประกอบและทดสอบให้แล้วเสร็จ - ให้ได้รับยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคลเพิ่มเติมอีก 2 ปี สำหรับโครงการที่มีการผลิตหรือใช้ขึ้นส่วนสำคัญอย่างน้อย 1 ชั้น ในปี 4 นับแต่วันออกบัตรส่งเสริม - ให้ได้รับยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคลเพิ่มเติมอีก 1 ปี สำหรับโครงการที่มีการผลิตหรือใช้ขึ้นส่วนสำคัญอย่างน้อย 1 ชั้น ในปี 5 นับแต่วันออกบัตรส่งเสริม - สำหรับโครงการที่มีการผลิตหรือใช้ขึ้นส่วนสำคัญมากกว่า 1 ชั้น จะได้รับสิทธิยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคลเพิ่มขึ้นชั้นละ 1 ปี	เข้าสำหรับเครื่องจักร - ขอรับสิทธิเพิ่มตามมาตรการเพิ่มขีดความสามารถของผู้ประกอบการวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) โดยให้ได้รับยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคลเป็นเวลา 5 ปี

เงื่อนไขและสิทธิประโยชน์	ยานยนต์ไฟฟ้า ไฮบริด (HEV)	ยานยนต์ไฟฟ้า ปลั๊กอินไฮบริด (PHEV)	ยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ (BEV)	รถโดยสารไฟฟ้า ประเภท แบตเตอรี่
			แต่รวมแล้วไม่เกิน 10 ปี ทั้งนี้ กรณีได้รับสิทธิยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคลมากกว่า 8 ปี จะต้องมีการถ่ายทอดเทคโนโลยี โดยร่วมมือกับสถาบันการศึกษา หรือสถาบันวิจัยตามรูปแบบที่คณะกรรมการกำหนด - ยกเว้นอากรขาเข้าสำหรับเครื่องจักร - นับปริมาณการผลิตจริงเป็นอีโคคาร์ได้	

● **กิจการสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า**

1. จะต้องเสนอเป็นแผนการจัดหาอุปกรณ์และชิ้นส่วน
2. จะต้องเสนอแผนพัฒนาระบบอัดประจุไฟฟ้าอัจฉริยะ (EV Smart Charging System)
3. จะต้องมียกจ่ายประจุไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 4 หัวจ่าย โดยเป็นประเภท Quick Charge อย่างน้อย 1 หัวจ่าย
4. จะต้องไม่ได้รับสิทธิและประโยชน์จากหน่วยงานอื่น
5. จะต้องดำเนินการให้ได้ ISO 18000 ภายใน 3 ปี นับแต่วันออกบัตรส่งเสริม
6. จะต้องยื่นคำขอภายในวันที่ 31 ธันวาคม 2561

นอกจากนี้ ยังกำหนดให้ประเภทกิจการผลิตอุปกรณ์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริด ปลั๊กอินไฮบริดและแบตเตอรี่ ให้ได้รับสิทธิและประโยชน์เพิ่มเติมจากการยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคลสำหรับกิจการที่ตั้งในพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก โดยให้ได้รับลดหย่อนภาษีเงินได้นิติบุคคลสำหรับกำไรสุทธิที่ได้จาก

การลงทุนในอัตราร้อยละ 50 ของอัตราปกติ เป็นระยะเวลา 5 ปี นับแต่วันที่กำหนดระยะเวลาการยกเว้นภาษีเงิน
ได้นิติบุคคลสิ้นสุดลง

เพื่อสร้างแรงจูงใจให้ประชาชนหันมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นและกระตุ้นการลงทุนผลิตยาน
ยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยตามนโยบายส่งเสริมการลงทุนของคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI)
กระทรวงการคลัง โดยกรมสรรพสามิต ได้ปรับปรุงโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์โดยจัดเก็บตามปริมาณการ
ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวนโยบายของรัฐบาลในการกระตุ้นให้ประชาชนตระหนักถึง
ความสำคัญของการลดการปลดปล่อยมลพิษ โดยกำหนดอัตราภาษีสรรพสามิตใหม่ที่ร้อยละ 2 สำหรับยานยนต์
ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ที่ได้รับส่งเสริม อีกทั้งลดหย่อนภาษีสรรพสามิตกึ่งหนึ่งจากอัตราปกติ สำหรับยานยนต์
ไฟฟ้าประเภทไฮบริด (HEV) และยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) ที่ได้รับส่งเสริม ดังสรุปในตารางที่
1-6

ตารางที่ 1-6 อัตราภาษีสรรพสามิตสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดและปลั๊กอินไฮบริดที่ได้รับการส่งเสริม
การลงทุน ตามประกาศคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน

Type	Effective from 1 st January 2016						BOI Package	
	Engine size	CO ₂	E0 – E20	E85, NGV	HEV, PHEV	BEV, FCEV	HEV, PHEV	BEV
Passenger cars	< 3,000 cc.	< 100 g/km			10%		5%	
		101-150 g/km	30%	25%	20%		10%	
		151 – 200 g/km	35%	30%	25%	10%	12.5%	2%
		> 200 g/km	40%	35%	30%		15%	
	> 3,000 cc.		50%	50%	50%			
Eco-car	Gasoline < 1,300 cc.	< 100 g/km	14% (12% for E85)					
	Diesel < 1,400 cc.	101 - 120 g/km	17%					

1.3 การพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าและทิศทางในอนาคต

ยานยนต์ไฟฟ้าคันแรกของโลกถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1834 โดย Thomas Davenport ซึ่งเป็นยาน
ยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าประเภทกระแสตรงและวิ่งบนรางที่มีกระแสไฟฟ้าไหล (Electrified track)
ต่อมาในปี ค.ศ. 1888 วิศวกรชาวเยอรมัน นามว่า Andreas Flocken ได้สร้างยานยนต์ไฟฟ้า 4 ล้อคันแรกขึ้น
ความนิยมของยานยนต์ไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 1897 มีการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อเป็นรถแท็กซี่

Grams CO₂ per kilometer, normalized to NEDC

Legend:

- US-LDV
- California-LDV
- Canada-LDV
- EU
- Japan
- China
- S. Korea
- Australia

Line Styles:

- Solid dots and lines: historical performance.
- Solid dots and dashed lines: enacted targets.
- Solid dots and dotted lines: proposed targets.
- Hollow dots and dotted lines: unannounced proposal.

Key Data Points and Targets:

- 2000:** US-LDV ~260, California-LDV ~260, Canada-LDV ~240, EU ~170, Japan ~160, China ~210, S. Korea ~260, Australia ~160.
- 2005:** US-LDV ~250, California-LDV ~250, Canada-LDV ~230, EU ~165, Japan ~200, China ~190, S. Korea ~240, Australia ~150.
- 2010:** US-LDV ~240, California-LDV ~240, Canada-LDV ~210, EU ~155, Japan ~210, China ~180, S. Korea ~210, Australia ~130.
- 2015:** US-LDV ~220, California-LDV ~220, Canada-LDV ~180, EU ~145, Japan ~200, China ~170, S. Korea ~180, Australia ~120.
- 2020:** US-LDV ~190, California-LDV ~190, Canada-LDV ~150, EU ~130, Japan ~180, China ~150, S. Korea ~150, Australia ~110.
- 2025:** US-LDV ~170, California-LDV ~170, Canada-LDV ~130, EU ~110, Japan ~160, China ~130, S. Korea ~130, Australia ~100.

Callouts:

- China 2025: 117**
- Japan 2025: 105**
- EU 2025: 95**
- US 2025: 107**
- 25 MPG US CAFE**
- 35.5 MPG US CAFE, 30% Impr. fuel cons.**
- 54.5 MPG US CAFE, 54% Impr. fuel cons.**

Notes:

- [1] China's target reflects gasoline fleet scenarios. If including other fuel types, the target will be lower.
- [2] US and Canada light-duty vehicles include light-commercial vehicles.

สำหรับประเทศไทย รถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาประเทศไทยเมื่อไรยังไม่มีทราบแน่ชัด อย่างไรก็ตามได้มีการค้นพบภาพเก่าในขณะที่ยกพระเจ้าบรมวงศ์เธอพระองค์เจ้าอรุณวงศ์รัชสมโภช พระราชโอรสในพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว ทรงถือพวงมาลัยรถยนต์ไฟฟ้าของบริษัท Carl Oppermann Electric Carriage จำกัด ของประเทศอังกฤษซึ่งผลิตและส่งมาสยามในปี ค.ศ. 1905 (พ.ศ. 2448) ดังแสดงในรูปที่ 1-18 โดยยานยนต์ไฟฟ้านี้มีมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า และระยะทางวิ่งสูงสุด 50 ไมล์ (80 กิโลเมตร) สามารถทำความเร็วสูงสุด 14 ไมล์ต่อชั่วโมง (22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) บริษัท Carl Oppermann Electric Carriage จำกัด เป็นบริษัทผู้พัฒนายานยนต์ไฟฟ้าระหว่าง ค.ศ. 1898 -1907 โดยนาย Carl Oppermann เป็นผู้ริเริ่ม ซึ่งนาย Carl Oppermann เกิดเมื่อวันที่ 11 เมษายน ค.ศ. 1838 ณ เมืองฮัมบูร์ก ประเทศเยอรมนี และย้ายมายังกรุงลอนดอน สหราชอาณาจักร ในปี ค.ศ. 1862 โดยเป็นวิศวกรเครื่องกลและผู้ผลิตนาฬิกาก่อนจะมาพัฒนายานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 1-18 พระเจ้าบรมวงศ์เธอพระองค์เจ้าอรุณศรีรัชสมโภททรงถือพวงมาลัยรถยนต์ไฟฟ้าของ บริษัท Carl Oppermann Electric Carriage จำกัด [15]

นอกจากยานยนต์ไฟฟ้าของบริษัท Carl Oppermann Electric Carriage จำกัด ที่เข้ามาในประเทศไทย แล้ว ยังมียานยนต์ไฟฟ้าจากบริษัท Baker Electric Car จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผู้พัฒนาและผลิตรถยนต์ไฟฟ้าของ ประเทศสหรัฐอเมริกาที่เข้ามาจำหน่ายในสยามในรัชสมัยของพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว โดยบริษัท Baker Electric Car จำกัด ได้ลงโฆษณาในหนังสือพิมพ์ Daily Arizona Silver Belt เมื่อปี ค.ศ. 1909 ว่า พระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้ไว้วางพระราชหฤทัยให้บริษัท Baker Electric Car จำกัด จัดสร้าง ยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นพระราชพาหนะในการเดินทางในกรุงเทพฯ และปริมณฑล ดังแสดงในรูปที่ 1-19

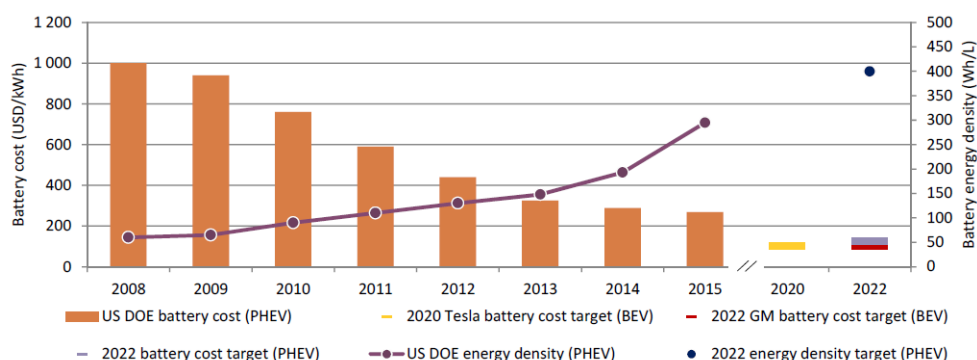


รูปที่ 1-19 ภาพโฆษณาของบริษัท Baker Electric Car จำกัด กล่าวถึงพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้า เจ้าอยู่หัวทรงซื้อยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นพระราชพาหนะ [16]

นอกจากข้อมูลเบื้องต้นในการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในรัชสมัยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวแล้ว ยังไม่ปรากฏข้อมูลการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มเติมจนกระทั่งปี พ.ศ. 2552 (ค.ศ. 2009) บริษัท โตโยต้า มอเตอร์ ประเทศไทย จำกัด ได้ผลิตและวางจำหน่ายรถยนต์โตโยต้า รุ่น Camry Hybrid ในประเทศไทย ซึ่งนับเป็นประเทศแรกในทวีปเอเชีย หลังจากนั้นยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ โดยมียานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ จำหน่ายอย่างเป็นทางการในประเทศไทย ได้แก่ รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า รถโดยสารไฟฟ้า รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ประเภทไฮบริดและปลั๊กอินไฮบริด ทั้งนี้จากสถิติการจดทะเบียนสะสมของยานยนต์ไฟฟ้าจากกรมการขนส่งทางบก พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดและปลั๊กอินไฮบริดได้รับความนิยมอย่างมากโดยข้อมูล ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2560 แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมียอดจดทะเบียนสะสมยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดและปลั๊กอินไฮบริด รวมกันมากกว่า 79,000 คัน โดยกว่าร้อยละ 99 เป็นรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

สำหรับสถิติการจดทะเบียนสะสมของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEV) ในประเทศไทย พบว่ายอดจดทะเบียนสะสม ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2560 มีจำนวนถึง 1,488 คัน โดย 1,356 คัน หรือกว่าร้อยละ 90 เป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

หากพิจารณาทิศทางการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้า มุ่งเน้นไปยังเทคโนโลยีแบตเตอรี่ซึ่งเป็นหนึ่งในชิ้นส่วนสำคัญสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จากข้อมูลของ International Energy Agency (IEA) พบว่าหลายหน่วยงานมีการวิจัยเพื่อที่จะเพิ่มความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) ในแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มระยะทางในการขับเคลื่อนต่อการอัดประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง ในขณะที่ราคาของแบตเตอรี่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1-20 โดยบริษัท เทสลา ได้กำหนดเป้าหมายของราคาแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ในปี ค.ศ. 2020 อยู่ที่ประมาณ 100 เหรียญสหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ในขณะที่บริษัท GM กำหนดเป้าหมายเดียวกันในปี ค.ศ. 2022 สำหรับความหนาแน่นพลังงาน Department of Energy ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้กำหนดเป้าหมายในปี ค.ศ. 2022 ไว้ที่ 400 วัตต์-ชั่วโมงต่อลิตร



Notes: USD/kWh = United States dollars per kilowatt-hour; Wh/L = watt-hours per litre. PHEV battery cost and energy density data shown here are based on an observed industry-wide trend, include useful energy only, refer to battery packs and suppose an annual battery production of 100 000 units for each manufacturer.

Sources: US DOE (2015 and 2016) for PHEV battery cost and energy density estimates; EV Obsession (2015); and HybridCARS (2015).

รูปที่ 1-20 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าและทิศทางในอนาคต [1]

ในด้านการพัฒนาการอัดประจุไฟฟ้า พบว่าในปัจจุบันการอัดประจุไฟฟ้าผ่านสายอัดประจุได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายและมีความปลอดภัยสูง อย่างไรก็ตามมีการพัฒนาระบบการอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย (Wireless charging) เนื่องจากระบบดังกล่าวมีความสะดวกในการใช้งาน เนื่องจากผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อสายอัดประจุเข้ากับยานยนต์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังลดความเสี่ยงในการใช้งานขณะฝนตก อย่างไรก็ตามระบบการอัดประจุไฟฟ้าไร้สายยังมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพการอัดประจุที่ยังไม่สูงมากนักในปัจจุบัน

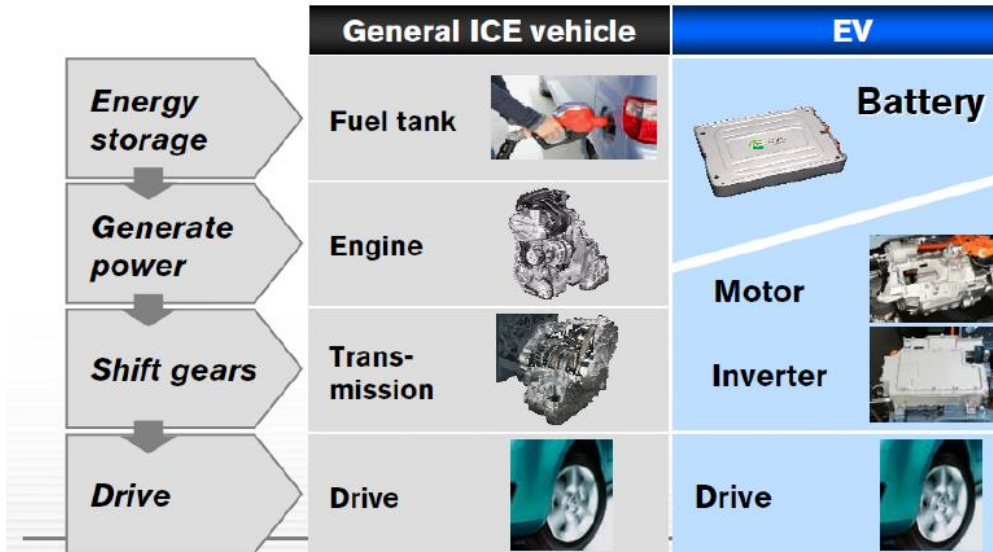
1.4 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้า หมายถึง ยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว หรือยานยนต์ที่อาศัยเครื่องยนต์มาใช้ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งในส่วนของการขับเคลื่อนและผลิตพลังงานไฟฟ้าเก็บสะสมในแบตเตอรี่ หรือการอัดประจุไฟฟ้าจากภายนอกหรือการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

ยานยนต์ไฟฟ้าและเครื่องยนต์สันดาปภายในมีความแตกต่างกันในด้านการเก็บพลังงาน การผลิตพลังงาน การขับเคลื่อน และการส่งผ่านกำลังขับเคลื่อน ดังรูปที่ 1-21 โดยยานยนต์ไฟฟ้ามีการใช้แบตเตอรี่เพื่อเก็บพลังงาน และการผลิตพลังงานส่งให้มอเตอร์โดยมีอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้กับมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนล้อให้เคลื่อนที่ ในขณะที่เครื่องยนต์สันดาปภายในมีการใช้แบตเตอรี่เพียงเพื่อการเก็บพลังงานเท่านั้น โดยมีระบบผลิตพลังงานได้แก่เครื่องยนต์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนให้รถยนต์เคลื่อนที่ หากพิจารณาการเชื่อมต่อของระบบต่างๆ ของยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1-22 พบว่า นอกจากระบบขับเคลื่อนและระบบกักเก็บพลังงานที่มีความแตกต่างจากยานยนต์เครื่องยนต์แล้ว ระบบอื่นๆ เช่น ระบบปรับอากาศ ระบบบังคับเลี้ยว ระบบช่วงล่าง และระบบเบรก เป็นต้น ไม่มีความแตกต่างจากระบบของยานยนต์เครื่องยนต์มากนัก นอกจากนี้การอัดประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ระบบการอัดประจุแบบปกติหรือแบบช้า (Normal Charging) จะเป็นการอัดประจุผ่านอุปกรณ์อัดประจุที่ติดตั้งในยานยนต์ (On-board Charger) เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เพื่อกักเก็บในแบตเตอรี่ อีกระบบหนึ่งคือการอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว (Quick Charging) คือการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสตรง (DC) จากตู้อัดประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่โดยตรง

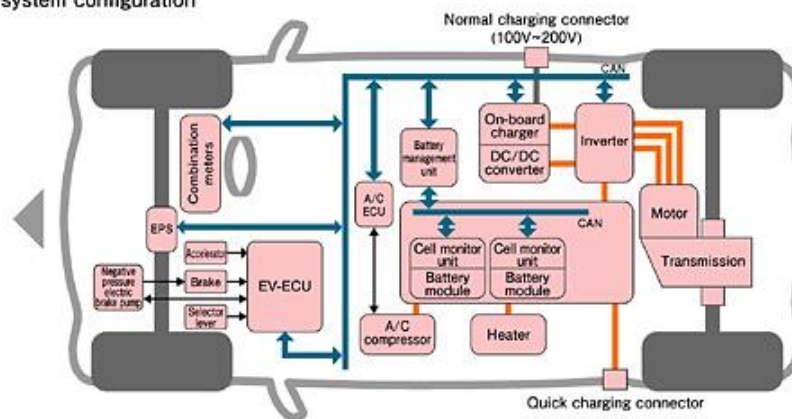
Battery Electric Vehicle (BEV)

- Battery not only stores energy but also generates power
- Battery performance defines main values of EV, such as cruising range, acceleration and cabin space

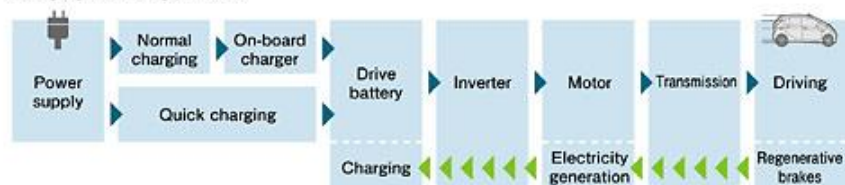


รูปที่ 1-21 การเปรียบเทียบยานยนต์ไฟฟ้าและเครื่องยนต์สันดาปภายใน [17]

■ EV system configuration



Charging-to-driving process

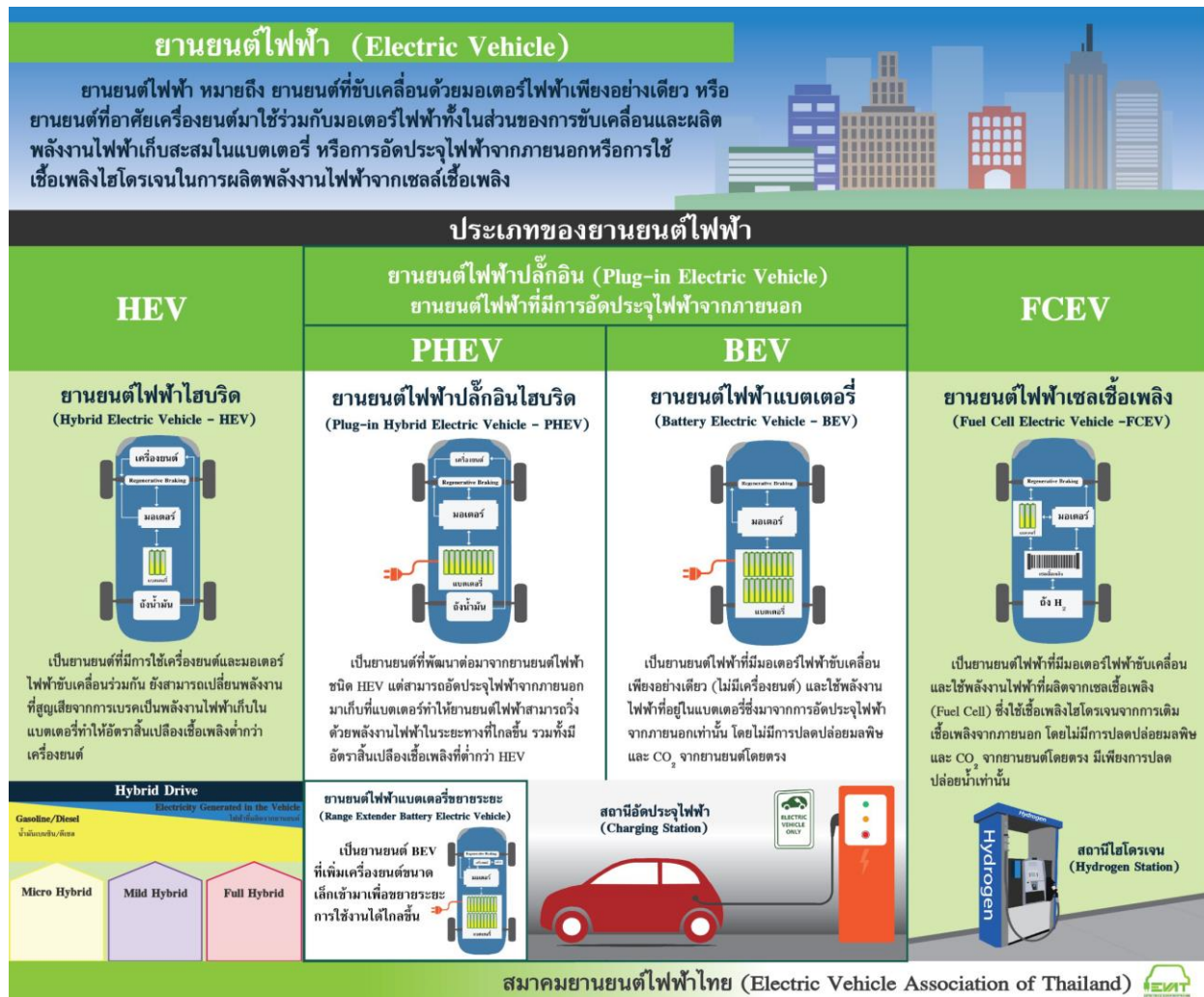


รูปที่ 1-22 ส่วนประกอบหลักของยานยนต์ไฟฟ้าและรูปแบบการอัดประจุ [18]

หากพิจารณาประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1-23 และมีรายละเอียด ดังนี้

- 1.) **ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle – HEV)** เป็นยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในและมอเตอร์ในการขับเคลื่อนร่วมกัน อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนพลังงานที่สูญเสียจากการเบรกเป็นพลังงานไฟฟ้าเก็บในแบตเตอรี่ทำให้อัตราสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่าการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเพียงอย่างเดียว
- 2.) **ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in Hybrid Electric Vehicle – PHEV)** เป็นยานยนต์ที่ได้รับการพัฒนาต่อยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริด ซึ่งสามารถอัดประจุไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกได้ ส่งผลให้มีระยะทางวิ่งด้วยไฟฟ้าที่ไกลขึ้น รวมทั้งมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่ายานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริด
- 3.) **ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle – BEV)** เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียว (ไม่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน) และใช้พลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่ซึ่งมาจากการอัดประจุไฟฟ้าจากภายนอกเท่านั้น โดยไม่มีการปลดปล่อยมลพิษและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากยานยนต์โดยตรง
- 4.) **ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV)** เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนและใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ซึ่งใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากการเติมจากภายนอก โดยไม่มีการปลดปล่อยมลพิษและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงจากยานยนต์ มีเพียงแต่การปลดปล่อยน้ำเท่านั้น

นอกจากนี้ยังมียานยนต์ในกลุ่มของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ที่มีเครื่องยนต์ขนาดเล็กเพื่อเพิ่มระยะทางการใช้งานให้ไกลขึ้นซึ่งเรียกว่ายานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ขยายระยะ หรือ Range Extender Battery Electric Vehicle



รูปที่ 1-23 ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ

ความปลอดภัยในการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าถือเป็นข้อกังวลหนึ่งที่ผู้สนใจที่จะใช้ยานยนต์ไฟฟ้าให้ความสำคัญ อย่างไรก็ตามหน่วยงานด้านความปลอดภัยในการใช้ยานยนต์ของประเทศต่างๆ ได้ประกาศข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของยานยนต์ไฟฟ้าและมาตรฐานของอุปกรณ์ที่สำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์ขับเคลื่อน และแบตเตอรี่ โดยในสหภาพยุโรปได้มีการประกาศข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะการใช้งานและความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้า ดังนี้

- 1) **ข้อกำหนด UNECE Regulation No.85** ว่าด้วยการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายในหรือมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ประเภท M (ยานยนต์ที่ใช้สำหรับบรรทุกผู้โดยสาร) และ N

(ยานยนต์ที่ใช้สำหรับบรรทุกสินค้า) โดยการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้านั้นจะทดสอบกำลังสุทธิ (Net Power) และกำลังสูงสุดของระบบส่งกำลังเป็นเวลา 30 นาที (Maximum 30 minutes power)

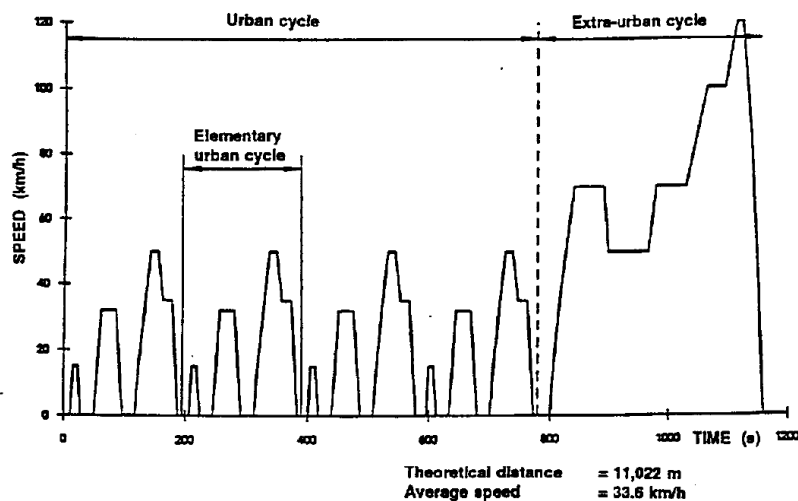
- 2) **ข้อกำหนด UNECE Regulation No.100** ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ว่าด้วยความปลอดภัยของการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า (Electrical shock) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีความต่างศักย์สูง (High Voltage System) โดยข้อกำหนด UNECE R100 ได้กำหนดค่าความต้านทานในส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้ามายังผู้ขับขี่ และส่วนที่ 2 ว่าด้วยความปลอดภัยของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่สามารถอัดประจุได้ของยานยนต์ไฟฟ้า (Rechargeable Energy Storage System, RESS) โดยอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจะต้องผ่านการทดสอบในรูปแบบต่างๆ เช่น การทดสอบการสั่นสะเทือน การทดสอบการรั่วไหลของอิเล็กทรอนิกส์ภายหลังการกระแทก การทดสอบการหนไฟ การทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว การทดสอบการ Overcharge เป็นต้น หรือติดตั้งบนยานยนต์และทดสอบการชนตามข้อกำหนด UNECE Regulation No.94 (การทดสอบการชนด้านหน้า) UNECE Regulation No.95 (การทดสอบการชนด้านข้าง)
- 3) **ข้อกำหนด UNECE Regulation No.136** ซึ่งเป็นข้อกำหนดว่าด้วยความปลอดภัยของการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า และความปลอดภัยของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่สามารถอัดประจุได้ (RESS) สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าประเภท L (ยานยนต์ไฟฟ้า 2 ล้อ 3 ล้อ และ 4 ล้อขนาดเล็ก) โดยข้อกำหนด UNECE Regulation No. 136 และข้อกำหนด UNECE Regulation No.100 มีความใกล้เคียงกัน จะมีข้อแตกต่างกันในด้านของรูปแบบการทดสอบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่สามารถอัดประจุได้
- 4) **ข้อกำหนด UNECE Regulation No.138** ซึ่งเป็นข้อกำหนดว่าด้วยระบบเสียงเตือน ซึ่งจะทำงานเมื่อมีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าที่ความเร็วต่ำเพื่อเตือนผู้ใช้ถนน เช่น คนเดินเท้า ผู้พิการทางสายตา และผู้ขับขี่จักรยานหรือจักรยานยนต์ เป็นต้น ให้ทราบว่ามียานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีความจำเป็นต่อความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ถนน โดยกำหนดให้เสียงเตือนมีเสียงใกล้เคียงกับเสียงที่เกิดจากเครื่องยนต์ทำงาน และเสียงเตือนจะดังขึ้นเมื่อรถเคลื่อนที่เร็วขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1-7

ตารางที่ 1-7 เกณฑ์ระดับเสียงสัญญาณที่ระดับความเร็วต่างๆ

ความเร็ว	ระดับเสียงสัญญาณ
0 - 10 กม./ชม.	50 dB
10 - 20 กม./ชม.	56 dB

มากกว่า 20 กม./ชม.	ไม่ต้องมีเสียงเตือน
เคลื่อนที่ถอยหลัง	47 dB

- 5) **ข้อกำหนด UNECE Regulation No.101** ซึ่งเป็นข้อกำหนดการวัดการปลดปล่อยมลพิษและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และ/หรือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและระยะทางวิ่งด้วยไฟฟ้าสูงสุดสำหรับ ยานยนต์ไฟฟ้าประเภท M และ N โดยการทดสอบจะทำในห้องปฏิบัติการบน Chassis Dynamometer และยานยนต์จะถูกขับขึ้นตามรูปแบบการวิ่ง New European Driving Cycle (NEDC) ซึ่งเป็นการจำลอง การขับขึ้นยานยนต์ในเขตเมืองและนอกเมือง ดังแสดงในรูปที่ 1-24



รูปที่ 1-24 ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ [19]

นอกจากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น องค์กรกำหนดมาตรฐานในระดับสากล เช่น ISO IEC UL และ SAE เป็นต้น ได้กำหนดมาตรฐานของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น สายไฟ อุปกรณ์แปลงผกผันพลังงาน (Inverter) อุปกรณ์แปลง ผันพลังงาน (Converter) รวมทั้งการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการผลิตและ เพื่อสร้างความมั่นใจในการใช้งาน ซึ่งมาตรฐานในระดับสากลดังกล่าวมีการนำไปใช้อ้างอิงในหลายประเทศรวมถึง ประเทศไทยด้วย

1.4 เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency (2016). Global EV Outlook 2016 – Beyond one million electric cars. IEA Publications, May 2016, France.
- [2] GIZ (2012), Urban Transport and Energy Efficiency.

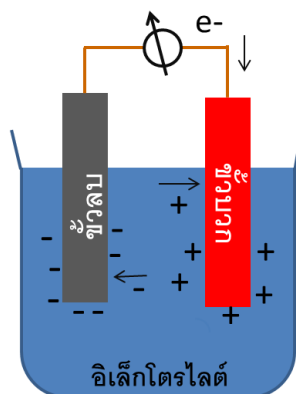
- [3] Jeef Desjardins (2016). Tesla's Rise Has Inspired a Dozen New Electric Vehicle Rivals [online]. <http://www.visualcapitalist.com/teslas-rivals-inspired-dozen-new-ev-companies/>.
- [4] Mackay Miller, Insights into U.S. EV Market Evolution, EVI Workshop, 4 May 2015, Goyang, Korea.
- [5] Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan.
- [6] Kenichiro Yoshida, Government Initiative for Promoting EVs, EVTEEC & APE Japan 2014, 24 May 2014, Tokyo.
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/New_energy_vehicles_in_China.
- [8] <http://wattev2buy.com/chinese-electric-vehicle-brands-assembly-plants/>
- [9] An, Feng (2016). China's NEV Policies and Market Development, Industrial Upgrading and Economic Growth in China Conference, Ann Arbor, Michigan, 21 Oct 2016.
- [10] ARAI, Latest trends in EV/HEV development and standardisation in India, 3rd AAI Summit, 3rd – 4th December 2014, Bangkok.
- [11] Indonesia National EV Team, Status and program of R&D of national EV prototype, 3rd AAI Summit, 3rd – 4th December 2014, Bangkok.
- [12] MIROS, Driving EV Innovation in the Age of Experience, 3rd AAI Summit, 3rd – 4th December 2014, Bangkok.
- [13] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการพัฒนาระบบนวัตกรรมของประเทศ (คพน.) เมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2558
- [14] Mark Kuhn (2012), Automotive Powertrain Technologies through 2016 and 2025, Ricardo Strategic Consulting.
- [15] http://www.baanjomyut.com/library/thaicar_history/05.html
- [16] <http://oldautonews.com/baker-electric-car-company>
- [17] Shinohara, M. (2009), Technology Development and Future of Nissan's EV.
- [18] http://www.mitsubishimotors.com/publish/pressrelease_en/products/2009/news/detail1940.html
- [19] United Nations (2013), Regulation No.101 Revision 3.

บทที่ 2

เทคโนโลยีแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

2.1 บทนำ และ ประเภทแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

แบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สำคัญชิ้นหนึ่งของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้ากักเก็บพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน โดยส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ประกอบด้วยส่วนหลักสามส่วนคือ ขั้วบวก (แคโทด) ขั้วลบ (แอโนด) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งาน ขั้วลบหรือขั้วแอโนดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาเคมีส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) และขั้วบวกหรือขั้วแคโทดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาเคมีที่รับอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดักชัน) โดยอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะวิ่งผ่านลวดโลหะก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยอิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายที่ไม่นำอิเล็กตรอน แต่มีหน้าที่ส่งผ่านไอออนที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าแบตเตอรี่จะหมด ดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ภาพหลักการทำงานของแบตเตอรี่

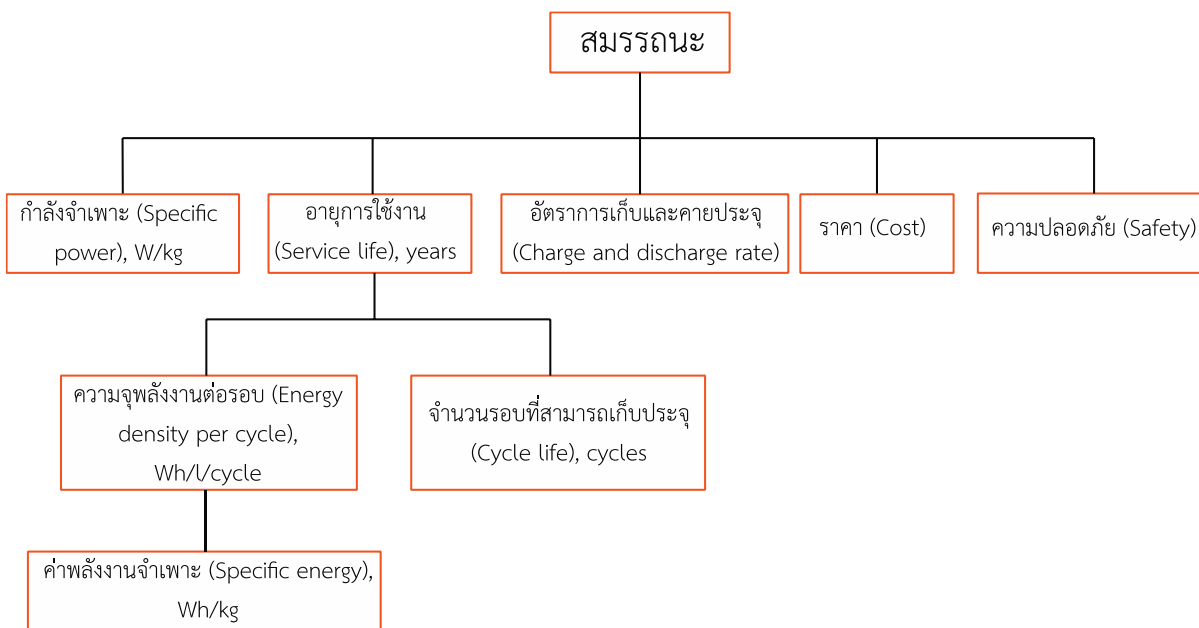
เมื่อพิจารณาประเภทของแบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง หรือ แบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ (Primary batteries)
2. แบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ หรือ แบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (Rechargeable batteries)

โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าจะเป็นแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของขั้วแคโทดและแอโนดที่แตกต่างกันหลายประเภท ดังจะได้นำกล่าวต่อไป

การวัดสมรรถนะของแบตเตอรี่สามารถวัดได้หลายมิติ โดยมิติที่สำคัญได้แก่ กำลังจำเพาะ (Specific power, W/kg) อายุการใช้งาน (Service life) อัตราการเก็บและคายประจุ (Charge and discharge rate) ราคาและความปลอดภัย (Cost and safety) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขึ้นกับความจุ (Capacity, Ah) และจำนวนรอบที่สามารถเก็บประจุ (Charge cycles) ซึ่งค่าความจุจะขึ้นกับค่าพลังงานจำเพาะ (Specific energy, Wh/kg)

หรือค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy density, Wh/l) ดังนั้นองค์ประกอบในการพิจารณาสมรรถนะของแบตเตอรี่จึงเขียนได้ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 สมรรถนะแบตเตอรี่ในมิติต่างๆ [1]

นอกจากนี้ คำจำกัดความอื่นๆ ที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้

1. C-rate (Charge rate) ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการอัดประจุหรืออัตราการจ่ายไฟของแบตเตอรี่เทียบกับปริมาณความจุของแบตเตอรี่ที่เต็ม โดย

(h)C หมายถึง แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสออกไปโดยใช้เวลา 1/h ชั่วโมงกว่าจะหมด หรือแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยอัตรากระแสที่ทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 1/h ชั่วโมง ตัวอย่างเช่น

1C หมายถึง แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสออกไปโดยใช้เวลา 1 ชั่วโมงกว่าจะหมด หรือแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยอัตรากระแสที่จะทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 1 ชั่วโมง

2C หมายถึง แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสออกไปโดยใช้เวลา 1/2 ชั่วโมงกว่าจะหมด หรือแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยอัตรากระแสที่จะทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 1/2 ชั่วโมง

C/4 หมายถึง แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสออกไปโดยใช้เวลา 4 ชั่วโมงกว่าจะหมด หรือแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยอัตรากระแสที่จะทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 4 ชั่วโมง

2. DOD (Depth of discharge) ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณความจุที่แบตเตอรี่ถูกใช้ไปเทียบกับความจุทั้งหมด เช่น

10% DOD หมายถึง แบตเตอรี่ถูกใช้งานไป 10% และเหลือความจุอยู่ 90%

80% DOD หมายถึง แบตเตอรี่ถูกใช้งานไป 80% และเหลือความจุอยู่ 20% เป็นต้น

โดยการใช้งานแบตเตอรี่ในงานแต่ละประเภท DOD ที่แบตเตอรี่ต้องเจอบ่อยๆ นั้นจะอยู่ในระดับที่ไม่เท่ากัน เช่นในยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ขับเคลื่อนทั้งหมด DOD จะอยู่ระหว่าง 20% ในขณะที่รถประเภทไฮบริดนั้น DOD ของแบตเตอรี่จะอยู่ที่ 40%

3. SOC (State of charge) ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณความจุที่แบตเตอรี่มีอยู่ เช่น

10% SOC หมายถึง แบตเตอรี่มีความจุอยู่ 10%

80% SOC หมายถึง แบตเตอรี่มีความจุอยู่ 80%

โดยการใช้งานแบตเตอรี่ในงานแต่ละประเภท SOC ที่แบตเตอรี่ต้องเจอบ่อยๆ นั้นจะอยู่ในระดับที่ไม่เท่ากันเช่นเดียวกับ DOD เช่นยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ขับเคลื่อนทั้งหมด SOC จะอยู่ระหว่าง 20-95% ในขณะที่รถประเภทไฮบริด นั้น SOC ของแบตเตอรี่จะอยู่ที่ระดับ 40-80%

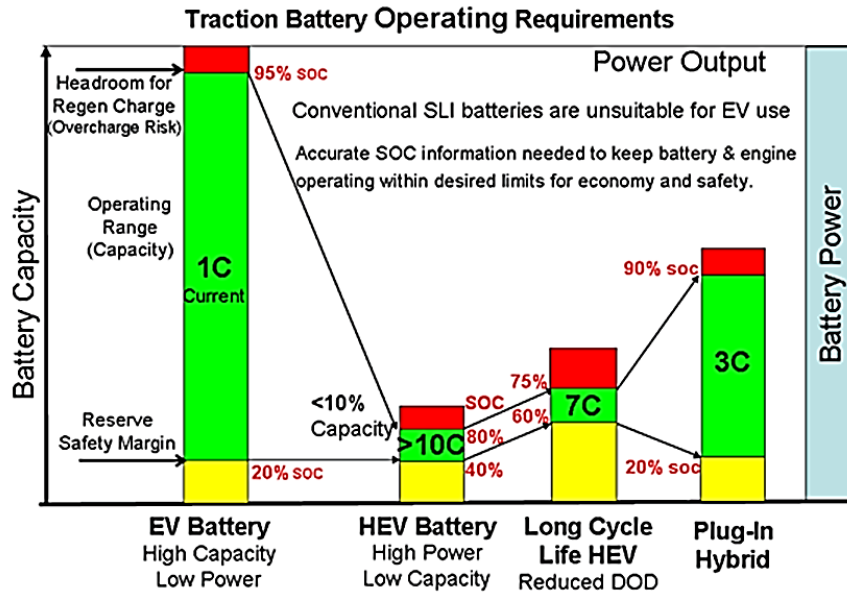
4. P/E Ratio (Power to Energy Ratio) ซึ่งบ่งบอกถึงกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ให้ได้เทียบกับความจุของพลังงานทั้งแบตเตอรี่ เช่น

$P/E = 2:1$ ของแบตเตอรี่ 1 kWh หมายความว่า แบตเตอรี่จะมีศักยภาพในการให้กำลังไฟฟ้าเป็น 2 kW

$P/E = 1:3$ ของแบตเตอรี่ 1 kWh หมายความว่า แบตเตอรี่จะมีศักยภาพในการให้กำลังไฟฟ้าเป็น 1/3 kW

ทั้งนี้แบตเตอรี่ที่มีค่า P/E ratio สูงจะเรียกแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็น High power battery ซึ่งมักจะถูกใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงเป็นช่วงสั้นๆ เช่น ใช้สำหรับการติดเครื่องยนต์ หรือสำหรับการเร่งเครื่องยนต์ เท่านั้นแต่ไม่ใช่เป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อน

การใช้งานแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ นั้นจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2-3 โดยแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ จะมีความแตกต่างกันในด้านต่างๆ เช่น วัสดุที่ใช้สร้างแบตเตอรี่ โครงสร้างของแบตเตอรี่ ความจุประจุและค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ชนิดนั้นๆ รวมไปถึงลักษณะการใช้งาน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ หรือปริมาณไฟที่ถูกใช้ไป หรืออัตราการอัดประจุ (C-rate) หรือปริมาณประจุของแบตเตอรี่ (SOC) ณ ขณะนั้น ส่วนอายุการใช้งานแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน ความรวดเร็วในการดึงพลังงานไปใช้ (Load level) ชนิดและลักษณะอนุภาคของส่วนประกอบขั้ว ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ และ %DOD เป็นต้น



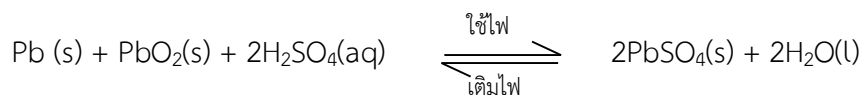
รูปที่ 2-3 คุณลักษณะด้าน C-rate, SOC และ %DOD ของแบตเตอรี่ที่จำเป็นสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ [2]

ในช่วงปี ค.ศ. 1880 การใช้แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเกิดขึ้นประมาณ 20 ปี หลังจากการค้นพบแบตเตอรี่กรดตะกั่วขึ้นเป็นครั้งแรก ถึงแม้ว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะได้รับความนิยมลดลงหลังจากมีการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีประสิทธิภาพสูงเพิ่มขึ้น ประกอบกับราคาของน้ำมันที่ถูกลง และระยะทางขับเคลื่อนที่ไกลขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงปี ค.ศ. 1970 พบว่ามีการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยประเภทแบตเตอรี่ที่ใช้ยังเป็นประเภทกรดตะกั่วเช่นเดิม จนกระทั่งวิวัฒนาการของแบตเตอรี่ได้รับการพัฒนาเพิ่มขึ้นอีกหลายประเภท โดยแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมสำหรับใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน ได้แก่

2.1.1 แบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว (Lead Acid Battery)

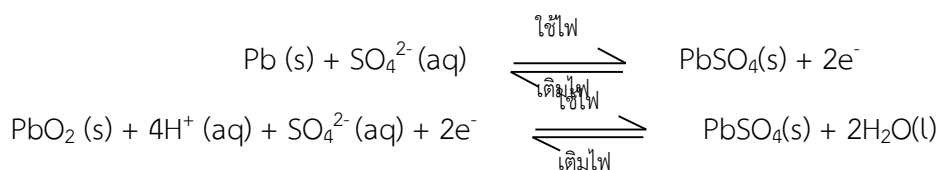
แบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วถูกคิดค้นขึ้นมาครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1859 โดย Gaston Plante และได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 19 โดยปัจจุบันเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในยานยนต์ โดยใช้เป็นแบตเตอรี่สำหรับติดเครื่องยนต์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ประเภทนี้มีราคาถูกเนื่องจากวัสดุที่ใช้สามารถหาได้ง่ายและมีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน แบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วมีขั้วลบทำจากตะกั่วที่มีลักษณะพรุน (Porous lead) ส่วนขั้วบวกเป็นตะกั่วออกไซด์ (PbO_2) ที่มีลักษณะพรุนเช่นเดียวกัน โดยมีกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเมปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นทั้งสองในระหว่างการใช้งาน (จ่ายประจุ) สามารถแสดงได้ดังนี้

ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นคือ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบคือ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกคือ



ทั้งนี้ ขณะที่ใช้งานแบตเตอรี่ Pb และ PbO₂ จะทำปฏิกิริยากับ SO₄²⁻ เกิดเป็น PbSO₄(s) ที่ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยอิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วลบวิ่งผ่านวงจรข้างนอกไปยังขั้วบวก ก่อให้เกิดไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้งาน ส่วน H⁺ จะรวมตัวกับ O₂ ที่ถูกปล่อยออกมาจาก PbO₂ กลายเป็นน้ำ ดังนั้น เมื่ออัดประจุแบตเตอรี่ ปฏิกิริยานี้จะเกิดการย้อนกลับทำให้สามารถนำแบตเตอรี่กลับมาใช้งานได้ อีก ขั้วทั้งสองนี้มีลักษณะพรุนเพื่อให้มีพื้นที่ผิวที่จะทำปฏิกิริยาซึ่งก่อให้เกิดไฟฟ้าได้มากขึ้นและส่งผลให้มีความต้านทานภายในต่ำ การปล่อยแบตเตอรี่ให้อยู่ในสถานะที่ไฟหมดเป็นเวลานานทำให้เกิดผลึก PbSO₄ ขนาดใหญ่ซึ่งไปอุดตันรูพรุนเหล่านี้ ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของขั้วเพิ่มสูงขึ้นและเกิดการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในที่สุด นอกจากนี้ บางครั้งเกิดการรวมตัวของ H⁺ เป็นก๊าซ H₂ และ O₂ เป็นก๊าซ O₂ แพร่ออกจากแบตเตอรี่ดังนั้นจึงต้องมีการเติมน้ำกลั่นอยู่เสมอเพื่อทดแทน H⁺ และ O₂ ที่เสียไป อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่สมัยใหม่นั้นไม่ต้องเติมน้ำกลั่นบ่อยครั้งเนื่องจากกล่องของแบตเตอรี่ได้ถูกออกแบบมาให้เื่ออำนวยความสะดวกในการรวมตัวของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนให้กลับตัวเป็นน้ำ (Sealed/valve regulated lead acid battery หรือ Gel battery) แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วมีความจุพลังงานต่อน้ำหนักและปริมาตรต่ำ การใช้งานในยานยนต์จึงมักใช้สำหรับการติดเครื่องยนต์ในรถยนต์ขนาดทั่วไป แต่ก็เป็นที่นิยมใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นอย่างมาก โดยแบตเตอรี่กรดตะกั่วสามารถแบ่งประเภทย่อยได้อีก 3 ประเภท [3] คือ

1. แบตเตอรี่กรดตะกั่ว สำหรับติดเครื่องยนต์ (Starting Lighting Ignition หรือ SLI Battery) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่มีสัดส่วนการใช้งานมากที่สุด โดยถูกใช้สำหรับงานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูง เป็นระยะสั้น เช่น สำหรับติดเครื่องยนต์ในรถยนต์ หรือติดเครื่องยนต์สำหรับเครื่องจักร ทั้งนี้ แบตเตอรี่สำหรับติดเครื่องยนต์จะมีอายุการใช้งานสั้น ประมาณ 1.5 - 3 ปี

2. แบตเตอรี่กรดตะกั่ว แบบ Deep cycle หรือ Traction battery ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับงานที่ต้องการมีการจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน โดยมีการใช้งานอยู่หลายประเภท เช่น สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รถกอล์ฟ รถ forklift อุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือสำหรับเก็บไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น เช่น จากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือจากกังหันลม เป็นต้น

3. แบตเตอรี่กรดตะกั่ว แบบ Stationary ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกออกแบบมาให้สามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้ต่างจากแบตเตอรี่ประเภท deep cycle โดยที่มักใช้งานในสถานะประจุถูกอัดอยู่เต็มอยู่ตลอดเวลา และมีการใช้งานเป็นครั้งคราวเท่านั้น มักใช้เพื่อการสำรอง

ไฟฟ้าเวลาฉุกเฉิน (UPS) และใช้งานอยู่กับที่ ดังนั้นความจุพลังงานต่อน้ำหนักจึงไม่มีความสำคัญเท่าแบตเตอรี่ประเภท deep cycle ที่ต้องมีการเคลื่อนที่จึงมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่นที่ความจุเดียวกัน แบตเตอรี่ชนิดนี้ได้ถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานนานกว่า 3 ปี และอาจจะใช้งานได้นานถึง 5-10 ปี

โดยสรุป แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วมีข้อดีและข้อด้อยดังต่อไปนี้

ข้อดี

- มีราคาถูกกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นและมีความซับซ้อนน้อยจึงสามารถผลิตได้ง่าย
- มีการพัฒนามานานแล้ว จึงมีความเชื่อถือได้และหาข้อมูลต่างๆ ได้ง่าย
- มีความทนทานหากใช้งานอย่างถูกต้อง
- มีระดับการคายประจุด้วยตัวเอง (Self Discharge) ต่ำ
- ไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนักโดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วแบบแห้ง
- ไม่เกิดปัญหา Memory Effect
- สามารถคายประจุ (Discharge) ได้มาก
- มีขนาดให้เลือกหลากหลาย

ข้อด้อย

- ความจุของพลังงานต่อน้ำหนักต่ำทำให้น้ำหนักมาก
- แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพเร็วหากไม่มีประจุ
- ตะกั่วและกรดซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม
- มีระเบียบที่เข้มงวดในการขนส่งโดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วแบบเปียก เพราะอาจเกิดการรั่วซึมของกรดออกจากแบตเตอรี่ได้

2.1.2 แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium)

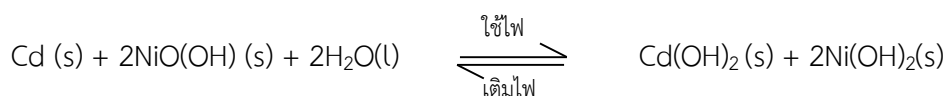
แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดอัลคาไลน์ชนิดแรก โดยชื่ออัลคาไลน์นั้นมาจากสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ซึ่งมีธาตุในหมู่อัลคาไลน์เป็นส่วนประกอบ เช่น สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ (KOH) เป็นต้น แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นที่รู้จักในนาม “ไนแคด” โดยไนแคดได้ถูกค้นพบมานานกว่าศตวรรษโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน แต่ไม่ได้นำเข้าสู่ตลาดจนกระทั่งช่วงเวลา 40 ปีที่ผ่านมา โดยข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้อยู่ที่ไม่ต้องการการดูแลรักษา เช่น การเติมน้ำกลั่น เก็บไว้ได้นานไม่ว่าจะอยู่ในสถานะที่มีประจุไฟฟ้าเต็มหรือไม่สามารถอัดประจุไฟฟ้าได้เร็ว ใช้ได้ที่อุณหภูมิต่ำและความต่างศักย์ขณะใช้งานคงที่ อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ประเภทนี้มีข้อเสียคือราคาวัตถุดิบและราคาการผลิตที่สูงกว่าแบตเตอรี่แบบกรดตะกั่วมาก อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมี Memory effect ซึ่งหมายถึงสภาวะที่แบตเตอรี่เสื่อมเนื่องจากการถูกใช้งานไม่หมดก่อนถูกอัดประจุไฟฟ้าอีกครั้งและมีความสูญเสียทางประจุไฟฟ้ามากกว่าแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว

องค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้มี ขั้วลบซึ่งเป็นแคดเมียม (Cd) ขั้วบวกเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO(OH)) โดยมีสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ (KOH) เป็นอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่แบบอัลคาไลน์

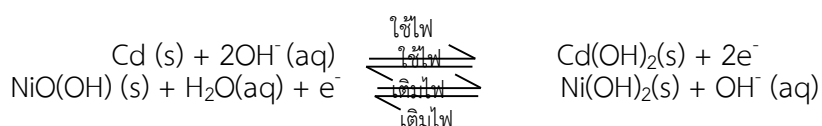
ซึ่งต่างจากแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วตรงที่อิเล็กโทรไลต์ไม่ได้ร่วมทำปฏิกิริยากับขั้วแบตเตอรี่โดยตรงเพียงแต่เป็นตัวนำไอออนเท่านั้น

ปฏิกิริยารวมแบบย่อของไนแคดคือ

ปฏิกิริยาที่ขั้วลบคือ



ปฏิกิริยาที่ขั้วบวกคือ



อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแคดเมียมเป็นสารมีพิษที่ค่อนข้างร้ายแรง การใช้งานและพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงไม่ได้รับการสนับสนุนมากนัก การพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่ในแคดจึงมีอยู่น้อยมาก

โดยสรุป แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม มีข้อดีและข้อด้อยดังต่อไปนี้

ข้อดี

- กำลังไฟสูง

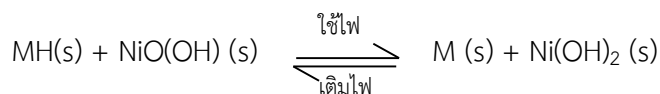
ข้อด้อย

- แคดเมียมที่ใช้เป็นส่วนประกอบ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
- มีปัญหา Memory Effect จึงไม่สามารถอัดประจุในขณะที่แบตเตอรี่ยังมีประจุ เนื่องจากจะทำให้แบตเตอรี่ไม่จดจำระดับการอัดประจุสูงสุดได้

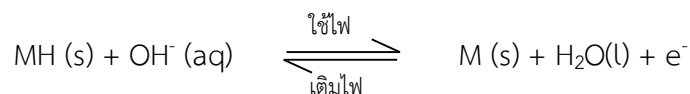
2.1.3 แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH Battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้อาศัยปฏิกิริยาเคมีที่มีขั้วลบซึ่งเป็นโลหะผสม (M) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเกิดเป็นเมทัลไฮไดรด์ได้ โดยโลหะพวกนี้มักมีตัวย่องทางเคมีอยู่ในรูปแบบของ AB₂ หรือ AB₅ เช่น ZrNi₂ หรือ LaNi₅ ส่งผลให้แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์มีความจุพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วมาก

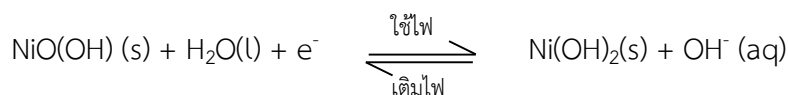
ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ



ปฏิกิริยาที่ขั้วลบคือ



ปฏิกิริยาที่ขั้วบวกคือ



การพัฒนาด้านอายุการใช้งานและความปลอดภัยทำให้แบตเตอรี่แบบนิเกิล-เมทัลไฮไดรด์ได้ถูกนำไปใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดในยุคแรกๆ ที่ผลิตโดยบริษัท โตโยต้า จำกัด ซึ่งพัฒนาร่วมกับบริษัท Panasonic EV Energy จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทลูกของบริษัท พานาโซนิค จำกัด อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กเนื่องจากราคาแพงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว ในขณะที่ประสิทธิภาพโดยรวม เช่น ความจุพลังงาน อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษา นั้นยังคงด้อยกว่าแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนซึ่งขณะนี้ เป็นแบตเตอรี่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด เนื่องจากแบตเตอรี่ประเภทนิเกิล-เมทัลไฮไดรด์ จะเสื่อมสภาพหากไม่ถูกใช้งาน

โดยสรุป แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-เมทัลไฮไดรด์ มีข้อดีและข้อด้อยดังต่อไปนี้

ข้อดี

- กำลังไฟสูง
- ใช้เมทัลไฮไดรด์ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- มีความหนาแน่นพลังงานหรือค่าพลังงานต่อน้ำหนักสูง
- อายุการใช้งานนาน มีจำนวนวัฏจักรการอัดประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) สูง

ข้อด้อย

- ราคาค่อนข้างสูง
- มีปัญหา Memory Effect จึงไม่สามารถอัดประจุในขณะที่แบตเตอรี่ยังมีประจุ เนื่องจากจะทำให้แบตเตอรี่ไม่จดจำระดับการอัดประจุสูงสุดได้

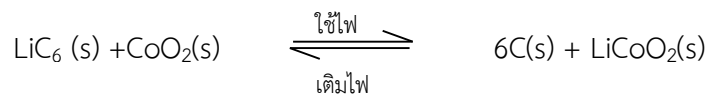
2.1.4 แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน (Li-ion Battery)

เนื่องจากข้อจำกัดทางความจุพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ ข้างต้น การพัฒนาแบตเตอรี่จึงมุ่งไปสู่การคิดค้นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยลิเทียมมีข้อได้เปรียบกว่าสารที่ใช้ในแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ ในด้านพลังงานต่อน้ำหนักเนื่องจากลิเทียมเป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบาเกือบที่สุดในตารางธาตุและมีค่าความเสถียรต่ำซึ่งทำให้

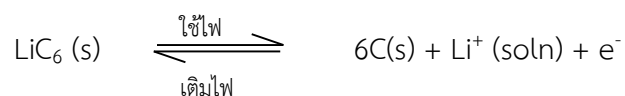
แบตเตอรี่ประเภทนี้มีค่าความต่างศักย์และความจุพลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทอื่นๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนยังไม่มีปัญหาเรื่อง memory effect อีกทั้งยังมีความสูญเสียทางประจุไฟฟ้าต่ำในขณะไม่ใช้งาน ทั้งนี้ บริษัท Sony จำกัด ได้นำเสนอแบตเตอรี่ชนิดนี้ออกสู่ตลาดเมื่อปี ค.ศ. 1991 [4] และภายในระยะเวลาอันสั้นความต้องการของตลาดได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการใช้งานสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพา แม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะใช้ได้ไม่ดีเทียบเท่ากับแบตเตอรี่ประเภทไนแคดหรือนิกเกิล-เมทัลไฮไดรตในช่วงอุณหภูมิต่ำและค่ากำลังต่อน้ำหนักและปริมาตรจะไม่สูงนักก็ตาม ในปัจจุบันส่วนแบ่งตลาดของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีมากที่สุดในกลุ่มของแบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ทั้งหมด [5]

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนในปัจจุบันใช้ LiCoO_2 โลหะออกไซด์อื่นๆ หรือสารประกอบฟอสเฟตเช่น LiMn_2O_4 (LMO), LiNiO_2 (LNO), Li-Mn-Ni-Co-O_2 (NMC), LiFePO_4 เป็นขั้วบวกและคาร์บอนเป็นขั้วลบ มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของเกลือที่มี Li^+ เป็นส่วนประกอบเป็นอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดนี้เกิดจากการแพร่ของ Li^+ จากขั้วลบที่มีพลังงานศักย์ทางเคมีสูงไปยังขั้วบวกซึ่งมีพลังงานศักย์ต่ำกว่า หากแต่การแพร่ของสารนั้นจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อประจุรวมของสารที่แพร่ทั้งหมด (ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) มีค่าเป็นกลาง เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ไม่สามารถเป็นสื่อนำอิเล็กตรอนได้ การแพร่ของ Li^+ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีวงจรภายนอกต่อให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ก่อให้เกิดไฟฟ้าที่เราสามารถนำไปใช้ได้

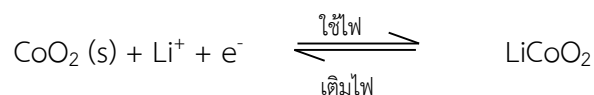
ตัวอย่างปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบคือ

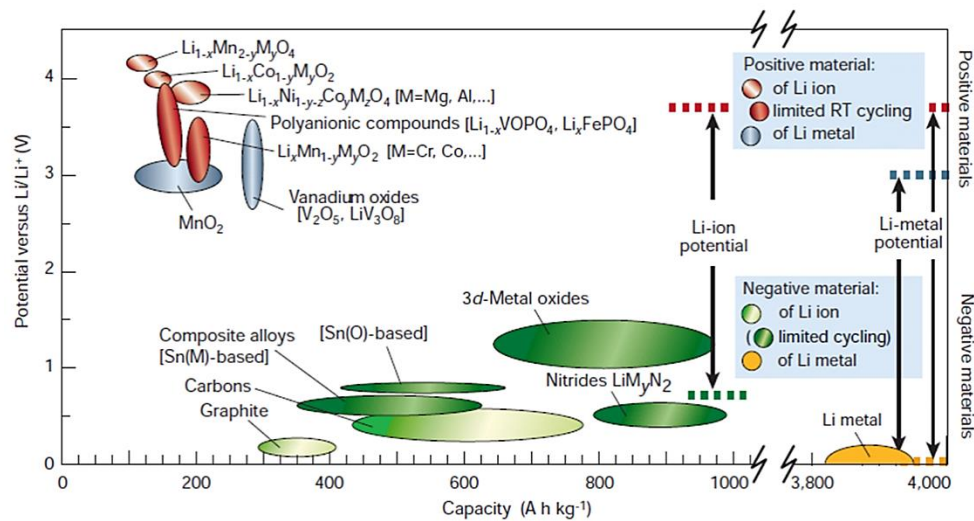


ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกคือ

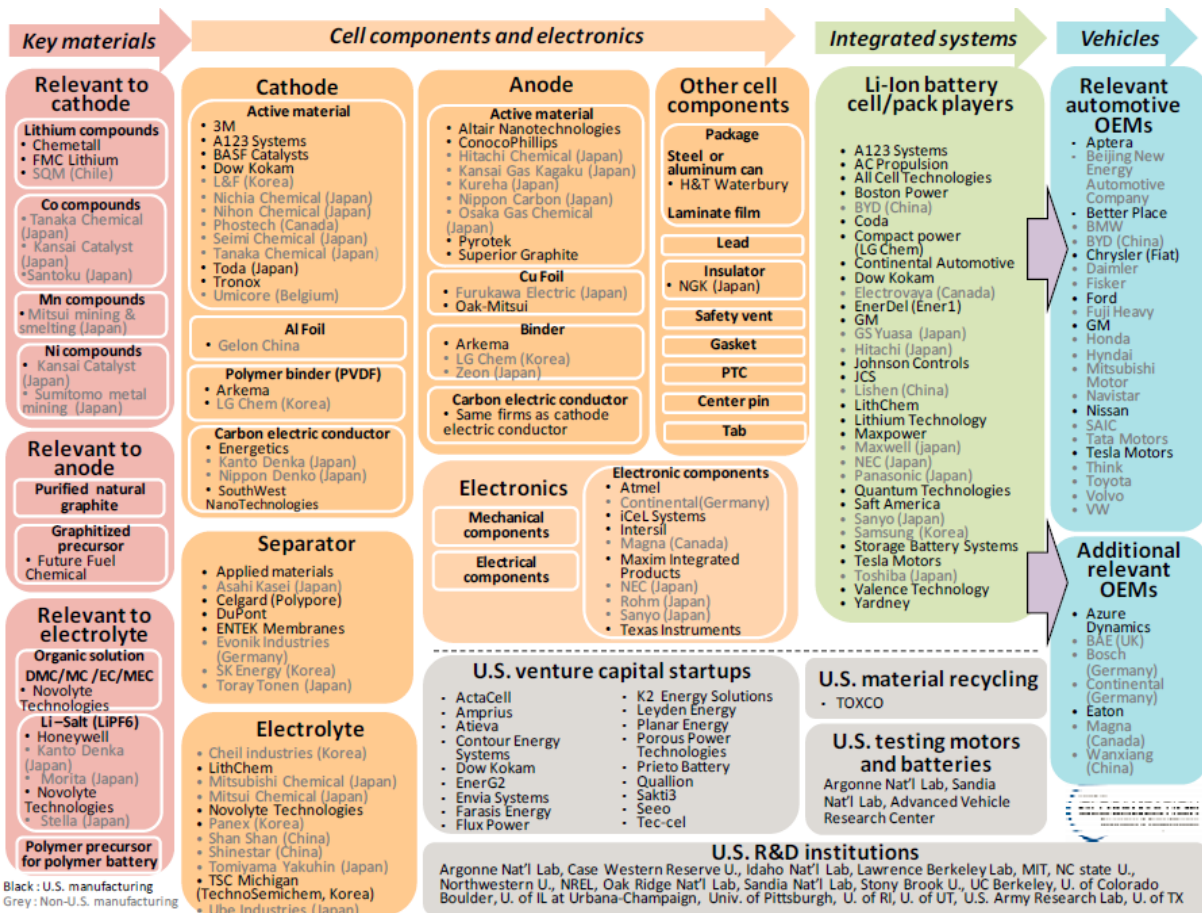


นอกจากนี้นักวิจัยได้พัฒนานำวัสดุชนิดใหม่มาใช้ในส่วนต่างๆ ของแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน เช่น Li-Mn-Ni-Co-O_2 ใช้เป็นวัสดุสำหรับขั้วบวกและ Metal-based oxide หรือวัสดุประเภท โลหะ เช่น ดีบุก (Sn) หรือซิลิกอน (Si) เพื่อใช้เป็นขั้วลบแทนที่คาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 2-4 ควบคู่ไปกับการค้นคว้าพัฒนา

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมกับช่วงชนิดใหม่ เพื่อพัฒนาแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและราคาถูกลง
 ทั้งนี้ หากพิจารณากระบวนการผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน พบว่ามีส่วนประกอบที่ค่อนข้างซับซ้อนและมี
 ผู้ประกอบการสำคัญอยู่ในทุกขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-4 ประเภทของแอโนด (สีเขียว) และแคโทดสำหรับแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน [6]



รูปที่ 2-5 ผู้ประกอบการสำคัญต่างๆ ในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน [7]

การค้นหาวัดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากจะช่วยพัฒนาประสิทธิภาพการนำไปใช้ต่อในรถยนต์หรือโทรศัพท์มือถือ แบตเตอรี่ที่ดีจะต้องมีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนประจุลิเทียมให้แก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว ยิ่งแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพมากเท่าไร ลิเทียมไอออนก็จะสามารถเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วระหว่างรอบการอัดประจุแต่ละครั้งได้มากขึ้น ปัจจุบันแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนใช้กราไฟต์ ซึ่งพัฒนามาจากคาร์บอนเพื่อทำเป็นขั้วลบ โดยแต่เดิมนั้นนิยมใช้ขั้วลบที่ทำมาจากซิลิกอนมากกว่าเนื่องจากมีความจุไฟฟ้ามากกว่าประเภทที่ทำจากกราไฟต์ถึง 10 เท่า อย่างไรก็ตามขั้วลบที่ทำจากกราไฟต์นั้นมีความเสถียรมากกว่า [8]

ถึงแม้แบตเตอรี่ลิเทียมจะได้รับความนิยมใช้กับอุปกรณ์หลากหลายรูปแบบ แต่อายุการใช้งานก็ยังน้อยเกินไป โดยปัญหา การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นมาจากส่วนประกอบหลัก คือ ขั้วลบ (anode) โดยในแต่ละรอบการประจุไฟ ใหม่ นั้น ขั้วลบจะมีการพองและยุบตัวสลับกันไปมา เมื่อมีการพองและยุบตัวจากรอบการประจุหลายๆ ครั้ง ก็จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ตัวขั้วลบ จนกระทั่งรอยแตกดังกล่าวขยายใหญ่จนแยกออกจากกัน ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้ ทั้งนี้ Scott White นักวิจัยจากมหาวิทยาลัย Illinois ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำเสนอโครงการวิจัยที่จะทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เมื่อขั้ว

ช่วยลบล้างการแตกกร้าว โดยวิธีการที่ถูกนำมาใช้คือ การนำเม็ดพลาสติกขนาดเล็ก หรือที่เรียกว่า microsphere ที่มีการผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษใส่เข้าไปในชั้นกราฟต์ของขั้วลบในระหว่างขั้นตอนการผลิต หลังจากนั้นเมื่อแบตเตอรี่ลิเทียมกึ่งตันดังกล่าวมีการใช้งานไปจนถึงระยะเวลาที่ขั้วลบจะเกิดการรอยแตก ชั้นเคลือบพลาสติกดังกล่าวก็จะแตกออก และโลหะที่เป็นอัลลอยเหลวจะไหลออกมาประสานช่องว่างที่เกิดขึ้นบนรอยแตกของขั้วลบ ทำหน้าที่เป็นเสมือนสะพานให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลข้ามผ่านไปได้ นอกจากนี้ Scott White ยังได้นำเสนอวิธีการช่วยบรรเทาอาการแบตเตอรี่ระเบิดอันเกิดจากการลัดวงจรอีกด้วย โดยการใช้เม็ดพลาสติกที่ทำจากโพลีเอทิลีน (polyethylene) ฝังไว้ทั้งในส่วนของขั้วแบตเตอรี่และภายในวงจรของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่เกิดการลัดวงจรจนกระทั่งมีความร้อนสะสมถึงระดับ 105 องศาเซลเซียส ตัวเม็ดโพลีเอทิลีนที่ฝังอยู่ก็จะละลายไปเคลือบในส่วน of แผงวงจร ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลเข้าสู่แผงวงจรได้ ทำให้ไม่เกิดความร้อนสะสม และช่วยระงับการเกิดระเบิดของแบตเตอรี่ได้ [9]

นอกจากนี้ บริษัท Leyden Energy ได้พัฒนาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดใหม่ที่มีความหนาแน่นของพลังงาน 225 วัตต์-ชั่วโมง ต่อกิโลกรัม หรือเกือบสองเท่าของแบตเตอรี่ลิเทียมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งมักจะมี ความหนาแน่นพลังงานน้อยกว่า 120 วัตต์- ชั่วโมงต่อกิโลกรัม แบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้กราฟต์เป็นตัวเก็บกระแสไฟฟ้า และมีโซเดียมไฮไดรไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ โดยเหตุผลที่ใช้กราฟต์เป็นตัวเก็บกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการเก็บกระแสไฟฟ้าแบบเดิมนั้น อะลูมิเนียมจะถูกกัดกร่อนด้วยโซเดียมไฮไดรไรด์ ความหนาแน่นพลังงานในแบตเตอรี่ยังคงเป็นปัญหาต่ออุตสาหกรรมยานยนต์อยู่มาก เนื่องจากอุตสาหกรรมยานยนต์ รวมไปถึงผู้ผลิตแบตเตอรี่ และผู้ใชยานยนต์เอง ต้องการแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นพลังงานสูง แต่ขณะเดียวกันแบตเตอรี่ที่พวกเขาต้องการก็ต้องมีขนาดเล็กด้วย และที่สำคัญต้องไม่เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายของยานพาหนะ (ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนยังมีราคาค่อนข้างสูง) ถ้าเทคโนโลยีนี้สามารถพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานได้จริงก็ถือเป็นข่าวดีในวงการยานยนต์ไฟฟ้าเลยทีเดียว [10]

ในปัจจุบันแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนนิยมนำมาใช้ในการเก็บและให้พลังงานในยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อจำกัดเรื่องช่วงเวลาในการใช้งานและการประจุไฟ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าใหม่นานและให้พลังงานไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้นหลายปีที่ผ่านมาจึงได้มีการวิจัยพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดใหม่ที่จะใช้ทดแทนแบตเตอรี่ประเภทเดิม เช่น การพัฒนาแบตเตอรี่ประเภทลิเทียม-แอร์ (Lithium-air) แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถเพิ่มช่วงเวลาการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากความหนาแน่นพลังงานสูง โดยตามทฤษฎีแล้ว จะเทียบเท่ากับความหนาแน่นพลังงานของน้ำมันเชื้อเพลิง

แบตเตอรี่ประเภทลิเทียม-แอร์ ถูกพัฒนาขึ้นที่ Massachusetts Institute of Technology หรือ MIT โดย Ming Au นักวิทยาศาสตร์จาก Savannah River National Laboratory นักวิจัยประเมินว่า แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถอยู่ได้นานกว่าแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนประมาณ 5 – 10 เท่า ที่น้ำหนักเท่ากันและให้พลังงานเป็น 2 เท่าในปริมาตรเดียวกัน โดยแบตเตอรี่ประเภทลิเทียม-แอร์ ประกอบด้วยประจุบวกที่ทำมาจาก ลิเทียมและประจุลบที่มาจากวัสดุที่มีรูพรุนทำหน้าที่สร้างออกซิเจนจากอากาศโดยรอบ เมื่อลิเทียมรวมตัวกับออกซิเจนจะเกิดเป็นลิเทียมออกไซด์และปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งออกซิเจนนี้ไม่จำเป็นต้องเก็บในแบตเตอรี่ ขั้วลบนี้นับว่าแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนทำให้แบตเตอรี่ประเภทลิเทียม-แอร์มีความหนาแน่นพลังงานสูง

จากผลการวิจัยได้พิสูจน์ว่าความหนาแน่นกระแสของแบตเตอรี่แบบลิเทียม-แอร์ มีค่า 600 mAh/g ซึ่งมากกว่าค่าหนาแน่นกระแสของแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 ถึง 150 mAh/g แต่ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ จำนวนครั้งในการอัดประจุใหม่ ซึ่งสามารถอัดประจุได้เพียงประมาณ 50 ครั้ง โดยปัญหาสำคัญของการอัดประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่แบบลิเทียม-แอร์นี้คือการที่ต้องเปลี่ยนลิเทียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นให้กลับไปเป็นลิเทียม ซึ่งในปัจจุบันนักวิจัยสามารถเปลี่ยนได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ไม่สามารถนำมาใช้กับกรณีนี้ได้เนื่องจากลิเทียมออกไซด์นี้ถูกสร้างภายในแบตเตอรี่ และยิ่งกว่านั้นนักวิจัยจะต้องเผชิญกับปัญหาในกระบวนการอัดประจุและการเอาน้ำออกจากออกซิเจน ที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของลิเทียมกับน้ำ

นักวิจัยจาก MIT ได้คิดค้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบใหม่ที่มี น้ำหนักเบา ราคาถูกโดยคาดว่าจะมีราคาถูกกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมในปัจจุบันถึงครึ่งหนึ่ง และที่สำคัญสามารถอัดประจุใหม่ได้ อย่างรวดเร็ว และง่ายดายเช่นเดียวกับการเติมก๊าซเชื้อเพลิงในปัจจุบัน เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่แบบ semisolid flow ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 'Cambridge crude' — a black, gooey substance that can power a highly efficient new type of battery. A prototype of the semi-solid flow battery is seen behind the flask." โดย Dominick Reuter [11]

โดยสรุป แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน มีข้อดีและข้อด้อยดังต่อไปนี้

ข้อดี

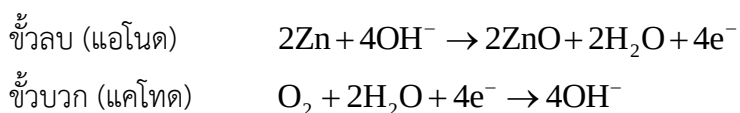
- มีค่าพลังงานต่อน้ำหนักสูง
- ไม่มีปัญหา Memory Effect
- มีอัตราการคายประจุตามธรรมชาติเมื่อไม่ได้ใช้งาน (Self Discharge) ต่ำกว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่น

ข้อด้อย

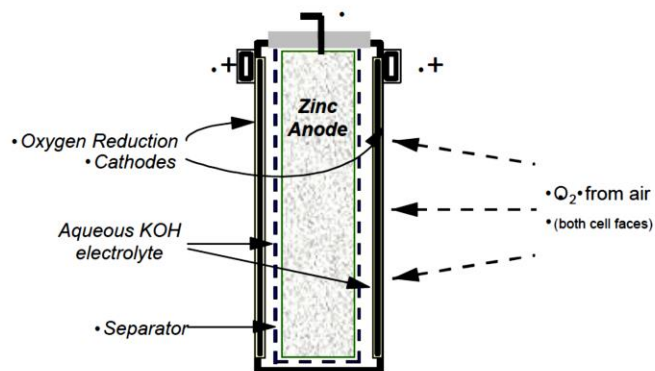
- อายุการใช้งานค่อนข้างสั้น
- ความต้านทานภายในเซลล์ (Cell Internal Resistance) จะเพิ่มขึ้นตามรอบการอัดประจุ และตามอายุของแบตเตอรี่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการคายประจุลดลงเรื่อยๆ
- ต้องมีอุปกรณ์และโครงสร้างด้านความปลอดภัย จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนไม่ทนทานเท่ากับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม หรือนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์

2.1.5 แบตเตอรี่ประเภทเมทัล-แอร์ (Metal-Air Battery)

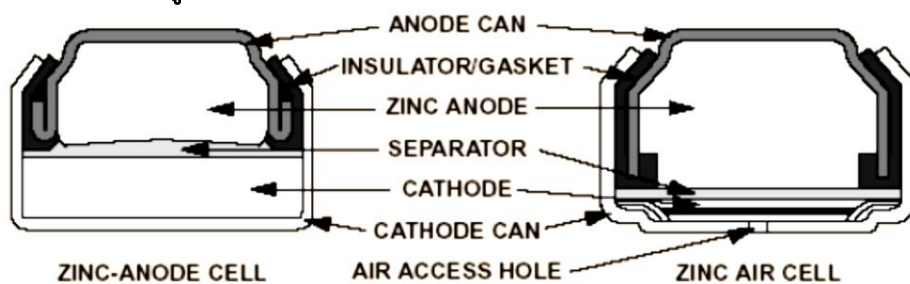
แบตเตอรี่ประเภท Metal-Air ถูกพัฒนามาอย่างยาวนานตั้งแต่ช่วงทศวรรษที่ 1960 เนื่องจากในทางทฤษฎีแบตเตอรี่ประเภทนี้มีค่าความหนาแน่นพลังงานสูง ทั้งนี้ความพยายามในการพัฒนาแบตเตอรี่ประเภท Metal-air เพื่อใช้ในยานยนต์มีมาตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ. 1979 [12] ไม่ว่าจะเป็น Li-Air, Mg-Air, Al-Air หรือ Zn-Air แต่จนถึงปัจจุบันมีเพียงแบตเตอรี่ Zn-Air เท่านั้นที่ได้รับการพัฒนาและทดสอบจริงกับยานยนต์ไฟฟ้า โดยข้อได้เปรียบของแบตเตอรี่ Zn-Air ในระหว่างใช้งานสามารถแสดงได้ดังนี้



ในทางทฤษฎีแบตเตอรี่ประเภท Zn-Air มีความหนาแน่นพลังงานสูงถึง 1,330 Wh/kg [12] โดยโครงสร้างของแบตเตอรี่ Zn-Air ดังแสดงในรูปที่ 2-7 [13] ในระหว่างการคายประจุสังกะสีที่แอโนดจะทำปฏิกิริยาเกิดออกไซด์ของสังกะสีและที่ขั้วแคโทดออกซิเจนจะถูกออกซิไดซ์เป็นไฮดรอกไซด์ โดยเซลล์ประเภทนี้ต้องมีทางให้ออกซิเจนซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดผ่านเข้ามาทำปฏิกิริยาระหว่างการคายประจุดังแสดงในรูปที่ 2-8 [14] ทั้งนี้แบตเตอรี่ Zn-Air เชิงพาณิชย์มีจำหน่ายแล้ว ตัวอย่างเช่น บริษัท Energizer และ Duracell จำกัด โดยแบตเตอรี่ Zn-Air ของบริษัท Energizer จำกัด มีค่าความหนาแน่นพลังงาน 890 Wh/L และค่าพลังงานจำเพาะ 345 Wh/kg [15] ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความจุพลังงานสูงมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทอื่น สถานภาพปัจจุบันของการพัฒนาแบตเตอรี่ Zn-Air เพื่อใช้กับยานยนต์ไฟฟ้ามี 2 บริษัทที่กำลังอยู่ในขั้นตอนพัฒนา ได้แก่ บริษัท EOS Energy จำกัด [14] และ บริษัท Revolt Technology จำกัด [16]

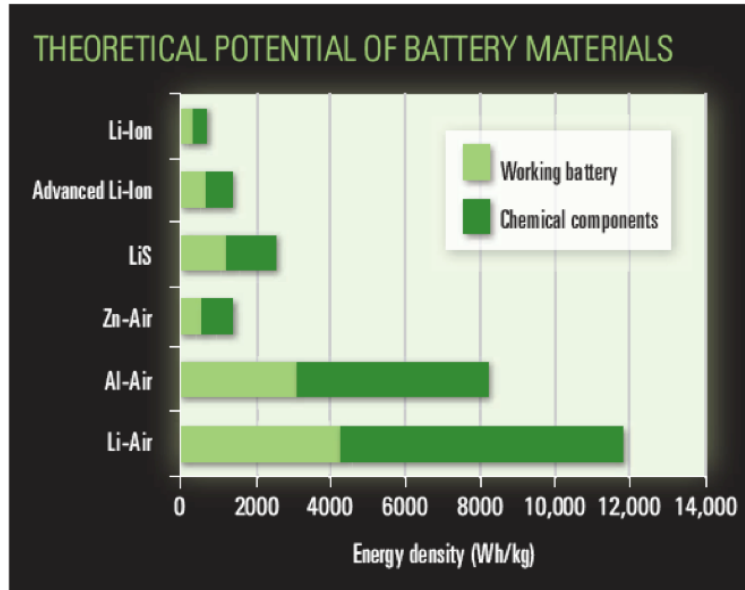


รูปที่ 2-7 โครงสร้างของแบตเตอรี่ประเภท Zn-Air [13]



รูปที่ 2-8 การเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างแบตเตอรี่ที่ใช้ Zn เป็นขั้วแอโนดและแบตเตอรี่ Zn-Air [15]

นอกจากแบตเตอรี่ประเภท Zn-Air แล้ว แบตเตอรี่ประเภท Li-Air เป็นแบตเตอรี่อีกประเภทหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจในการนำมาพัฒนาเพื่อใช้กับยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งนี้โดยทฤษฎีแล้วแบตเตอรี่ Li-Air มีความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่ Zn-Air ประมาณ 9 เท่า (ค่าความหนาแน่นพลังงานทางทฤษฎีของแบตเตอรี่ Li-Air เท่ากับ 11,148 Wh/kg) ทั้งนี้สมรรถนะของแบตเตอรี่ทั้ง 2 ประเภท สามารถเปรียบเทียบกับทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 2-9 [17] ในการพัฒนาแบตเตอรี่ Li-Air สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า บริษัท IBM จำกัด ได้ประกาศว่าจะพัฒนาแบตเตอรี่ Li-Air สำหรับขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าโดยมีเป้าหมายให้ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ 500 ไมล์ (ประมาณ 800 กิโลเมตร) ต่อการเก็บประจุ 1 ครั้งภายใต้ชื่อโครงการ Battery 500 โดยแบตเตอรี่ประเภทนี้มีค่าความหนาแน่นพลังงานทางทฤษฎีสูงถึง 1300 Wh/kg ซึ่งสถานะปัจจุบันอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา และ บริษัท IBM จำกัด คาดว่าจะสามารถพัฒนาให้ใช้ได้จริงภายในช่วงปี ค.ศ. 2020-2030 [18]



รูปที่ 2-9 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ ที่ทำได้จริงกับทางทฤษฎี [17]

โดยสรุป หากพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ ที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 2-1 พบว่ามีเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีความเหมาะสมกว่าแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว เช่น แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนซึ่งมีค่าความจุพลังงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในยานยนต์ทั้งหมด มีอายุการใช้งานนานกว่า อัตราประจุไฟฟ้าได้รวดเร็วกว่า ความต่างศักย์สูงกว่าซึ่งส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องต่อแบตเตอรี่หลายเซลล์ และต้องการการดูแลรักษาที่น้อยกว่าแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วและแบตเตอรี่ประเภทนิเกิล ทำให้แบตเตอรี่ประเภทนี้เป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบันสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าทั่วไป อย่างไรก็ตามจากรายงานของ Pike Research [19] จะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่กรดตะกั่วยังคงได้รับความนิยมสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กโดยเฉพาะรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากลักษณะของการใช้และกลุ่มผู้ซื้อซึ่งมักขับเคลื่อนในระยะใกล้ และเป็นตลาดซึ่งคำนึงถึงราคาและค่าใช้จ่ายเมื่อซื้อเป็นหลัก แม้ว่าหากคำนึงถึงระยะยาวแล้วราคาของแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนต่อจำนวนครั้งในการใช้งานจะถูกกว่าเมื่อใช้งานในเขตร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย

หากพิจารณาถึงห่วงโซ่คุณค่า (Value chain) ในอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่สำหรับขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า พบว่ากระบวนการผลิตแบตเตอรี่ประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ได้แก่

1. การผลิตชิ้นส่วนของเซลล์ เช่น ขั้วแอโนด ขั้วแคโทด เป็นต้น
2. การผลิตและการประกอบเซลล์แบตเตอรี่
3. การผลิตโมดูลแบตเตอรี่ หมายถึง การเชื่อมต่อเซลล์แบตเตอรี่เข้าด้วยกันเป็นโมดูล
4. การประกอบแพ็คเกจแบตเตอรี่ หมายถึง การติดตั้งโมดูลแบตเตอรี่เข้าด้วยกันกับระบบบริหารจัดการการอัดประจุไฟฟ้า การจ่ายประจุไฟฟ้า และการควบคุมอุณหภูมิระหว่างใช้งาน
5. การติดตั้งแพ็คเกจแบตเตอรี่เข้ากับยานยนต์ไฟฟ้า

6. การใช้งานแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้า
7. การนำกลับมาใช้ใหม่และการรีไซเคิลแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพและไม่เหมาะสมกับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า

ตาราง 2-1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ของแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า (ดัดแปลงมาจากเอกสารอ้างอิง [20])

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy density (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135	90–120
Internal resistance ¹ (mΩ)	<100 12V pack	100–200 6V pack	200–300 6V pack	150–300 7.2V	25–75 ² per cell	25–50 ² per cell
Cycle life ⁴ (80% discharge)	200–300	1000 ³	300–500 ³	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Fast-charge time	8–16h	1h typical	2–4h	2–4h	1h or less	1h or less
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. Cannot tolerate trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% ⁵	30% ⁵	<10% ⁶		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V ⁷	1.2V ⁷	3.6V ⁸	3.8V ⁸	3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75	1.00		2.50 – 3.00		2.80
Peak load current Best result	5C ⁹ 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	>3C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C	0 to 45°C		0 to 45°C ¹⁰		
Discharge temperature	–20 to 50°C	–20 to 65°C		–20 to 60°C		
Maintenance requirement	3–6 months ¹¹ (topping chg.)	30–60 days (discharge)	60–90 days (discharge)	Not required		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection common		Protection circuit mandatory ¹²		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999

หมายเหตุ :

1 ค่าความต้านทานของแพ็คแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับความจุทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (mAh) ประเภทของการต่อวงจรไฟฟ้า สายไฟ จำนวนเซลล์ ส่วน battery management system สำหรับการป้องกันเซลล์แบตเตอรี่ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะเพิ่มค่าความต้านทานประมาณ 100 mΩ

2 อ้างอิงจากเซลล์ขนาด 18650

3 อายุการใช้งาน (เป็นจำนวนครั้ง, Cycle life) จะขึ้นอยู่กับวิธีการบำรุงรักษา

4 อายุการใช้งาน (เป็นจำนวนครั้ง, Cycle life) จะขึ้นอยู่กับ Depth of discharge (DoD) หากใช้งานที่ DOD แคบๆ อายุการใช้งานจะยาวนานกว่า

5 ปริมาณการสูญเสียประจุขณะไม่ใช้งาน (Self-discharge) จะสูงที่สุดหลังจากที่ชาร์จ โดย NiCd จะสูญเสียประจุถึง 10% ใน 24 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นลดลง 10% ทุกๆ 30 วัน ปริมาณการสูญเสียประจุขณะไม่ใช้งานจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น

6 วงจรสำหรับระบบการป้องกันแบตเตอรี่ปกติแล้วจะกินพลังงานประมาณ 3% ต่อเดือน

7 ค่าความต่างศักย์จริงอยู่ที่ 1.25V แต่ค่าที่มักใช้กันทั่วไปคือ 1.2V

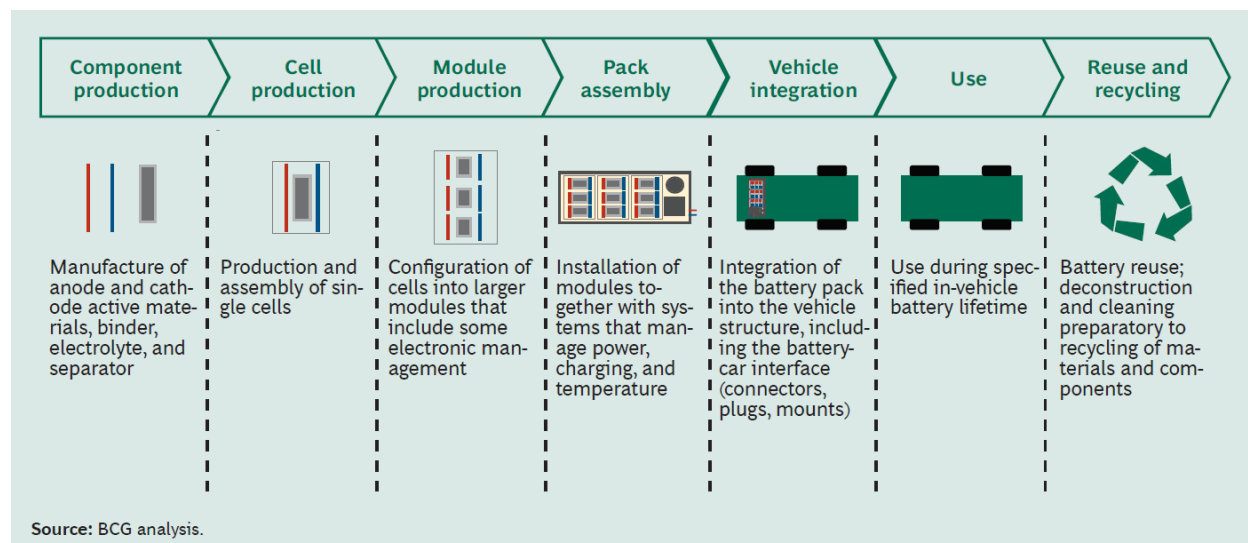
8 ค่าความต้านทานภายในก่อให้เกิดค่าความต่างศักย์ที่ลดลงเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งานกับอุปกรณ์ ดังนั้นแม้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีค่าความต่างศักย์ที่มากกว่าเช่น 3.7V and 3.8V ก็ยังสามารถใช้ได้กับงานที่ต้องการ 3.6V

9 เมื่อใช้งานแบบ pulse (ระยะการใช้งานสั้นๆ)

10 ควรระวังไม่ทำการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

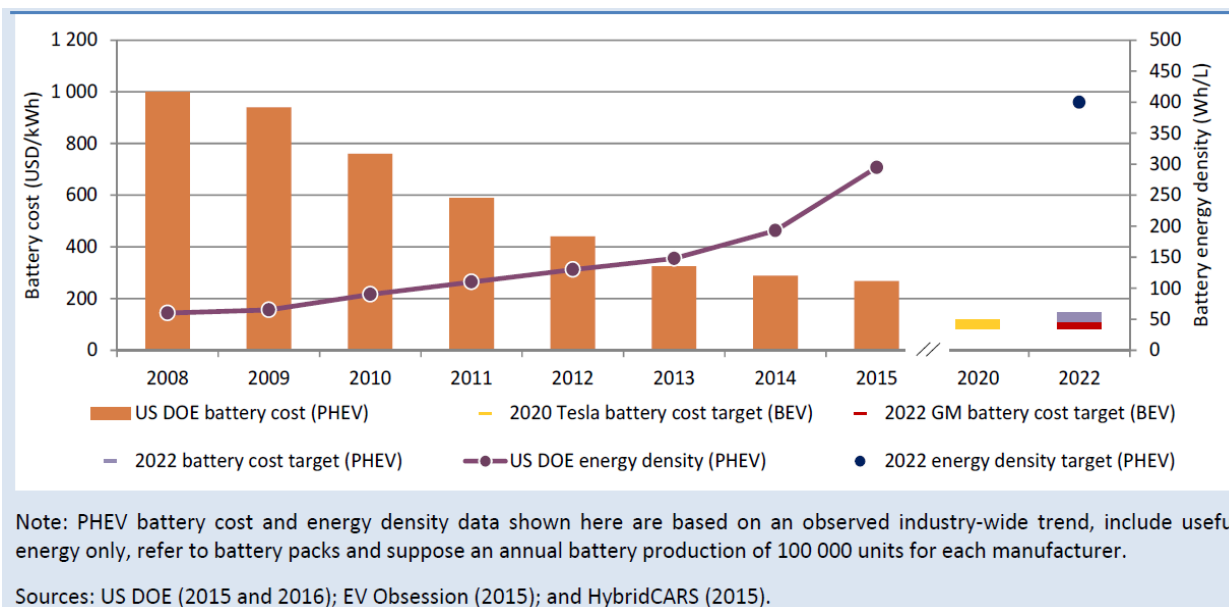
11 ประเภทของการบำรุงรักษาจะเป็นการปรับระดับความดันของเซลล์ และการชาร์จเซลล์ให้เต็มเพื่อป้องกันการเกิดการเสื่อมจากการเกิด sulfation.

12 เพื่อตัดแบตเตอรี่ไม่ให้เกิดการ over charge



รูปที่ 2-10 ห่วงโซ่คุณค่าสำหรับแบตเตอรี่สำหรับขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า [21]

ในอดีต แบตเตอรี่สำหรับขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้ามีราคาสูงถึง 1,000 เหรียญสหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (USD/kWh) อย่างไรก็ตาม การวิจัยและพัฒนาแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการขยายตัวของตลาดยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกส่งผลให้ราคาของแบตเตอรี่ลดลงอย่างมากในปัจจุบันและยังมีสมรรถนะดีขึ้นอีกด้วย ซึ่งจากข้อมูลของ Department of Energy ของประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า ในปี ค.ศ. 2008 ราคาของแบตเตอรี่สำหรับขับเคลื่อนสูงถึง 1,000 USD/kWh และปรับตัวลดลงเหลือเพียง 268 USD/kWh ในปี ค.ศ. 2015 คิดเป็นร้อยละ 73 นอกจากนี้ Department of Energy ของประเทศสหรัฐอเมริกายังคาดการณ์ว่าราคาของแบตเตอรี่ขับเคลื่อนจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการตั้งเป้าหมายราคาของแบตเตอรี่ในปี ค.ศ. 2022 เหลือเพียง 125 USD/kWh เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2-11 อย่างไรก็ตามตัวเลขดังกล่าวยังคงสูงเมื่อเทียบกับการคาดการณ์ราคาของผู้ผลิตรายอื่น เช่น บริษัท General Motors จำกัด คาดว่าราคาของแบตเตอรี่จะเหลือเพียง 100 USD/kWh ในปี ค.ศ. 2022 ในขณะที่ บริษัท Tesla จำกัด คาดการณ์ราคาของแบตเตอรี่ขับเคลื่อนจะเหลือเพียง 100 USD/kWh ในปี ค.ศ. 2020 [22]



รูปที่ 2-11 วิวัฒนาการของการพัฒนาแบตเตอรี่ด้านความหนาแน่นพลังงานและราคา [22]

2.2 การพัฒนาแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนในประเทศต่างๆ

ตลาดแบตเตอรี่ทั่วโลกมีมูลค่า 47.5 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ในปี 2009 และจะเติบโตเป็น 74 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ในปี ค.ศ. 2015 โดยมีสัดส่วนของแบตเตอรี่แบบประจุไฟฟ้าใหม่ได้ร้อยละ 76.4 และจะเพิ่มสัดส่วนเป็นร้อยละ 82.6 ในปี ค.ศ. 2015 สำหรับแบตเตอรี่แบบประจุไฟฟ้าใหม่ได้นั้น แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนมีส่วนแบ่งตลาดสูงที่สุดในกลุ่มของอุปกรณ์เคลื่อนที่ (portable devices) เช่น คอมพิวเตอร์ Notebook และ Ultra-thin Mobile เป็นต้น โดยในปัจจุบันมีผู้ผลิตเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมแบบอัดประจุใหม่ได้ (Rechargeable Lithium Battery Cell) อยู่เพียง 10 ประเทศทั่วโลก ผู้ผลิตรายใหญ่ของแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนอยู่ในประเทศญี่ปุ่น เกาหลีใต้และประเทศจีน โดยประเทศญี่ปุ่นยังเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีส่วนประเทศที่มีการผลิตมากที่สุด คือ ประเทศจีน จากรายงานของบริษัท Market Avenue & Partners ระบุว่ายอดขายแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนทั่วโลกในปี พ.ศ. 2549 อยู่ที่ 2,500 ล้านชิ้น ในปี พ.ศ. 2553 มียอดขายมากกว่า 3,000 ล้านชิ้น และในปี พ.ศ. 2549 ประเทศจีนได้กลายเป็นผู้ผลิตแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนรายใหญ่ของโลก แซงหน้าประเทศญี่ปุ่นและประเทศสหรัฐอเมริกาได้สำเร็จ ซึ่งประเทศจีนสามารถผลิตแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนได้ถึงร้อยละ 41 ของยอดรวมการผลิตทั่วโลก

2.2.1 ประเทศเกาหลีใต้

บริษัท แอลจี เค็ม (LG Chem) ของประเทศเกาหลีใต้เปิดตัวโรงงานผลิตแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก และตั้งเป้าจะเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ภายในปี ค.ศ. 2015 โดยโรงงานตั้งอยู่ที่เมืองโอซาง ทางตอนใต้ของกรุงโซล ทั้งนี้มีความสามารถผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าได้ประมาณ 100,000 คันต่อปี นอกจากนี้ บริษัทยังมีแผนที่จะสร้างโรงงานอีก 1 แห่งในประเทศเกาหลีใต้ และอีก 1 แห่งในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งจะใช้เวลาลงทุนไม่ต่ำกว่า 2 ล้านล้านวอน (ประมาณ 5.5 หมื่นล้านบาท) ซึ่งเมื่อโรงงานอีก 2 แห่งสร้างเสร็จจะทำให้ บริษัท แอลจี เค็ม สามารถผลิตแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า 350,000 คันต่อปี

บริษัท แอลจี เค็ม ตั้งเป้าจะขยายส่วนแบ่งในตลาดโลกให้ได้ถึงร้อยละ 25 ภายในปี ค.ศ. 2015 โดยขณะนี้บริษัทมีสัญญาจัดส่งแบตเตอรี่ให้กับผู้ผลิตรถยนต์หลายราย เช่น บริษัท เจเนอรัล มอเตอร์ ของสหรัฐอเมริกา บริษัท ฮุนได มอเตอร์ ของประเทศเกาหลีใต้ และบริษัทอื่นๆ อีก 8 บริษัท ซึ่งโรงงานแบตเตอรี่รถยนต์ถือเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาแหล่งพลังงานหมุนเวียนซึ่งจะเป็นตัวขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศเกาหลีใต้ต่อไป ทั้งยังคาดการณ์ว่า ตลาดแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าน่าจะเติบโตถึง 16 ล้านล้านวอน ภายในปี ค.ศ. 2015 จากปัจจุบัน 1.5 ล้านล้านวอน เนื่องจากราคาน้ำมันที่พุ่งสูงขึ้นและข้อบังคับที่เข้มงวดเกี่ยวกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยบริษัท แอลจี เค็ม คาดว่ายอดขายหน่วยแบตเตอรี่รถยนต์ของบริษัทน่าจะสูงถึง 5 ล้านล้านวอน ภายในปี ค.ศ. 2017 และหวังว่าบริษัทจะได้รับคำสั่งซื้อจากผู้ผลิตรถยนต์ในญี่ปุ่นเพิ่มขึ้นด้วย ด้านบริษัท ซัมซุง เอสดีไอ ผู้ผลิตแบตเตอรี่ให้แก่ บริษัท แอปเปิล และซัมซุง อิเล็กทรอนิกส์ ก็มีแผนจะทุ่มทุนกว่า 390,000 ล้านวอน เพื่อสร้างโรงงานผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเพิ่มอีกหลายแห่ง

2.2.2 ประเทศญี่ปุ่น

สำหรับผู้นำทางด้านเทคโนโลยีในแถบเอเชียอย่างประเทศญี่ปุ่น หลังจากได้พัฒนารถยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดโดยใช้แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ออกมาจำหน่ายกันไปแล้วนั้น ทางบริษัทโตโยต้าได้ผลิตรถยนต์ Toyota Prius รุ่นปี 2012 ซึ่งใช้ชุดแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนซึ่งทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงถึง 60 กิโลเมตรต่อการใช้น้ำมันเบนซิน 1 ลิตร ทดแทนแบตเตอรี่แบบเดิมที่เป็นแบบนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ที่ปัจจุบันให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพียง 38 กิโลเมตรต่อลิตร โดยบริษัท โตโยต้า เตรียมขยายรุ่นรถยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดและประเภทแบตเตอรี่ให้มากขึ้นเพื่อกระตุ้นยอดขายด้วยการส่งรถยนต์ไฟฟ้า Toyota Prius Plug-in Hybrid เข้าสู่ตลาดภายในปี ค.ศ. 2014 โดยปัจจุบัน บริษัท โตโยต้า ได้จำหน่ายรถยนต์ไฟฟ้า รุ่น Prius ไปแล้วมากกว่า 2 ล้านคัน นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 เป็นต้นมา โดยมียอดขายรถยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดที่เป็นรถของบริษัท โตโยต้าเองและภายใต้ยี่ห้ออื่นอย่าง Lexus ต่อปีมากกว่า 7 แสนคัน โดยบริษัทฯ ตั้งเป้ายอดขายต่อปีไว้ที่ 1 ล้านคันภายในปี ค.ศ. 2015

บริษัท Mitsubishi Heavy Industries ได้สร้างโรงงานแห่งใหม่ที่สามารถผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมในจังหวัดนาซากาจิเพื่อใช้กับรถยนต์โดยสาร รถยก และอุปกรณ์ก่อสร้าง รวมทั้งสามารถนำไปใช้สำรองไฟในบ้านร้านค้า และ โรงงาน อีกทั้งบริษัทได้รับคำสั่งซื้อจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์หลายราย และมีแผนจะสร้างโรงงานเพิ่มขึ้นอีก ด้วยงบลงทุนสูงถึงสองหมื่นล้านเยน และจะเริ่มผลิตในปี ค.ศ. 2013 เช่นเดียวกันบริษัท Sanyo Electric ประกาศว่าได้รับการติดต่อจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ที่รักษาสภาพแวดล้อม “Green Car” จำนวน 6 ราย

รวมทั้งบริษัท Volkswagen ของประเทศเยอรมนี และบริษัท Suzuki Motor จากประเทศญี่ปุ่น โดยจะใช้แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนในรถยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริด และรถยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ ทั้งนี้บริษัทจะพัฒนาให้แบตเตอรี่สามารถเก็บกำลังไฟฟ้าได้สูง โดยจะสามารถแก้ไขภาวะไฟตก และคาดว่าจะเป็นที่ต้องการของตลาด ทั้งนี้ บริษัทฯ ตั้งเป้าว่าจะครองตลาดแบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟฟ้าใหม่ได้ร้อยละ 40 ในเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2554 จึงได้ตั้งโรงงานที่จังหวัดเฮียวโกะ ซึ่งมีกำลังการผลิตเดือนละ 1.3-1.4 ล้านยูนิต [23, 24]

2.2.3 ประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเทศสหรัฐอเมริกาได้เปิดศูนย์วิจัยแบตเตอรี่ โดยบริษัทจีเอ็ม ซึ่งศูนย์วิจัยนี้เป็นศูนย์วิจัยแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์แห่งใหม่ โดยจะเป็นห้องทดสอบแบตเตอรี่ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศสหรัฐอเมริกา นอกจากนั้นยังร่วมกับมหาวิทยาลัยมิชิแกน เปิดหลักสูตรพัฒนาวิศวกรผู้เชี่ยวชาญด้านแบตเตอรี่ ในศูนย์วิจัยนี้จะมีการทดสอบเทคโนโลยีระบบสำรองไฟในแบตเตอรี่รุ่นใหม่ รวมทั้งการทดสอบแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน และแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ อีกทั้งยังทำงานร่วมกันกับศูนย์วิจัยอื่นๆ ในเครือข่ายของบริษัทจีเอ็ม ทั้งในเมืองโฮโนโลอู ฟลอริดา ในเมืองนิวยอร์ก ในเมืองวอร์เรน รัฐมิชิแกน ในเมืองทอร์แรนซ์ รัฐแคลิฟอร์เนีย และในเมืองโมนาคาสเทล ประเทศเยอรมนี บริษัท จีเอ็มเป็นบริษัทผู้ผลิตรถยนต์แห่งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาที่จะเปิดโรงงานผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเพื่อใช้กับรถยนต์เซฟโรเลต โวลต์ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ลิเทียมไอออน โรงงานผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ของบริษัทจีเอ็มจะตั้งอยู่ในรัฐมิชิแกน โดยโรงงานนี้เริ่มก่อตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2552 และเริ่มผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชุดแรกออกมาแล้วในปี พ.ศ. 2553 โดยได้ลงทุนไปกว่า 1 พันล้าน เหรียญสหรัฐ หรือประมาณ 34,965 ล้านบาท ซึ่งรถยนต์เซฟโรเลต โวลต์ และระบบเครื่องยนต์วอลเทค (Voltec) ได้เริ่มต้นการผลิตในปลายปี พ.ศ. 2553 ทั้งนี้ รถยนต์เซฟโรเลต โวลต์ สามารถวิ่งได้ระยะทาง 65 กิโลเมตร จากพลังงานไฟฟ้าที่เก็บในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และหลังจากระยะทาง 65 กิโลเมตรไปแล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าทำให้รถยนต์เซฟโรเลต โวลต์ สามารถวิ่งต่อไปได้อีกหลายร้อยกิโลเมตร ในการพัฒนาแผงแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน รูปทรงตัว “ที” (T) ขนาดกำลัง 16 กิโลวัตต์- ชั่วโมง นี้ จะมีขนาดประมาณ 1.8 เมตร มีน้ำหนักประมาณ 181 กิโลกรัม [25]

เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นของการจัดเก็บพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ บริษัท Saft ได้สร้างโรงงานผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ที่เมือง Jacksonville ในรัฐฟลอริดา โรงงานนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากจากกระทรวงพลังงานเป็นเงิน 95,500,000 เหรียญสหรัฐ ภายใต้การกู้คืนของชาวอเมริกัน และพระราชบัญญัติการลงทุนในปี ค.ศ. 2009 โดยโรงงานมีขนาด 235,000 ตารางฟุต เพื่อรองรับความสามารถในการผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในปริมาณมาก โดยมีกำลังการผลิตคิดเป็นยอดขายต่อปีสูงถึง 300 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งแบตเตอรี่จากโรงงานแห่งนี้นอกจากจะใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ และรถยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดแล้วยังนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเกษตรและทางการทหารอีกด้วย เมื่อสามารถผลิตได้เต็มกำลังแล้วทางบริษัทคาดว่าจะเพียงพอต่อความต้องการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้ามากกว่าห้าแสนคัน ทางรัฐบาลเชื่อว่าโรงงานแห่งนี้จะช่วยให้กำลังการผลิตแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2 ในปี ค.ศ. 2008 เป็นร้อยละ 20 ในปี ค.ศ. 2012 [26-28]

2.2.4 ประเทศไทย

ในปัจจุบันประเทศไทยมีโครงการที่จะศึกษาสถานภาพและแนวโน้มการพัฒนาตลาดแบตเตอรี่ลิเทียมของประเทศไทย ซึ่งจัดทำโดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) การศึกษานี้จะศึกษาสถานภาพปัจจุบันของตลาดและอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ของประเทศต่างๆ และในประเทศไทย แนวโน้มของเทคโนโลยีการประยุกต์ใช้ตลาดและอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ลิเทียมรวมไป ถึงจุดอ่อน จุดแข็ง โอกาส และข้อจำกัด ในการพัฒนาอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ลิเทียมในประเทศไทย ซึ่งผลของการศึกษาจะทำให้ทราบถึงแนวโน้มและทิศทางของอุตสาหกรรมดังกล่าว รวมถึงโอกาสความเป็นไปได้ที่จะเกิดการ พัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [29] นอกจากนั้นในปี พ.ศ. 2553 ที่ผ่านมา ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) มีแผนจัดตั้งห้องปฏิบัติการวิจัยเกี่ยวกับการเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery) ซึ่งเป็นหัวใจของยานยนต์ไฟฟ้า ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะไม่เคยมีการวิจัยและพัฒนาในเรื่องนี้มาก่อน และแบตเตอรี่ลิเทียมนี้ยังเป็นเรื่องใหม่สำหรับประเทศไทย ซึ่งปัจจุบันสามารถผลิตได้ในขนาดเล็กๆ เพื่อใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่เท่านั้น แต่ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) มีความมั่นใจว่าประเทศไทยจะสามารถพัฒนาเทคโนโลยีด้านแบตเตอรี่เพื่อตามทันประเทศอื่นๆ ได้และก็เป็นไปได้ว่าจะถึงขั้นพัฒนาแบตเตอรี่เพื่อขายให้กับบริษัทรถยนต์ [30] ปัจจุบันไม่เพียงแต่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เท่านั้นที่ตระหนักถึงความสำคัญของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ศูนย์วัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น [31] ก็มีการจัดตั้งกลุ่มวิจัยเพื่อวิจัยและพัฒนาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยเฉพาะ โดยกลุ่มวิจัยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนี้จะเน้นการทำวิจัยด้านวัสดุเพื่อพลังงาน วัสดุเพื่อทำขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานและโครงสร้างของวัสดุด้วยเทคนิคทาง X-ray การวัดและวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมี การพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมที่รัฐบาลจำเป็นต้องให้ความร่วมมือ และสนับสนุนการวิจัย โดยจัดตั้ง หน่วยงานวิจัยทางด้านนี้โดยเฉพาะ ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะมีหน่วยงานวิจัยเรื่องนี้อยู่บ้าง แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะพัฒนาเทคโนโลยีให้ทัดเทียมชาติอื่นได้ นอกจากนั้นจะต้องสร้างความสัมพันธ์เชิงยุทธศาสตร์กับญี่ปุ่นในฐานะเจ้าของเทคโนโลยี เพื่อให้การพัฒนาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อประโยชน์ต่อประเทศชาติต่อไปในอนาคต

2.3 เทคโนโลยีระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่

ในการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย จำเป็นต้องอาศัยการจัดการพลังงานอย่างเป็นระบบ โดยอุปกรณ์หนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการบริหารจัดการพลังงาน เรียกว่า “ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ หรือ Battery Management System (BMS)” ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีหน้าที่ในการจัดการให้มีการใช้พลังงานที่กักเก็บภายในแบตเตอรี่อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและลดความเสี่ยงที่แบตเตอรี่จะเกิดความเสียหายจากการใช้งานให้มากที่สุดผ่านกระบวนการตรวจสอบและควบคุมกระบวนการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ ทั้งนี้กระบวนการตรวจสอบและควบคุมการใช้งานแบตเตอรี่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ควบคุมการอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยป้องกันไม่ให้เกิดการอัดประจุมากเกินไป (Overcharging) เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

- ตรวจสอบการจ่ายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับแบตเตอรี่โดยตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าในกรณีที่ประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่หมด
- ตรวจสอบค่า SoC ของแบตเตอรี่เพื่อควบคุมการอัดและจ่ายประจุไฟฟ้า
- ให้กำลังไฟฟ้าโดยใช้แรงดันต่ำสุด ผ่านอุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC conversion) เพื่อยืดอายุการใช้งาน

ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จะมีความซับซ้อนมากกว่าระบบเดียวกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้ามีจำนวนเซลล์แบตเตอรี่มากกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ มาก อีกทั้งแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าจะถูกใช้งานที่สภาวะกระแสและแรงดันสูงอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้กำลังไฟฟ้าเพียงพอต่อการขับเคลื่อน ดังนั้นระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่จะต้องมีหน้าที่หลัก 3 ส่วน ได้แก่

1. Cell monitoring คือการแสดงผลค่าสถานะต่างๆ ของแบตเตอรี่ เช่น แรงดัน อุณหภูมิ และ State of Charge (SOC) เป็นต้น
2. Cell protection คือการตัดการทำงานของแบตเตอรี่ เมื่ออยู่ในสภาวะอันตราย เช่น แรงดันเกิน (Over-voltage) กระแสเกิน (Over-current) อุณหภูมิสูงเกิน (Over-temperature) และ แรงดันต่ำ (Under-voltage) เป็นต้น
3. Cell balancing คือการปรับให้เซลล์แต่ละเซลล์มีพลังงานเท่าๆ กันระหว่างการอัดและคายประจุไฟฟ้า

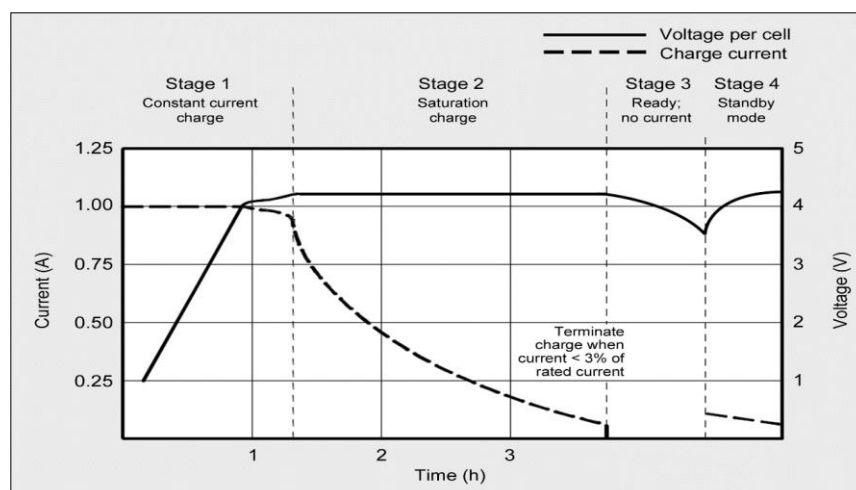
ในการใช้งานแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน ซึ่งเป็นประเภทแบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าจะต้องมีการอัดประจุไฟฟ้าตามวัฏจักร ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ซึ่งแบ่งการอัดประจุไฟฟ้าออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่

ระยะที่ 1 Constant current charge คือ การอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสคงที่จนกว่าแรงดันจะเข้าสู่ค่าที่กำหนด

ระยะที่ 2 Saturation charge เมื่อแรงดันเข้าสู่ค่าที่กำหนด แรงดันจะคงที่จนกระทั่งอัดประจุได้เต็ม ในขณะเดียวกันนั้น กระแสจะลดลงไปเรื่อยๆ

ระยะที่ 3 Ready; no current เมื่ออัดประจุจนเต็มแล้ว กระบวนการอัดประจุจะหยุดลง

ระยะที่ 4 Standby mode เมื่ออัดประจุเรียบร้อยแล้ว และแบตเตอรี่ยังไม่ได้ถูกใช้งาน แรงดันจะลดลง จึงมีระยะนี้ไว้เพื่ออัดประจุกลับไปให้เต็มอีกครั้ง



รูปที่ 2-10 ขั้นตอนการอัดประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่จะทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น และจะแสดงผลสถานะของแบตเตอรี่ (Cell monitoring) โดยอ่านค่าแรงดันของแต่ละเซลล์และอ่านค่าอุณหภูมิของของแบตเตอรี่ก่อนส่งผ่านข้อมูลดังกล่าวไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแสดงผลให้ผู้ขับขี่ต่อไป สำหรับขั้นตอนการปรับสมดุลของแต่ละเซลล์ (Cell balancing) จะเริ่มจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการตรวจสอบค่าแรงดันของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ และเมื่อต้องการที่จะปรับความสมดุลของแต่ละเซลล์ BMS จะตรวจสอบว่าเซลล์ใดที่มีค่าแรงดันมากกว่าเซลล์อื่น และเซลล์นั้นจะถูกปรับลดแรงดันลงให้มีค่าแรงดันเท่าเซลล์อื่นๆ และสำหรับหน้าที่การป้องกันความเสียหายของเซลล์แบตเตอรี่ (Cell protecting) ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่จะอ่านค่าแรงดันของแบตเตอรี่ ซึ่งเมื่อค่าแรงดันของแบตเตอรี่ที่อ่านได้มีค่าต่ำกว่ากำหนด หรืออุณหภูมิที่วัดได้สูงเกินกว่ากำหนด จะมีสัญญาณเตือนดังขึ้น และหากในขณะที่อัดประจุไฟฟ้า ถ้าแบตเตอรี่เกิดการอัดประจุเกิน (Overcharge) ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่จะส่งสัญญาณไปที่สวิตช์รีเลย์เพื่อตัดวงจรการอัดประจุให้หยุดทำงาน

โดยสรุป ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่มีความสำคัญต่อการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย เนื่องจากระบบดังกล่าวจะทำหน้าที่ตรวจสอบสถานะของเซลล์แบตเตอรี่ ปรับความสมดุลของเซลล์แต่ละเซลล์ และตัดการทำงานของแบตเตอรี่หากตรวจพบการทำงานที่ผิดปกติ

2.4 เปรียบเทียบแบตเตอรี่ขับเคลื่อนของ Nissan Leaf และ BMW i3

หากพิจารณาแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 2 รุ่นที่ใช้ทดสอบในโครงการฯ ซึ่งได้แก่ยานยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf และ BMW i3 พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 2 รุ่นใช้แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนเป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อน โดยติดตั้งไว้บริเวณด้านล่างของห้องโดยสาร และมีคุณลักษณะเฉพาะดังแสดงในตารางที่ 2-2 และภาพประกอบดังแสดงในรูปที่ 2-11

ตารางที่ 2-2 คุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่สำหรับขับเคลื่อนของ Nissan Leaf และ BMW i3

ยานยนต์ไฟฟ้า	Nissan Leaf	BMW i3
จำนวนเซลล์	192	96
ความจุพลังงาน (kWh)	30	33
แรงดัน (V)	360	350
น้ำหนัก (kg)	296	256
ระยะทางวิ่งด้วยไฟฟ้าสูงสุด ตามการทดสอบ NEDC (km)	250	240



รูปที่ 2-11 แบตเตอรี่ของ Nissan Leaf (ซ้าย) และ BMW i3 (ขวา) [32, 33]

ลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันอีกประการหนึ่งของแบตเตอรี่ขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf และ BMW i3 คือ วิธีการที่ใช้ในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยยานยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งสามารถไหลผ่านช่องอากาศที่ถูกออกแบบไว้ภายในตัวถัง ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้า BMW i3 มีระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็น ซึ่งจะทำงานเมื่ออุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ติดตั้งไว้ที่แบตเตอรี่ตรวจวัดอุณหภูมิได้สูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เมื่ออุปกรณ์วัดอุณหภูมิตรวจวัดอุณหภูมิดังกล่าวได้จะสั่งการให้คอมเพรสเซอร์ไฟฟ้าสำหรับระบบปรับอากาศทำงานเพื่อไหลเวียนสารทำความเย็นไปยังแบตเตอรี่ ซึ่งระบบระบายความร้อนดังกล่าวสามารถทำงานได้แม้ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้าจอดและดับสวิตช์อยู่

ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 2 รุ่น ดังกล่าว คือ ยานยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf ใช้การอัดประจุไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกเท่านั้น ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้า BMW i3 สามารถอัดประจุไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอก และมีเครื่องยนต์ 2 สูบ ขนาดความจุกระบอกสูบ 647 ซีซี เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในกรณีที่แบตเตอรี่มีพลังงานไฟฟ้าประจุในระดับต่ำ โดยเครื่องยนต์ดังกล่าว

เรียกว่า Range Extender เนื่องจากทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวโดยมิได้สร้างแรงขับเคลื่อนโดยตรงแต่อย่างใด

2.5 เอกสารอ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) (2558). การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- [2] Pillot, C. (Avicenne) (2011). Worldwide Battery Market 2011-2025, Batteries, Nice, France Oct 24-26, 2011.
- [3] Salkind, A., and Zguris, G., Chapter 6 in Linden's Handbook of Batteries, 4th edition, ed. By Reddy, T.B.. p. 16.1-16.85.
- [4] Dahn, J., and Ehrlich, G.M., Chapter 26 in Linden's Handbook of Batteries, 4th edition, ed. By Reddy, T.B.. p. 26.1-26.79.
- [5] รายงานวิจัยด้านตลาดของแบตเตอรี่โดย Frost & Sullivan ปี ค.ศ. 2009
- [6] Tarason, J.-M., Armand, M. (2001). Review Article Issues and Challenges Facing Lithium Rechargeable Batteries, Nature, 414, 15 Nov, 2001, p 359-367.
- [7] Lowe, M., Takuoka, S., Trigg, T., and Geraffi, G. (2010). Lithium-ion Battery for Electric Vehicles: The US Value Chain, Center on Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University, URL: https://unstats.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20%28Gereffi%20-%20May%202010%29.pdf, accessed on 24/05/2015.
- [8] URL: <http://www.vcharkarn.com/electric/article/view.php?id=43318>
- [9] URL: <http://www.avira.in.th/news/31>
- [10] URL: <http://cleantechnica.com/2011/05/26/li-ion-batteries-with-nearly-double-the-usual-energydensity/>
- [11] URL: <http://cleantechnica.com/2011/06/07/li-ion-flow-batteries-refill-quickly-and-easily-could-cut-cost-of-li-ion-batteries-in-half>
- [12] Blurton K.F. and Sammells A.F., (1979), Metal/Air Batteries: Their Status and Potential – A Review, J. Power Sources., vol. 4, pp. 263-279.
- [13] Goldstein J., Brown I. and Koretz B., (1999), New Development in the Electric Fuel Ltd Zinc-air System, J. Power Sources., vol. 80 (1-2), pp. 171-179.
- [14] EOS Energy Storage, (2012), Energy Storage, Report January 2012, accessed on 01/08/2012.

- [15] Energizer, Energizer Zinc Air Battery Handbook Including Performance and Design Data, PP355.
- [16] Revolt Technology, (2012), Rechargeable Zinc-Air Batteries, Powerpoint Presentation.
- [17] Petersen J.L., ALT Energy Stocks, (2011), Three Years of Seeking Alpha in Energy Storage, July 17, 2011, http://www.altenergystocks.com/archives/clean_transportation. accessed on 01/08/2012.
- [18] IBM, (2012), Lithium/Air Battery Project (Battery 500), http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_project.php?id=3203, accessed on 31/08/2012.
- [19] Pike Research (2011).URL:<http://www.greencarcongress.com/2011/04/pike-20110419.html>, accessed on 21/04/2015.
- [20] Battery University (2015), Comparison Table of Battery Chemistry, Cadex, URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries, accessed on 21/04/2015.
- [21] The Boston Consulting Group. Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020.
- [22] International Energy Agency (2016). Global EV Outlook 2016 – Beyond one million electric cars. IEA Publications, May 2016, France.
- [23] URL: http://www.evwind.es/noticias.php?id_not=13340
- [24] URL: <http://www.depthai.go.th>
- [25] URL:http://www.cggc.duke.edu/pdfs/Lowe_Lithium-Ion_Batteries_CGGC_10-05-10_revised.pdf
- [26] URL:http://www1.eere.energy.gov/commercialization/news_detail.html?news_id=17741
- [27] URL: <http://www.electronicadvocate.com/2011/09/16/saft-opens-lithium-ion-battery-plant-in-florida/>
- [28] URL: <http://energy.gov/articles/saft-america-advanced-batteries-plant-celebrates-grand-openingjacksonville>
- [29] URL: <http://www.nstda.or.th/prs/index.php/54-1>
- [30] URL: http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_contet&task=view&id=1093&Itemid=165
- [31] URL : <http://www.nano.kku.ac.th/msn/?q=node/62>

- [32] Christopher DeMorro (2015). 99.99% Of Nissan LEAF Batteries Still In Operation. URL: <https://cleantechnica.com/2015/03/25/99-99-nissan-leaf-batteries-still-operation/>. Accessed on 13 June 2017.
- [33] Tom Moloughney (2014). Battery More Powerful” Coming To BMW i3?. URL: <http://insideevs.com/battery-powerful-coming-bmw-i3/>. Accessed on 13 June 2017.

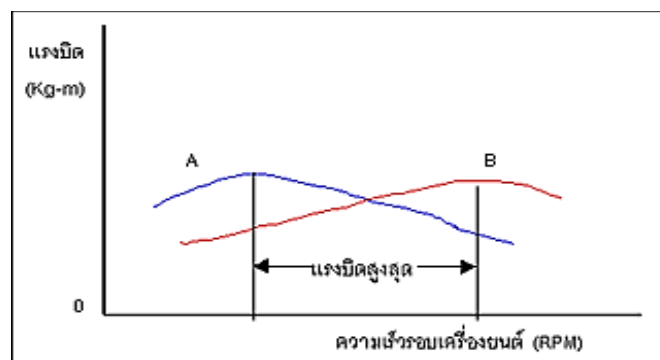
บทที่ 3

เทคโนโลยีมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

3.1 ระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้ามีข้อแตกต่างจากการขับเคลื่อนของยานยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างเห็นได้ชัด คือการใช้พลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บอยู่ในแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานขับเคลื่อนทางกลแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการจุดระเบิดผ่านกระบวนการสันดาปภายใน ดังนั้นการขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้าจึงไม่มีการปลดปล่อยมลพิษที่ปลายท่อ (Tailpipe Emissions) หากพิจารณากระบวนขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนด้วยกัน คือ 1) มอเตอร์ขับเคลื่อน (Traction Motor) 2) ชุดควบคุมมอเตอร์ (Motor Controller) 3) ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Electronics) และ 4) ระบบสนับสนุนย่อย (Supporting Systems) ซึ่งมอเตอร์ขับเคลื่อนจะทำหน้าที่เป็นต้นกำลังหลักแทนเครื่องยนต์ โดยมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมมอเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมแรงบิดและกำลังขับโดยใช้การควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ให้เหมาะสมกับภาระโหลด ทั้งนี้ ระบบไฟฟ้ากำลังจะทำหน้าที่ปรับระดับกระแสและแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับคำสั่งจากชุดควบคุมมอเตอร์ตามประเภทของมอเตอร์ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าที่เหนือกว่าระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลคือต้องการชุดเฟืองทดที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า เนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อนสามารถสร้างแรงบิดที่แปรผันกับความเร็วรอบอย่างเหมาะสมต่อการขับเคลื่อน จึงไม่จำเป็นต้องใช้ชุดเฟืองทดที่มีหลายอัตราทด และโดยส่วนใหญ่มักจะใช้ชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดคงที่

สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิง แรงบิด (Torque) หมายถึง แรงหมุนของเพลาเครื่องยนต์เป็นแรงที่ใช้เพื่อส่งกำลังของเครื่องยนต์ไปหมุนเกียร์ เพลา และ ล้อรถ เพื่อให้รถเคลื่อนที่ไปได้ แรงบิดจะมีค่าแตกต่างกันไปตามความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิตว่าต้องการให้มีแรงบิดสูงสุดอยู่ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำ ปานกลาง หรือสูง รถที่ใช้เครื่องยนต์ที่มีแรงบิดสูงก็จะมีอัตราเร่งดีกว่ารถที่ใช้เครื่องยนต์ที่มีแรงบิดต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3-1

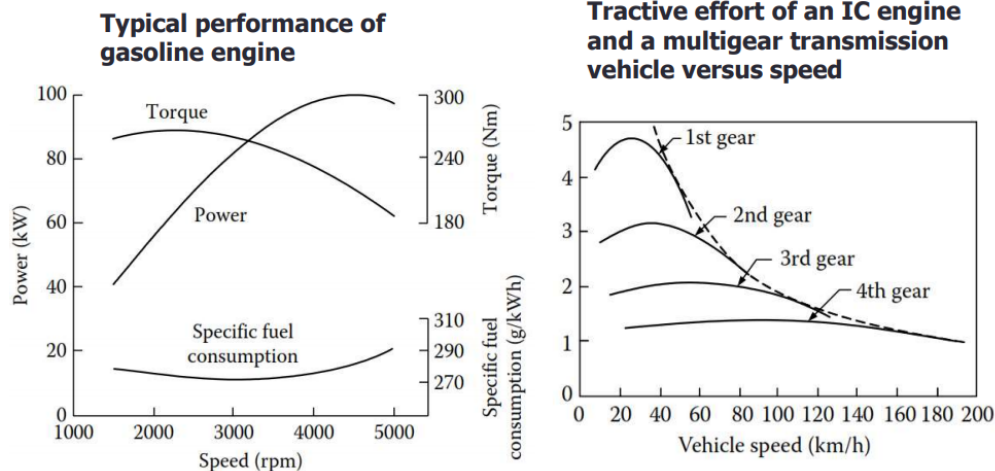


รูปที่ 3-1 แรงบิดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ

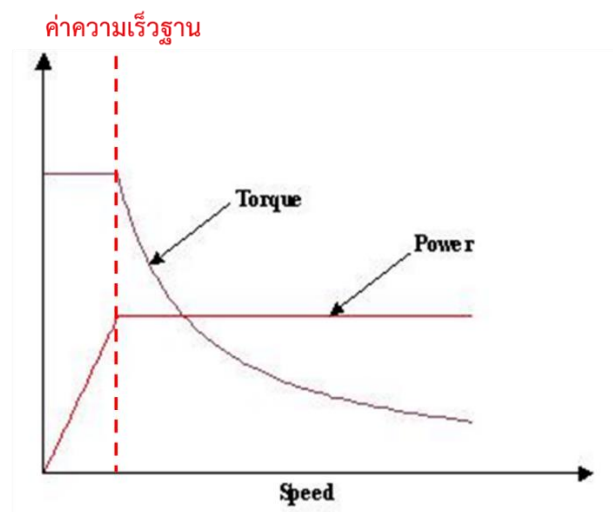
เส้นสีฟ้า (A) แสดงค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ที่มีแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วรอบต่ำ และเส้นสีแดง (B) แสดงค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ที่มีแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วรอบสูง โดยรถที่ใช้เครื่องยนต์ที่มีแรงบิดสูงสุดในรอบเครื่องต่ำหรือปานกลาง จะออกตัวได้ดีกว่าและให้อัตราเร่งที่ดีกว่าในช่วงความเร็วต่ำหรือความเร็วปานกลาง ในขณะที่รถที่ใช้เครื่องยนต์ที่มีแรงบิดสูงสุดในรอบเครื่องสูง จะให้อัตราเร่งที่ดีกว่าในช่วงความเร็วสูง และมีแนวโน้มที่จะให้ความเร็วสูงสุดที่สูงกว่า แต่ในการออกตัวหรือในช่วงที่ใช้ความเร็วต่ำ สมรรถนะจะด้อยกว่า

แรงม้า (Horse Power) คือ หน่วยสำหรับใช้วัดกำลังของเครื่องยนต์ หน่วยวัดกำลังที่นิยมใช้กัน คือแรงม้า (HP) แรงม้า (PS) และ กิโลวัตต์ (kW) นอกจากนี้ในบางครั้งเราจะเห็นตัวย่อ BHP ซึ่งย่อมาจาก Brake Horse Power ซึ่งหมายถึง กำลังของเครื่องยนต์ที่ได้รับจากเพลารองเครื่องยนต์ ซึ่งเท่ากับกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตโดยไม่คำนึงถึงแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์ ดังแสดงในสมการ $BHP = IHP - FHP$ โดยที่ IHP คือ Indicated Horse Power หมายถึงกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้ และ FHP คือ Friction Horse Power ซึ่งหมายถึงแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์ กำลังของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้จากสมการ $HP = K \times \text{Torque} \times \text{RPM}$ โดยที่ K คือ ค่าคงที่ T คือแรงบิด และ RPM คือความเร็วรอบของเครื่องยนต์ แรงม้าสูงสุดของเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์แต่ละรุ่นจะมีความเร็วรอบดังกล่าวแตกต่างกันไปแล้วแต่การออกแบบของผู้ผลิต ทั้งนี้ ค่าแรงม้าที่ปรากฏในหนังสือหรือคุณสมบัติของรถยนต์ (Specification) จะหมายถึง BHP เพราะเป็นแรงม้าที่ได้มาจากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยตรง

คุณลักษณะของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงและมอเตอร์มีลักษณะบางประการที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3-2 และ 3-3 คุณลักษณะสำคัญของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงคือแรงบิดของเครื่องยนต์จะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบค่าหนึ่ง โดยเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไป แรงบิดที่เครื่องยนต์สามารถสร้างได้จะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อให้การใช้งานเครื่องยนต์สัมพันธ์กับช่วงของความเร็วใช้งานยานยนต์ที่กว้าง จึงต้องมีการใช้เกียร์ในการปรับกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนให้เหมาะสม ในขณะที่คุณลักษณะสำคัญของมอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าคือความสามารถในการสร้างแรงบิดในขณะออกตัวและกำลังขับในขณะขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อตอบสนองต่อสมรรถนะการขับขี่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กำลัง และความเร็วรอบของมอเตอร์ถูกแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแรงบิดที่มีค่าสูงสุดและคงที่ในช่วงความเร็วรอบต่ำเพื่อช่วยเอาชนะแรงต้านต่างๆ ในช่วงการออกตัว เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเกินกว่าค่าความเร็วฐาน (Base Speed) ของมอเตอร์ ซึ่งเป็นค่าความเร็วอ้างอิงสำหรับกำหนดค่าพิกัดกำลังของมอเตอร์ แรงบิดจะลดต่ำลงและกำลังของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว หากมอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดที่สูงในช่วงความเร็วรอบต่ำ จะส่งผลให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีอัตราเร่งดีและสามารถออกตัวบนทางชันได้ดี



รูปที่ 3-2 แรงม้าและแรงบิดของเครื่องยนต์

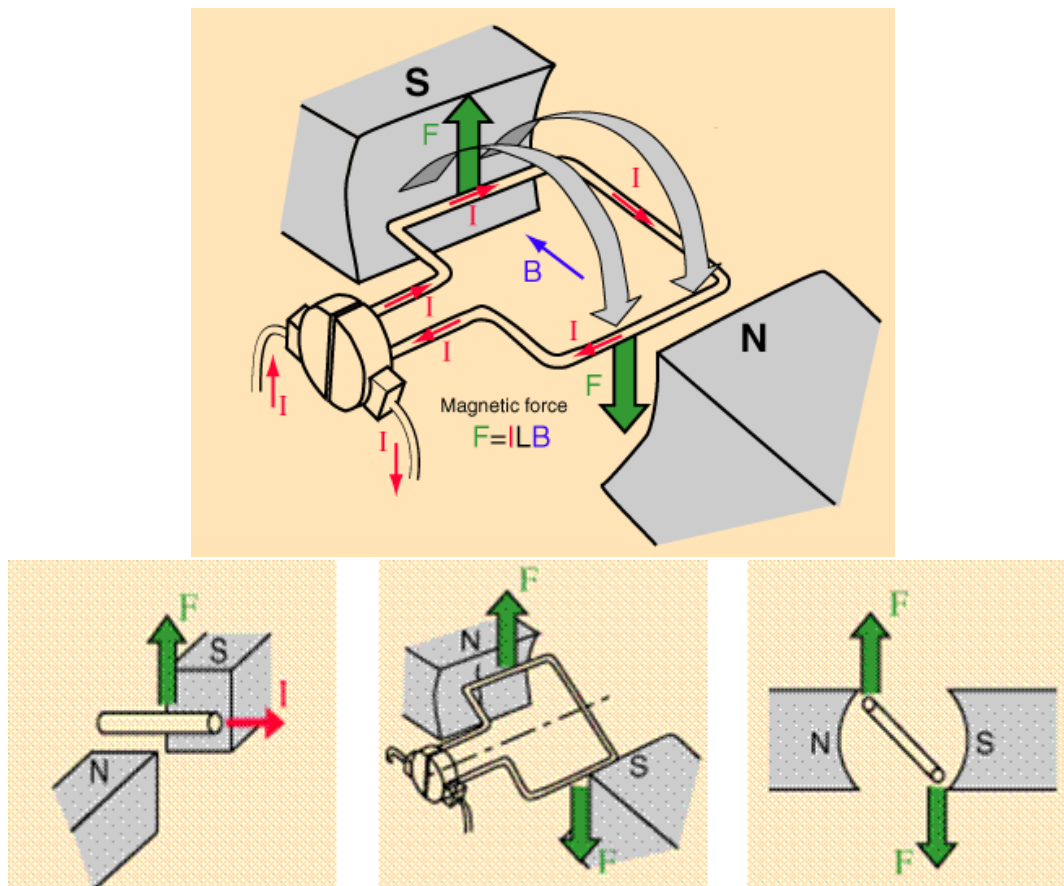


รูปที่ 3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กำลัง และความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า [1]

นอกจากคุณลักษณะด้านแรงบิดและกำลังที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าแล้ว มอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณลักษณะอื่นๆ เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าย้อนกลับขณะเบรก (Regenerative Braking) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งมีความทนทานต่อการใช้งานในสถานะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสถานะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การสั่นสะเทือน การสัมผัสกับน้ำและความชื้น และการขาดการบำรุงรักษา ซึ่งสถานะการใช้งานดังกล่าวแตกต่างจากการใช้งานของมอเตอร์อุตสาหกรรมทั่วไป

หากพิจารณานิยามของมอเตอร์พบว่า มอเตอร์คืออุปกรณ์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลในรูปของการเคลื่อนที่รอบแกนโดยใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กที่อยู่ในมอเตอร์และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดตั้ง

แสดงในรูปที่ 3-4 โดยเมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ ขดลวดขึ้นซึ่งจะเกิดอันตรกิริยากับแม่เหล็กที่อยู่ใกล้กับขดลวดส่งผลให้เกิดการหมุนของขดลวดรอบแกน



รูปที่ 3-4 หลักการทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้า [2]

3.2 ประเภทมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

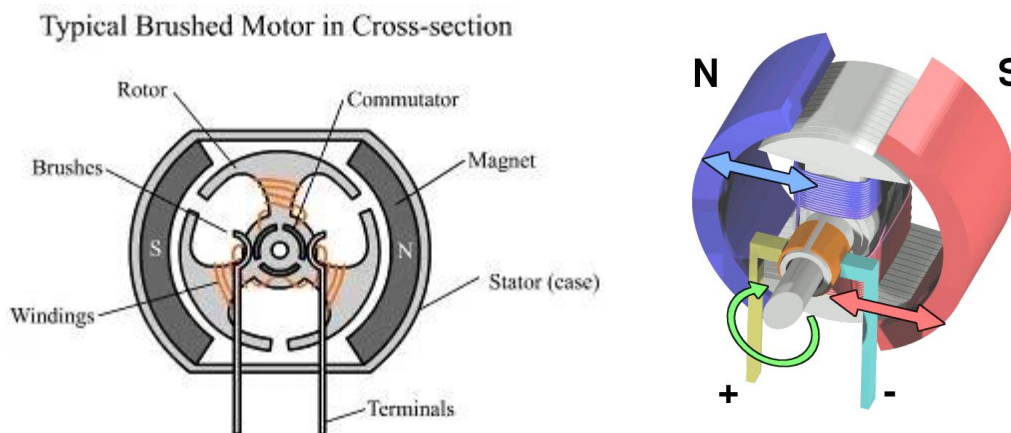
หากพิจารณาประเภทของมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า พบว่า มีการใช้งานมอเตอร์ใน 2 รูปแบบ คือ มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) และ มอเตอร์กระแสสลับ (AC Motor) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดและประเภทย่อยของมอเตอร์ทั้ง 2 ประเภท ดังนี้

3.2.1 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงเป็นรูปแบบของมอเตอร์ที่มีความซับซ้อนในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าน้อย เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงสามารถรับไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่าย เช่น แบตเตอรี่ และสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องการะบบไฟฟ้ากำลังเพิ่มเติม โดยมอเตอร์กระแสตรงที่ได้รับความนิยมนำมาใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็นประเภทย่อยได้อีก 2 ประเภท คือ มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และ มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

3.2.1.1 มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (Brushed DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านประกอบด้วยแกนหมุน (Rotor) โดยมีขดลวดเหนี่ยวนำ (Armature) หลายชุดอยู่รอบ ๆ เพื่อรับกระแสไฟฟ้าจากคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ที่ต่ออยู่กับปลายของขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหลักหรือติดกับแม่เหล็กถาวรบนสเตเตอร์ (Stator) ทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-5 โดยคอมมิวเตเตอร์นั้นมีหน้าสัมผัสกับแปรงถ่านเพื่อรับกระแสไฟจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก



รูปที่ 3-5 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน [3, 4]

การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านเริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายไฟฟ้าผ่านขั้วที่ต่ออยู่กับแปรงถ่านไปยังขดลวด เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นซึ่งหากมีขั้วตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่ติดอยู่กับสเตเตอร์ก็จะดูดกัน แต่หากมีขั้วเหมือนกันจะผลักกันส่งผลให้เกิดแรงบิดและทำให้แกนหมุน ทั้งนี้ การจัดวางแปรงถ่านที่สัมพันธ์กับการหมุนของคอมมิวเตเตอร์ ทำให้เมื่อแกนหมุนเคลื่อนที่ แปรงถ่านจะสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ชุดใหม่ซึ่งจะสร้างสนามแม่เหล็กในทิศทางใหม่ ส่งผลให้เกิดการหมุนของแกนอย่างต่อเนื่อง

มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านมีข้อดีคือมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แข็งแรงและเชื่อถือได้ สามารถต่อกับแบตเตอรี่ได้โดยตรง มีสายไฟเพียง 2 เส้นที่ต่อเข้าไปยังมอเตอร์ทำให้จัดระเบียบสายไฟได้ง่าย และทนทานต่อการใช้งานในสภาวะสั่นสะเทือน จึงได้รับความนิยมถูกนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าความเร็วต่ำ เช่น รถกอล์ฟไฟฟ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านนั้นมีข้อเสียบางประการ ได้แก่ แปรงถ่านจะยึดตัวได้น้อยลงเนื่องมาจากการสึกกร่อนของคอมมิวเตเตอร์ นอกจากนี้มอเตอร์ประเภทดังกล่าวยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำลงเมื่อใช้งานที่ความเร็วรอบสูง เนื่องจากการเสียดสีระหว่างคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน นอกจากนี้การใช้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขดลวดในแกนหมุนจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back Voltage) ขึ้นในขดลวดต้านกับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายได้ ซึ่งมีผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดลดลงด้วย ส่งผลให้แรงบิดลดลง ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือ สำหรับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน แรงบิดแปรผันตรงกับ

กระแส และความเร็วรอบแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นค่าแรงบิดสูงสุดจะถูกจำกัดไว้เพื่อจำกัดพิกัดของกระแสในระบบ ทั้งจากระบบควบคุมมอเตอร์ และความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- มีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และแข็งแรง สามารถใช้งานโดยต่อกับแบตเตอรี่ ต่อหมุนกลับทางโดยการกลับขั้วได้
- ใช้ในที่สั่นสะเทือน และมีความชื้นได้โดยไม่มีปัญหามากนัก
- มีสายเพียงแค่สองเส้นที่เข้ามอเตอร์ ทำให้ง่ายต่อการจัดสาย บางบริษัทผู้ผลิตใช้มอเตอร์ประเภทนี้เพื่อให้ถอดล้อออกได้เร็ว และเปลี่ยนชุดควบคุมง่ายและรวดเร็ว

ข้อด้อย

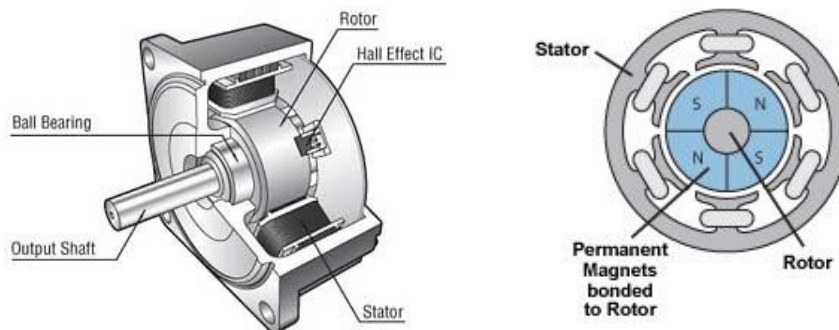
- มีผงฝุ่นที่เกิดจากการสึกหรอของแปรงถ่าน
- เกิดประกายไฟจากกระบวนการ Commutation
- เกิดการรบกวนทางสนามแม่เหล็ก
- เกิดเสียงรบกวนทางกล
- อายุสั้นและประสิทธิภาพต่ำ
- มีขีดจำกัดเรื่องความเร็ว

3.2.1.1 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor หรือ BLDC)

ด้วยราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ลดต่ำลง ส่งผลให้ราคาของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านสูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านเล็กน้อย จึงทำให้มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านได้รับความนิยมนำมาใช้เพื่อขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านมีโครงสร้างสลับกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน โดยมีแกนหมุน (Rotor) เป็นแม่เหล็กถาวร และมีขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ที่สเตเตอร์ โดยขดลวดเหนี่ยวนำมีจำนวนไม่น้อยกว่าสามชุด มอเตอร์ชนิดนี้จึงสามารถทำงานได้โดยการจ่ายไฟฟ้าไปยังขดลวดแต่ละชุดเป็นเฟสสลับกันไปเรื่อย ๆ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กดึงดูดและผลักแกนหมุนอย่างต่อเนื่อง โดยมีการตรวจจับตำแหน่งเพื่อเริ่มทำงานโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor) ดังแสดงในรูปที่ 3-6 มอเตอร์ชนิดนี้สามารถปรับแรงบิดได้โดยปรับการจ่ายกระแสไฟฟ้า และปรับความเร็วรอบได้โดยการปรับความถี่ในการสลับกระแสไฟฟ้าของขดลวด ซึ่งสามารถเรียกการทำงานของมอเตอร์ที่มีความเร็วในการหมุนตรงกับความเร็วของการหมุนของสนามแม่เหล็กกว่าเป็นการทำงานแบบ Synchronous นั่นเอง ถึงแม้ว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพที่สูง และไม่ต้องมีแปรงถ่านซึ่งจะสึกหรอเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน แต่อย่างไรก็มีข้อเสียคือต้องมีชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน สามารถทำงานในสภาวะการใช้งานต่างๆ ของยานยนต์ได้ เช่น สามารถกันน้ำ ทนต่อการสั่นสะเทือนและความร้อนได้ เป็นต้น นอกจากนี้สายไฟที่ต่อเข้ามอเตอร์และชุดควบคุม

อิเล็กทรอนิกส์ยังมีหลายสาย ต่างกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านที่เพียงจ่ายไฟที่สายไฟทั้งสองด้านก็ทำงานได้ ดังนั้นการติดตั้งสายไฟจึงต้องระมัดระวังเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรขึ้น



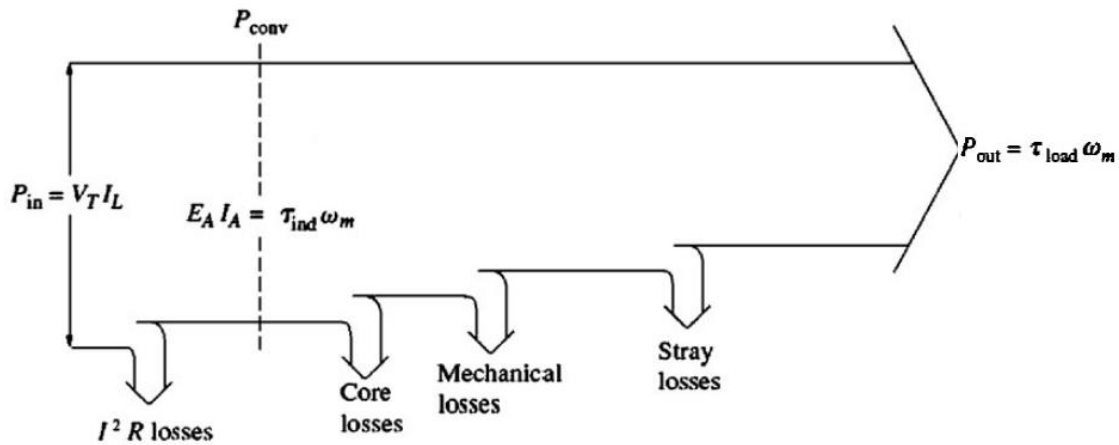
รูปที่ 3-6 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน [5]

ในการใช้งานมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน พบว่ามีลักษณะการสร้างแรงบิดและกำลังคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และจากการที่แกนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร จึงทำให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อใช้งานมอเตอร์ที่ความเร็วสูง

เมื่อพิจารณาตัวโรเตอร์ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 4 ส่วนด้วยกัน คือ

- แกนเพลลา (Shaft) เป็นตัวสำหรับยึดคอมมิวเตเตอร์ และยึดแกนเหล็กอาร์มาเจอร์ (Armature Core) ประกอบเป็นตัวโรเตอร์แกนเพลลาจะวางอยู่บนแบริ่งเพื่อบังคับให้หมุนอยู่ในแนวนิ่งไม่มีการสั่นสะเทือนได้
- แกนเหล็กอาร์มาเจอร์ (Armature Core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบางอาบฉนวน (Laminated Sheet Steel) เป็นที่สำหรับพันขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งสร้างแรงบิด (Torque)
- คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ทำด้วยทองแดงออกแบบเป็นซี่แต่ละซี่มีฉนวนไมก้า (mica) คั่นระหว่างซี่ของคอมมิวเตเตอร์ส่วนหัวซี่ของคอมมิวเตเตอร์จะมีร่องสำหรับใส่ปลายสายของขดลวดอาร์มาเจอร์ ตัวคอมมิวเตเตอร์นี้อัดแน่นติดกับแกนเพลลาเป็นรูปกลมทรงกระบอกมีหน้าที่สัมผัสกับแปรงถ่าน (Carbon Brushes) เพื่อรับกระแสจากสายป้อนเข้าไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งให้เกิดการหักล้างและเสริมกันกับเส้นแรงแม่เหล็กอีกส่วน ซึ่งเกิดจากขดลวดขั้วแม่เหล็กดังกล่าวมาแล้วเรียกว่า ปฏิกริยามอเตอร์ (Motor action)
- ขอลวดอาร์มาเจอร์ (Armature Winding) เป็นขดลวดพันอยู่ในร่องสลอต (Slot) ของแกนอาร์มาเจอร์ขนาดของลวดจะเล็กหรือใหญ่และจำนวนรอบจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการออกแบบของตัวโรเตอร์ ให้เหมาะสมกับงานต่างๆ ในการใช้งานมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน พบว่ามีลักษณะการสร้างแรงบิด และกำลังคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และจากการที่แกนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร จึงทำให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อใช้งานมอเตอร์ที่ความเร็วสูง

หากพิจารณากำลังสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน แสดงดังรูปที่ 3-7 พบว่ามีการสูญเสียกำลังจากการหมุนของมอเตอร์และแรงเสียดทานภายในมอเตอร์เป็นหลัก



รูปที่ 3-7 กำลังสูญเสียทั้งหมด (Total Losses) ของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- ใช้งานได้ในช่วงความเร็ว 0 – 100,000 รอบต่อนาที
- ให้แรงบิดที่ความเร็วสูง
- แรงบิดและขนาดตึกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน
- การกระจายความร้อนในขดลวด stator ตึกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน
- ประสิทธิภาพสูงเหมาะกับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

ข้อด้อย

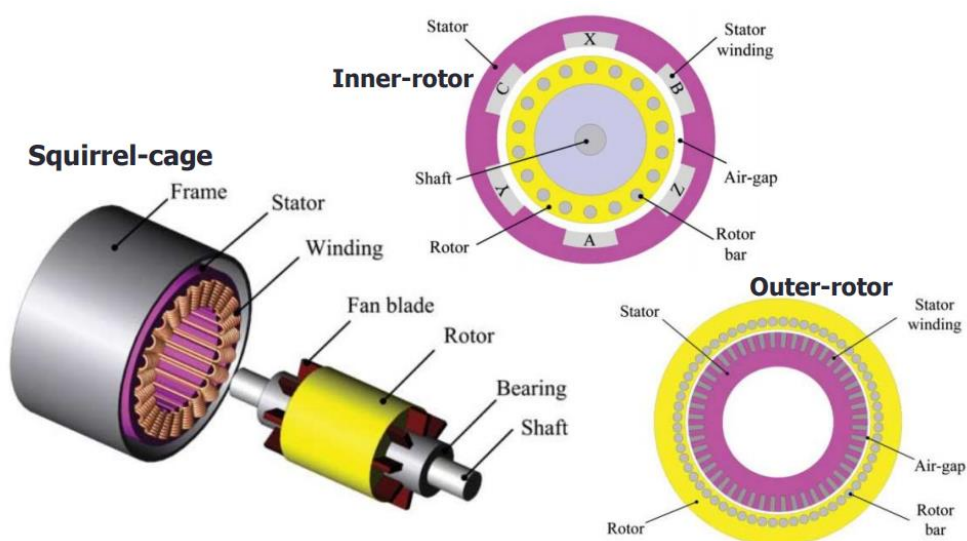
- มีค่าใช้จ่ายจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สูงกว่า
- ชุดควบคุมการขับเคลื่อนยุ่งยากกว่า

3.2.2 มอเตอร์กระแสสลับ (AC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมีโครงสร้างคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน คือมีขดลวดเหนี่ยวนำอยู่บริเวณสเตเตอร์เพื่อรับพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับแล้วแปลงเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนโรเตอร์นั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ และ มอเตอร์กระแสสลับแบบ Synchronous

3.2.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสเตเตอร์ลักษณะเดียวกับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน แต่มีความแตกต่างกันที่แกนหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีแท่งตัวนำวางตัวเป็นวงรอบแกนเพลลา ซึ่งลักษณะการออกแบบโรเตอร์ดังกล่าวเรียกว่าโรเตอร์แบบกรงกระรอก หรือ Squirrel Cage Rotor เนื่องจากโรเตอร์ดังกล่าวประกอบด้วยแท่งตัวนำจำนวนมากที่ถูกฝังอยู่ในแผ่นชั้นเหล็ก ซึ่งอาจเป็นทองแดงหรืออะลูมิเนียม ประกับหัวและท้ายด้วยแผ่นประกับ ดังแสดงในรูปที่ 3-8 หากพิจารณาหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่าเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์สามคู่ที่วางเหลื่อมกันทำมุม 120 องศาตามเฟสทางไฟฟ้า จะเกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่หมุนอยู่โดยรอบแกนหมุน แต่สนามแม่เหล็กในแกนหมุนที่จำเป็นเพื่อการหมุนเพลลาไม่ได้เกิดจากการจ่ายกระแสเข้าสู่ขดลวดดังเช่นมอเตอร์กระแสตรง แต่สนามแม่เหล็กในโรเตอร์แบบกรงกระรอกจะเกิดจากการตัดผ่านของโครงตัวนำของแกนหมุนผ่านสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์ ซึ่งจะสร้างกระแสเหนี่ยวนำขึ้น ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กในแกนหมุนอีกทอดหนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำในแกนหมุนซึ่งพยายามจะวางตัวในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กต้นทางจากสเตเตอร์เป็นสาเหตุที่สร้างแรงบิดของแกนหมุนในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

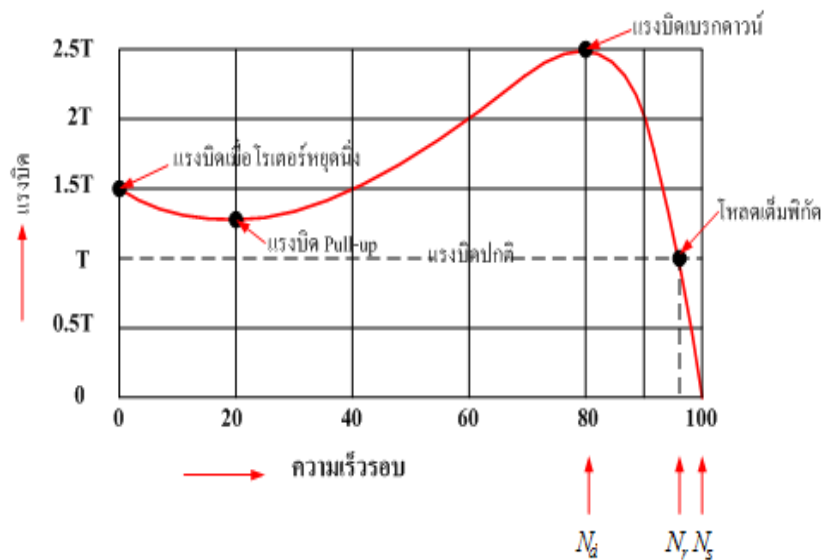


รูปที่ 3-8 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [6]

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบจนถึงจุดที่ความแตกต่างของความเร็วการหมุนของสนามแม่เหล็กกับแกนหมุนแตกต่างกันมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้แรงบิดลดลง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแรงบิดสามารถถูกควบคุมได้โดยการปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด ซึ่งส่งผลให้การควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม มอเตอร์เหนี่ยวนำถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากโครงสร้างส่วนประกอบมีความเรียบง่าย มีความทนทานสูงเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรง มีความปลอดภัยเนื่องจากชุดควบคุมมอเตอร์มีหน้าที่เพียงสร้างกำลังขับ ดังนั้น หากชุดควบคุมมอเตอร์เสีย

มอเตอร์ก็จะหยุดการทำงานเท่านั้นโดยไม่มีแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานจ่ายไปยังมอเตอร์แต่อย่างใด นอกจากนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับขณะเบรก (Regenerative Braking) ได้โดยไม่ต้องการอุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติม ซึ่งหากเป็นมอเตอร์กระแสตรงจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์พิเศษเพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับเพิ่มเติม

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอกในสถานะที่ซิปโหลดเต็มพิกัด ดังแสดงในรูปที่ 3-9 จะพบว่าแรงบิดในสถานะปกติที่โหลดเต็มพิกัดคือ T และแรงบิดในสถานะที่โรเตอร์หยุดนิ่งเท่ากับ 1.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด สำหรับแรงบิดเบรกดาว์นจะมีค่าประมาณ 2.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด



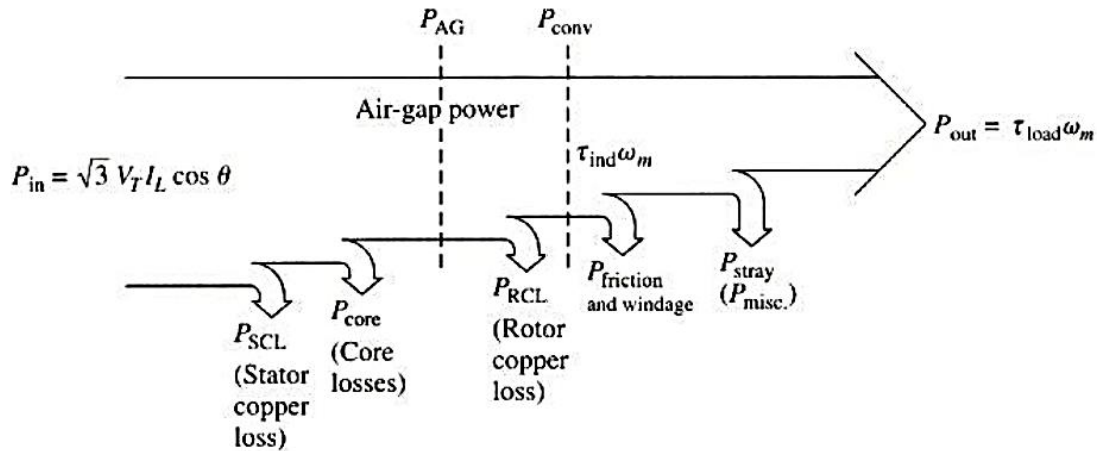
รูปที่ 3-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ที่โหลดเต็มพิกัดความเร็วรอบของมอเตอร์จะเท่ากับ N_r แต่ถ้าแรงบิดของโหลดเพิ่มขึ้นความเร็วจะลดลงจนกระทั่งมอเตอร์สร้างแรงบิดได้เท่ากับแรงบิดของโหลด ในสถานื่อดังกล่าวมอเตียยังคงหมุนไปได้ แต่เมื่อใดก็ตามที่แรงบิดของโหลดเกินกว่า 2.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด ซึ่งเรียกว่าแรงบิดเบรกดาว์น จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนอย่างรวดเร็ว เพราะวามอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิดขึ้นมาเท่ากับแรงบิดของโหลดได้ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีขนาดเล็กกว่า 10 kW ความเร็วที่แรงบิดเบรกดาว์นจะมีค่าประมาณ 80% ของความเร็วซิงโครนัส แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีพิกัดมากกว่า 1000 kW ความเร็วที่แรงบิดเบรกดาว์นจะมีค่าประมาณ 98% ของความเร็วซิงโครนัส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์แบบกรงกระรอกส่วนมากจะนำไปใช้เป็นตัวกำลังขับเคลื่อนเครื่องกลชนิดต่างๆ ในงานอุตสาหกรรมเช่น เครื่องกลึง เครื่องไส เครื่องกัด เครื่องเจียรในราบและตั้ง ขับปั๊มไฮดรอลิกส์ ขับปั๊มน้ำ ขับคอมเพรสเซอร์และงานอื่นๆ เนื่องจากมีคุณลักษณะให้แรงบิดในการเริ่มเดินที่ดี และมี

ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่ ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์แบบพันขดลวดจะใช้กับงานหนัก ใช้ความต้านทานภายนอกช่วยในการเริ่มต้นจะได้แรงบิดในตอนเริ่มต้นสูงสุดและกระแสเริ่มต้นจะลดลง

กำลังสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดในมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงดังรูปที่ 3-10 ซึ่งจะเห็นว่าการสูญเสียกำลังจากการหมุนของมอเตอร์และแรงเสียดทานภายในมอเตอร์เป็นหลัก



รูปที่ 3-10 กำลังสูญเสียทั้งหมด (Total Losses)

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

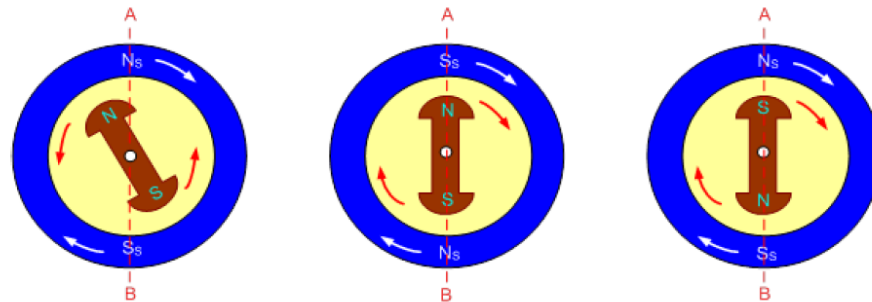
- ใช้เงินลงทุนรวมทั้งการบำรุงรักษาต่ำ
- การควบคุมก็สามารถทำได้ง่าย โดยสามารถต่อเข้ากับสายป้อนได้โดยตรง

3.2.2.2 มอเตอร์กระแสสลับแบบ Synchronous (Synchronous AC Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้ใช้โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์โดยต่ออนุกรมกัน และจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดเพื่อให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่คงตัว โดยขดลวดสนามแม่เหล็กที่ตัวหมุนนี้จะต่อเข้ากับวงแหวนหรือสลิปริงจำนวน 2 วงเพื่อรับไฟกระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอก และที่ตัวหมุนยังฝังแท่งตัวนำไว้ที่ผิวของขั้วแม่เหล็กทุก ๆ ขั้ว

หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสสลับแบบ Synchronous เริ่มต้นจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวดสเตเตอร์และหมุนด้วยความเร็ว Synchronous จากนั้นโรเตอร์จะหมุนตามซึ่งทำงานเหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก ครั้นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัวโรเตอร์จะเกิดขั้วแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์เช่นเดียวกัน เป็นขั้วแม่เหล็กที่คงตัวโดย

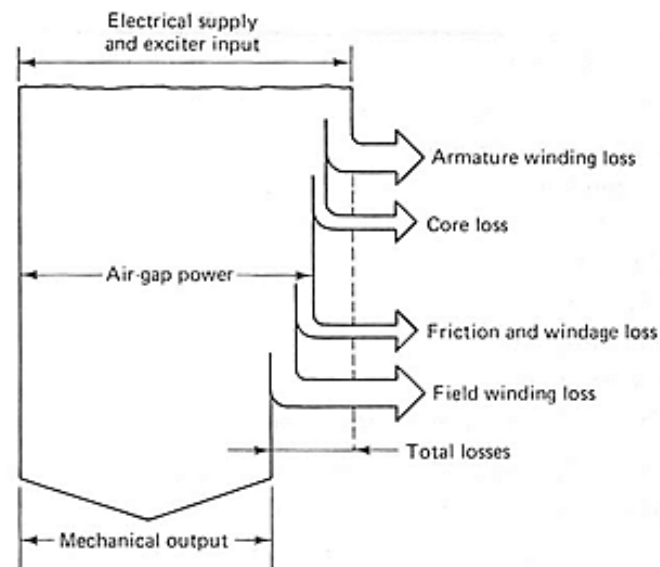
จะหมุนเกาะติดกับขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ด้วยความเร็ว Synchronous ดังแสดงในรูปที่ 3-11 ดังนั้นความเร็วของมอเตอร์ชนิดนี้จะตรงกับความเร็วของไฟฟ้ากระแสสลับและจำนวนขดลวดที่สเตเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม



รูปที่ 3-11 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสสลับแบบ Synchronous [7]

กำลังสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส แสดงดังรูป

ที่ 3-10



รูปที่ 3-10 กำลังสูญเสียทั้งหมด (Total Losses) ของมอเตอร์กระแสสลับแบบซิงโครนัส

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของมอเตอร์กระแสสลับแบบซิงโครนัส มีดังต่อไปนี้

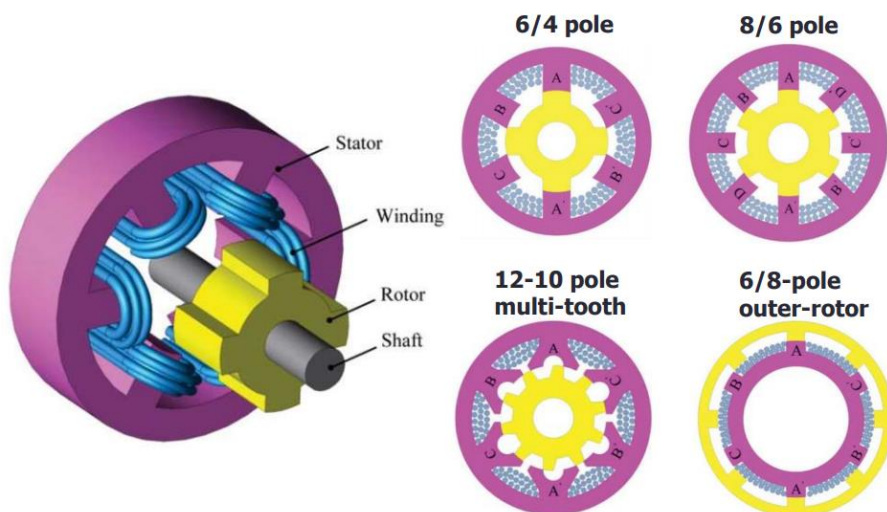
ข้อดี

- ความเร็วเฉลี่ยเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของแหล่งต้นกำลังและเป็นสัดส่วนกลับกับจำนวนขั้วแม่เหล็กในขดลวดที่อยู่กับที่ (Stator)
- ความเร็วคงที่ไม่ว่ามีโหลดหรือไม่มีโหลด

- มอเตอร์ซิงโครนัสมี่ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ แบบไม่มีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า (Non-excited) และแบบกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง
- มอเตอร์ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงมากระตุ้น จะมีขนาดใหญ่กว่า 1 แรงม้า และต้องมีไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายผ่าน Slip Rings
- มอเตอร์มีขนาดใหญ่ พิกัด 200 – 20,000 แรงม้า ความเร็ว 150-1,800 รอบต่อนาที

3.2.2.3 มอเตอร์แบบ Switched Reluctance (Switched Reluctance Motors)

มอเตอร์แบบนี้มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน แต่วัสดุที่ใช้ทำแกนหมุนนั้นเป็นเหล็กอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 3-11 ซึ่งการทำงานอาศัยหลักการของวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กที่จะเคลื่อนตัวเพื่อให้อยู่ในตำแหน่งที่มีความต้านทานต่อสนามแม่เหล็กน้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อเนื้อวัสดุของแกนหมุนหลบห่างจากขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ความต้านทานต่อสนามแม่เหล็กก็จะมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้แกนหมุนพยายามจะหมุนเคลื่อนที่เพื่อให้ขั้วของแกนหมุนอยู่ในแนวเดียวกับขั้วแม่เหล็กซึ่งจะทำให้ความต้านทานต่อสนามแม่เหล็กน้อยสุด ดังนั้น การสลับจังหวะการสร้างสนามแม่เหล็กที่ขดลวดบนสเตเตอร์แต่ละขั้วอย่างเหมาะสม จะทำให้แกนหมุนเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่อง จากหลักการข้างต้นส่งผลให้มอเตอร์แบบ Switched Reluctance ต้องการอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งแกนหมุน ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบควบคุมการทำงานแบบไร้อุปกรณ์ตรวจจับขึ้น ประกอบกับราคาของอุปกรณ์ประมวลสัญญาณดิจิทัลที่ลดลง จึงทำให้มอเตอร์แบบ Switched Reluctance มีการใช้งานแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3-11 โครงสร้างของมอเตอร์แบบ Switched Reluctance [8]

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของมอเตอร์แบบ Switched Reluctance มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- ต้นทุนการผลิตต่ำ
- โครงสร้างง่ายไม่ซับซ้อน

- พัฒนาเป็นมอเตอร์ความเร็วสูงได้ง่าย
- การบำรุงรักษาน้อย

ข้อด้อย

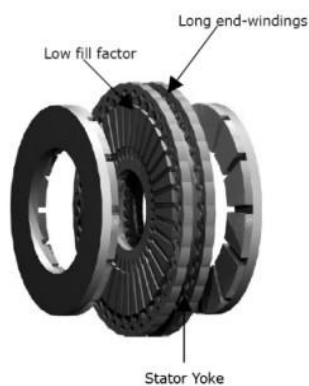
- ต้องการตำแหน่งโรเตอร์ในการควบคุมการทำงาน
- มีการกระเพื่อมของแรงบิด
- ไม่สามารถใช้ได้กับไฟกระแสตรงและกระแสสลับได้โดยตรง ต้องใช้ชุดขับเคลื่อนทำงานร่วมกัน
- มีจำนวนสายที่ออกจากมอเตอร์มาก
- ใช้จำนวนอุปกรณ์สวิทช์กำลังมาก

3.2.3 มอเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบอื่นๆ ทั้งแบบกระแสตรงและกระแสสลับ

นอกจากมอเตอร์กระแสตรงและกระแสสลับที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีมอเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบอื่นๆ ที่นำมาใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มเติมอีก ดังนี้

3.2.3.1 มอเตอร์แบบ Axial-Flux (Axial-Flux Motors)

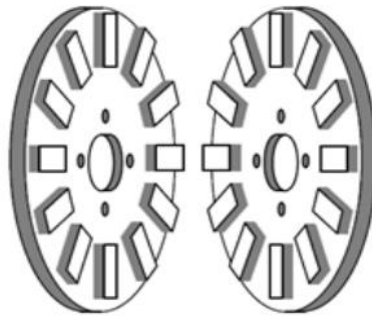
มอเตอร์ประเภทนี้ใช้เส้นแรงแม่เหล็กแตกต่างจากมอเตอร์แบบอื่น ๆ โดยเส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ปกติจะเคลื่อนตัวในแนวรัศมีผ่านช่องอากาศระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ แต่มอเตอร์แบบ Axial-flux นั้น เส้นแรงแม่เหล็กจะไหลขนานกับแกนของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3-12 จึงทำให้สามารถออกแบบโรเตอร์ได้บางและเบากว่ามอเตอร์แบบอื่น ๆ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการเปลี่ยนอัตราเร็วอย่างรวดเร็ว (อัตราเร่งสูง)



รูปที่ 3-12 โครงสร้างของมอเตอร์แบบ Axial Flux [9, 10]

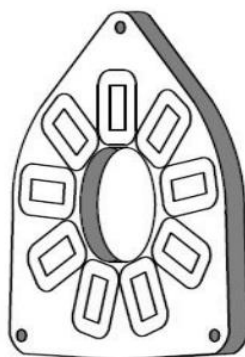
โรเตอร์ของมอเตอร์แบบ Axial Flux Permanent-Magnet Brushless ลักษณะการวางขั้วแม่เหล็กถาวรทั้งสองแผ่นจะต้องวางสลับขั้วกันดังรูปที่ 3-13 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Axial Flux

ใช้เรซินหล่อทับแม่เหล็กเพื่อความแข็งแรงลักษณะทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งผ่านจากแผ่นเหล็กแผ่นแรก (ขั้วเหนือ) ข้ามช่องว่างอากาศ (Air Gap) ไปยังอีกแผ่นหนึ่ง (ขั้วใต้) ผ่านแม่เหล็กจนครบวงจร แม่เหล็กเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้จะมีลักษณะการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นวงรอบปิดโดยทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีลักษณะเสริมกันจึงทำให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมากขึ้นเป็น 2 เท่า แต่อย่างไรก็ดีเมื่อค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ยิ่งมากขึ้นเท่าใดก็อาจยิ่งทำให้เกิดแรงบิดต้านมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 3-13 ตัวอย่างโรเตอร์ แบบ Axial Flux Permanent Magnet Brushless

สเตเตอร์ (Stator) จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ มีหน้าที่ยึดกับขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature-Winding) หรือขดขดลวดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกมาใช้งานโดยทั้งสองด้านของสเตเตอร์จะถูกประกบด้วยโรเตอร์ทั้งสองด้านเพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกมาเป็น 2 เท่า ในการที่นำขดลวดอาร์เมเจอร์มาติดกับชุดของ สเตเตอร์นั้นเพื่อลดปัญหาในเรื่องการฉนวนไฟฟ้า และยึดขดลวดให้แข็งแรงได้ง่าย เนื่องจากไม่ถูกแรงเหวี่ยง หรือการสั่นสะเทือนเนื่องจากการหมุนได้ สเตเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ลักษณะจะเป็นดังรูปที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างสเตเตอร์แบบ Axial Flux [2]

3.3 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง (Power Control Unit หรือ PCU)

นอกจากมอเตอร์ที่เป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าแล้ว ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังถือเป็นอีกหนึ่งส่วนประกอบสำคัญที่ต้องทำงานประสานกับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน โดยชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังจะทำหน้าที่ปรับสถานะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการขับเคลื่อนของมอเตอร์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานระหว่างมอเตอร์ขับเคลื่อน และแบตเตอรี่ ซึ่งในการทำงานร่วมกับมอเตอร์นั้น ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังจะทำงานใน 4 รูปแบบหลัก (Four-Quadrant Operation) ประกอบด้วย 1) การขับเคลื่อนเดินหน้า 2) การสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับ (Regenerative Braking) ขณะเดินหน้า 3) การขับเคลื่อนถอยหลัง และ 4) การสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับ (Regenerative Braking) ขณะถอยหลัง ซึ่งในการทำงานในแต่ละรูปแบบดังกล่าว ยังสามารถปรับแต่งรูปแบบการทำงานย่อยเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการขับเคลื่อนหรือการประหยัดพลังงานได้อีก จากที่กล่าวมาข้างต้น การทำงานของชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ย่อยต่างๆ ดังนี้

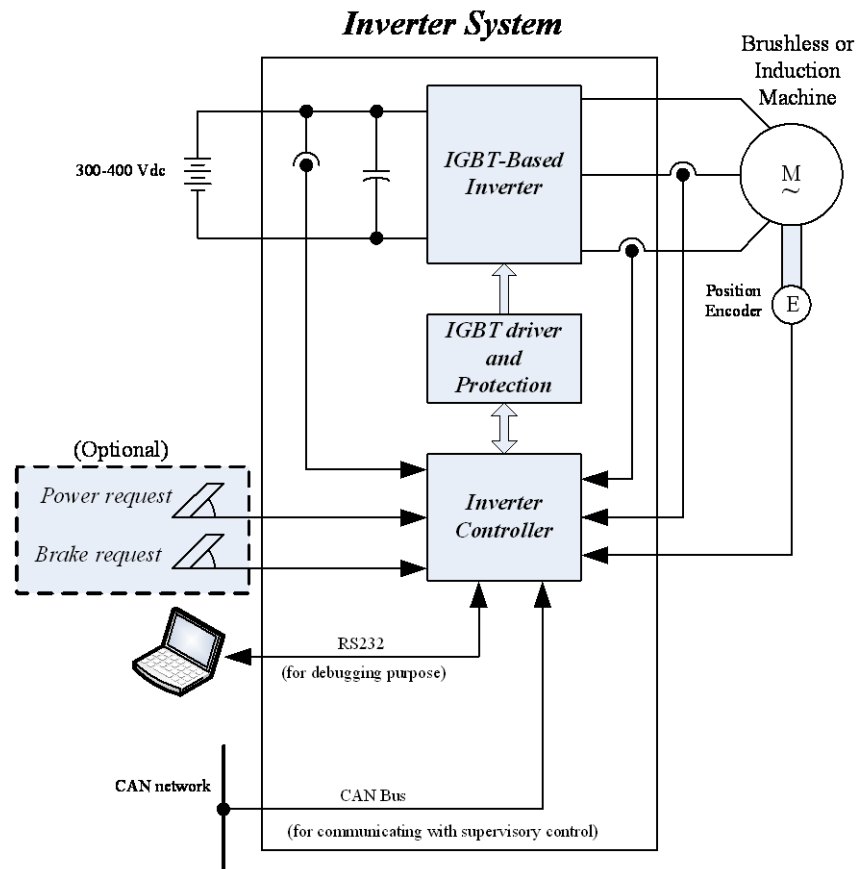
3.3.1 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้ IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse width modulation) ซึ่งหมายถึง การแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยจะใช้อินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ขับมอเตอร์ 1 ตัว ซึ่งชุดอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อน (Cooling System) เพื่อระบายความร้อนออกจากตัวอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากในขณะที่ย้ายกระแส อินเวอร์เตอร์จะเกิดความร้อนสะสมสูงที่ชุด IGBT ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องระบายความร้อนออกจากอินเวอร์เตอร์เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กันทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 3-15 จะเป็นชนิดแหล่งจ่ายแรงดันหรือ Voltage-source inverter ซึ่งอินเวอร์เตอร์แบบนี้สามารถต่อชุดแบตเตอรี่เข้าทางขาเข้า (Input) ของอินเวอร์เตอร์ได้โดยตรง โดยทั่วไปวงจรกำลังจะประกอบขึ้นจากสวิตช์กำลังชนิด IGBT เป็นหลัก อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากชุดแบตเตอรี่ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่โดยทั่วไปมีรูปคลื่นเป็นแรงดัน PWM การควบคุมแรงดัน PWM ให้เหมาะสมกับมอเตอร์กระแสสลับนี้เป็นหน้าที่หลักของชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Inverter controller) ที่จะประมวลผลสัญญาณเข้าและสัญญาณป้อนกลับต่าง ๆ แล้วสั่งการทำงานวงจรกำลังผ่านทางวงจรขับ IGBT (IGBT driver) ในอินเวอร์เตอร์พิกัดกำลังค่อนข้างสูงที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้านั้น มักจะมีวงจรป้องกันในตัวเองเพื่อไม่ให้สวิตช์กำลังเกิดความเสียหายโดยง่าย อินเวอร์เตอร์ที่มีสมรรถนะสูง ๆ นั้น โดยทั่วไปใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) เพื่อให้สมรรถนะไดนามิกส์ที่ดี หลักการสำคัญของการควบคุมแบบเวกเตอร์คือการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้ตามต้องการ ซึ่งเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้กับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

คำสั่งสัญญาณเข้าสำคัญที่จะต้องกล่าวถึงคือ ความต้องการกำลัง (Power request) และความต้องการเบรก (Brake request) ซึ่งสัญญาณนี้อาจส่งมาจาก คันเร่งหรือคันเบรกโดยตรง ซึ่งเหมาะสมกับระบบยานยนต์

ไฟฟ้าที่ไม่ซับซ้อน หรืออาจได้รับการสื่อสารผ่านระบบ CAN bus แม้ว่าโครงข่าย CAN bus โดยทั่วไปจะเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญในระบบยานยนต์ไฟฟ้า แต่คำสั่งเร่งและเบรก มักจะถูกส่งมาจากระบบควบคุมยานยนต์หลัก หรือ Supervisory control



รูปที่ 3-15 วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า [11]

3.3.2 DC-DC Converter

อุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า คือ DC-DC Converter ซึ่งเป็นอุปกรณ์ปรับแรงดันของไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลง โดยอุปกรณ์ดังกล่าวในยานยนต์ไฟฟ้าจะใช้เพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่มีค่าต่ำให้มีความแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นก่อนส่งต่อไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ ซึ่ง Converter ที่ปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเรียกว่า Boost Converter ในขณะที่ Converter ที่ปรับแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเรียกว่า Step Down Converter หรือ Buck Converter

3.4 เปรียบเทียบระบบขับเคลื่อนของ Nissan Leaf และ BMW i3

หากพิจารณาระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 2 รุ่นที่ใช้ทดสอบในโครงการฯ ซึ่งได้แก่ยานยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf และ BMW i3 พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 2 รุ่นใช้มอเตอร์กระแสตรงประเภท Synchronous (Synchronous AC Motor) ในการขับเคลื่อน และมีคุณลักษณะเฉพาะดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ขับเคลื่อนของ Nissan Leaf และ BMW i3

ยานยนต์ไฟฟ้า	Nissan Leaf	BMW i3
กำลังขับสูงสุด (kW)	80	125
แรงบิดสูงสุด (Nm)	254	250
ความเร็วรอบสูงสุด (rpm)	10,500	11,400

จากข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 2 รุ่นข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามความแตกต่างอีกประการหนึ่งระหว่างระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 2 รุ่น คือตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์และชุดขับเคลื่อน โดยยานยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf ติดตั้งมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนไว้บริเวณล้อหน้า ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้า BMW i3 ติดตั้งมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนบริเวณล้อหลัง ดังแสดงในรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-16 รูปแบบการติดตั้งมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนของ Nissan Leaf (ซ้าย) และ BMW i3 (ขวา) [12, 13]

การขับเคลื่อนล้อหน้า และการขับเคลื่อนล้อหลังมีความแตกต่างกันในด้านของสมรรถนะและเสถียรภาพในการขับขี่ กล่าวคือ การติดตั้งมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่บริเวณล้อหน้าของยานยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf มีข้อดีคือยานยนต์มีเสถียรภาพในขณะที่เข้าโค้งที่ความเร็วสูงดีกว่า และหากเกิดการเสียเสถียรภาพขณะขับเคลื่อน จะสามารถแก้ไขได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตาม การติดตั้งมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนบริเวณล้อหน้ามีข้อเสีย คือ การกระจายน้ำหนักที่บริเวณล้อหน้าอาจไม่สมดุล การกระจายน้ำหนักตลอดทั้งคันไม่สมดุลส่งผลให้การควบคุมรถขณะเบรกลดประสิทธิภาพลง ในขณะที่การติดตั้งมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่บริเวณล้อหลังมีข้อดีคือ มีการกระจายน้ำหนักตลอดทั้งคันที่สมดุลขึ้นส่งผลให้การควบคุมรถขณะขับขี่ด้วยความเร็วสูงทำได้ดีขึ้น และการเบรกจะทำได้ดี

ขึ้น อย่างไรก็ตามการติดตั้งมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนบริเวณล้อหลังมีข้อเสียคือ รถอาจเสียการทรงตัวขณะออกตัวบนถนนลื่น

3.5 มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้ารุ่นต่างๆ

มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดกระแสสลับสามารถแบ่งออกเป็น Synchronous Motor และ Asynchronous Motor โดยรูปแบบการทำงานของ Synchronous Motor นั้นจะเริ่มต้นการทำงานโดยที่สนามแม่เหล็กจะต้องหมุนรอบอย่างช้าๆ กระทั่งขั้วแม่เหล็กเกิดการดูดและล็อกเข้ากับขั้วแม่เหล็กถาวรอีกด้านหนึ่งเสียก่อนแม่เหล็กทั้งสองด้านจึงจะหมุนด้วยความเร็วเท่ากัน สำหรับเทคโนโลยีดังกล่าวถูกนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf

ส่วนรูปแบบการทำงานของ Asynchronous Motor ในการขับเคลื่อนมีหลักการทำงานคือ แกนฝั่งหนึ่งจะติดด้วยแม่เหล็กถาวร ในขณะที่อีกฝั่งจะเป็น Rotor ไม่สัมผัสกันและไม่ดูดเข้าหากันซึ่งวัสดุที่ใช้อาจเป็นทองแดงหรืออลูมิเนียมก็ได้ และเมื่อแกนแม่เหล็กถาวรหมุนด้วยความเร็วรอบไปรอบๆ จะส่งผลให้มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นอยู่รอบตัว Rotor และทำให้เกิดแรงกระทำจนทำให้หมุนไปกับแกนแม่เหล็กถาวรจนมีความเร็วเท่ากันส่วนมากจะหมุนด้วยความเร็วคงที่ แต่ก็มีประเภทที่มีช่วงแปรผันตามความเร็วพบเห็นได้ในยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการกำลังสูงและมอเตอร์แบบนี้จะทำงานร่วมกับระบบตัดต่อกำลังแบบเกียร์เดียว (Single-Stage Helical Gearbox) ดังจะเห็นได้ในยานยนต์ไฟฟ้า MINI E ของบริษัท BMW

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส แบบไร้แปรงถ่าน (DC Brushless Motor) โดยมีมุมของแต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า นิยมใช้กับรถจักรยานและจักรยานยนต์ไฟฟ้ามากที่สุดในปัจจุบัน โดยโครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้แตกต่างจากมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน คือ เป็นมอเตอร์ที่ไม่มีแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ นอกจากนี้โครงสร้างยังประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวรกำลังสูงเป็นจำนวนมากจึงสามารถสร้างแรงบิดได้สูง อีกทั้งยังมีราคาที่ไม่สูงมากนัก แต่หากเปรียบเทียบสมรรถนะด้านกำลัง พบว่ายังไม่สามารถให้กำลังสูงเทียบเท่ากับมอเตอร์กระแสสลับแบบ Synchronous และ Asynchronous

จากการสำรวจมอเตอร์ประเภทต่างๆ ที่มีการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า พบว่ามอเตอร์ไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าประเภทรถยนต์ส่วนบุคคลจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือมอเตอร์กระแสสลับแบบซิงโครนัส ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดนี้ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน [14]

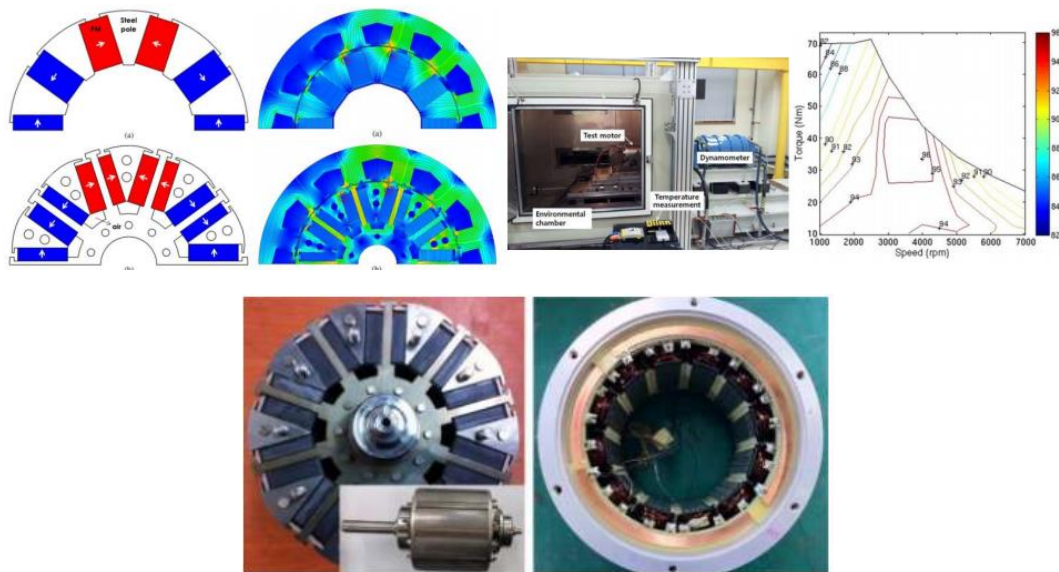
Companies/models	Year	Types of EMs	Companies/models	Year	Types of EMs
All EV models	1839–1989	DCM	VW CityStormer	1989	PM motor
Conceptor G-Van	1989	DCM	BMW 325	1992	PM motor
Fiat Panda Elettra	1990	DCM	BMW 316i	1995	PM motor
Bertone Blitz	1992	DCM	Toyota Prius	1997–2004 2010–2011	PM motor
Peugeot/Berlingo-Saxo	1995	DCM	Honda EV Plus	1997	PM motor
Peugot 106 – Partner	1999	DCM	Nissan Altra EV	1997	PM motor
Reva EV	2001	DCM	Toyota RAV4	1998	PM motor
Kewet Buddy	2007	DCM	Honda Insight	2000	PM motor
Nissan Micra HK10	1990	IM	Honda Civic HEV	2003–13	PM motor
Ford Ecostar	1992	IM	Ford Escape HEV	2005	PM motor
BMW 518i	1994	IM	Honda Accord	2006	PM motor
GM EV1	1996–9	IM	Toyota Camry	2007	PM motor
GM S-10	1997–8	IM	Chevrolet Tahoe	2008	PM motor
Ford Electric Ranger	1998–9	IM	Mitsubishi i-MiEV	2009	PM motor
Fiat Seicento Elettra	1998	IM	Chrysler Aspen	2009	PM motor
BMW X5	2003	IM	Volvo V70 PHEV	2009	PM motor
Ford Th!nk City	2008–10	IM	BMW ActiveE	2010	PM motor
Tesla Roadster	2008	IM	Nissan Leaf	2010	PM motor
Mini E	2009	IM	Chevrolet Volt	2011	PM motor
Micro-Vett Fiat 500	2009	IM	Ford Fusion HEV	2011	PM motor
Ford Focus EV	2010	IM	Peugot 308	2011	PM motor
REVA NXR	2011	IM	Saab 9-3 epower	2011	PM motor
Chevrolet Malibu Eco	2013	IM	Volvo C30 DRIVEe	2011	PM motor
Chloride Lucas	N/A	SRM	Audi A8	2012	PM motor
Holden /ECOMmodore	2000	SRM	Honda Jazz	2012	PM motor
Renault Kangoo	2003	SM	Toyota Prius PHEV	2012	PM motor
Renault Fluence ZE	2011	SM	Ford Focus	2012	PM motor
ABB	–	SynRM	Volkswagen Jetta	2013	PM motor
Brusa	–	PMaSRM	Lincoln MKZ	2013	PM motor

หมายเหตุ

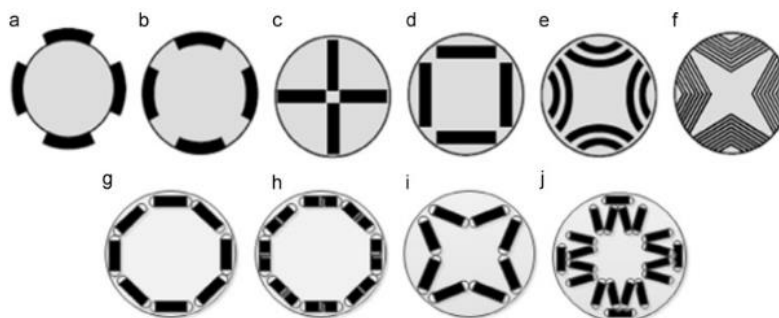
DCM	DC machine
IM	Induction Machine
SRM	Switched Reluctance Machine
SynRM	Synchronous Reluctance Machine

3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การศึกษาวิจัยด้านมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นเพื่อตอบสนองการใช้งานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต ต้องมีการออกแบบให้มีความเหมาะสมเพื่อเพิ่มกำลังให้มากขึ้น เกิดค่าความสูญเสียในมอเตอร์ลดน้อยลง รวมถึงคำนึงถึงการออกแบบด้านความปลอดภัย น้ำหนักเบา และลดต้นทุนของราคาของมอเตอร์ให้ถูกลง ตัวอย่างเช่น การวิจัยเพื่อศึกษาหาตำแหน่งการวางแท่งแม่เหล็กในตำแหน่งๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-17 และ 3-18 บนโรเตอร์เพื่อเปรียบเทียบค่าของการพาความร้อน และช่องว่างอากาศ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า spoke type ส่วนใหญ่ถูกออกแบบเพิ่มความเข้มข้นฟลักซ์ช่องอากาศ ดังนั้นการวางตำแหน่งแม่เหล็กถาวรไว้ตำแหน่งที่เหมาะสมนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และการออกแบบจะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการวางตำแหน่งของแม่เหล็กให้เหมาะสมก่อนการสร้างขึ้นจริงเพื่อช่วยลดปัญหาค่าผิดพลาด และช่วยลดต้นทุนในการสร้างมอเตอร์



รูปที่ 3-17 ภาพจำลองการวางตำแหน่งของแท่งแม่เหล็ก



รูปที่ 3-19 โครงสร้าง PM motor รูปแบบต่างๆ [15]

(a) Surface, (b) inset, (c) spoke, (d) single-barrier, (e) multiple-barrier, (f) axially-laminated, (g) conventional, (h) segmented, (i) V-shape and (j) W-Shape interior

3.7 เอกสารอ้างอิง

- [1] NPTEL, Introduction to Hybrid and Electric Vehicles. URL: <http://nptel.ac.in/courses/108103009/17>, accessed on 11 June 2017.
- [2] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, การควบคุมมอเตอร์, URL: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/electric4/topweek9.htm>, สืบค้นเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน 2560.
- [3] Tony Helms (2011)., Motor Brush Replacment – A Step by Step How To. URL: <https://experimentalev.wordpress.com/2011/03/22/motor-brush-replacment-how-to/>. Accessed on 11 June 2017.
- [4] Illustration of a simple electric motor., URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Electric_motor_cycle_2.png. Accessed on 11 June 2017.
- [5] Oriental motor, Speed Control Systems (Brushless Motor & AC Motor) Overview. URL: <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/speed-control-overview.html>. Accessed 11 June 2017.
- [6] Tim Urban (2015). How Tesla will change the world. URL: <http://waitbutwhy.com/2015/06/how-tesla-will-change-your-life.html>. Accessed on 12 June 2017.
- [7] ไพฑูรย์ เรืองเพ็ง. การแบ่งประเภทมอเตอร์ไฟฟ้า. URL: http://www.retc.ac.th/v3/kru_pitoon/1012560.pdf. สืบค้นเมื่อ 12 มิถุนายน 2560.
- [8] Frank J. Bartos, SR motor anatomy: See inside switched reluctance motors, Control Engineering, 12 March 2010. URL: <http://www.controlengueurope.com/article.aspx?ArticleID=32250>. Accessed 25 August 2012.
- [9] Infolytica coporation. Axial flux motor. URL: <http://www.infolytica.com/en/applications/ex0072/>. Accessed 25 August 2012.
- [10] Tim Woolmer. The YASA Electric Motor - an Oxford Invention. SOUE News, 2010. URL: <http://www.soue.org.uk/souenews/issue9/yasa.html>. Accessed 25 August 2012.
- [11] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย”. พ.ศ. 2558.

- [12] Ecomento. Nissan LEAF battery more reliable than combustion engines. URL: <http://ecomento.com/2015/03/23/nissan-leaf-ev-battery-reliability/>. Accessed on 13 June 2017.
- [13] อาคม รวมสุวรรณ (2557). แบตเตอรี่ล้าอนาคตของรถไฟฟ้า อีกไม่นานเกินรอ. URL: <https://www.thairath.co.th/content/400964>. สืบค้นเมื่อ 6 มิถุนายน 2560.
- [14] Bazzi AM. Electric machines and energy storage technologies in EVs and HEVs for over a century. In: Proceedings of the IEEE international electrical machines and drives conference. IEMDC, May; 2013. p. 212–19.
- [15] Soong WL, Han S, Jahns TM Design of interior PM machines for field-weakening applications. In: Proceedings of the international conference on electrical machines and systems. October; 2007. p. 654–64.

บทที่ 4

เทคโนโลยีวัสดุและโครงสร้างน้ำหนักเบา

โครงสร้างยานยนต์น้ำหนักเบาเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งในการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากน้ำหนักที่ลดลงจะช่วยลดอัตราสิ้นเปลืองพลังงาน ส่งผลให้ระยะทางขับขี่ต่อการอัดประจุหนึ่งครั้งเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนักของยานยนต์ที่ลดลงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.5 [1] และในด้านของการปลดปล่อยมลพิษ พบว่าน้ำหนักยานยนต์ที่ลดลง 100 กิโลกรัม ส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของยานยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลลดลง 3.5 กรัมต่อกิโลเมตร ตลอดอายุการใช้งานของยานยนต์ นอกจากนี้ น้ำหนักของยานยนต์ที่ลดลงส่งผลให้ความต้องการกำลังในการขับเคลื่อนและการเบรกลดลง ทำให้อายุการใช้งานไม่ต้องการต้นทุนกำลังและระบบขับเคลื่อนขนาดใหญ่

กระบวนการในการลดน้ำหนักยานยนต์มีหลายแนวทาง เช่น การใช้วัสดุขั้นสูงที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง การออกแบบโครงสร้างและชิ้นส่วนให้มีการรับแรงได้ดีที่สุดด้วยกระบวนการ Optimization เป็นต้น ซึ่งชิ้นส่วนหลักชิ้นหนึ่งที่มีน้ำหนักคิดเป็นหนึ่งในสี่ของน้ำหนักทั้งหมดของยานยนต์คือโครงสร้างหลัก (Body-in-white หรือ BIW) และเป็นชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ อีกทั้งยังเป็นชิ้นส่วนที่ช่วยดูดซับแรงกระแทกในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุอีกด้วย วัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตโครงสร้างหลักของยานยนต์ได้รับการวิจัยและพัฒนาจากในอดีตขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการใช้ไม้เปลี่ยนเป็นการใช้เหล็กหล่อ เหล็กกล้า เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel, HSS) อลูมิเนียม และวัสดุคอมโพสิต ถึงแม้ว่าในปัจจุบัน โครงสร้างหลักของยานยนต์ยังคงถูกผลิตจากเหล็กกล้ากว่าร้อยละ 50 แต่พบว่าการใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นจากในอดีตมากขึ้นอย่างมีนัย วัสดุทั้ง 2 ชนิดมีความเหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับโครงสร้างหลักของยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง และยิ่งไปกว่านั้นวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบามาก ขึ้นรูปที่ซับซ้อนได้ง่าย แต่ก็มีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และการออกแบบมีความซับซ้อน สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ถึงแม้จะมีราคาที่ถูกลง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการขึ้นรูปที่ซับซ้อน เนื่องจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ ทั้งนี้ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการรวบรวมความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีวัสดุคอมโพสิต ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อนมากกว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่มีใช้อย่างแพร่หลาย

4.1 ชนิดและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม

วัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite Material) หมายถึง วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จากการผสมกันจะมีสมบัติเริ่มต้นร่วมกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่

ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed Phase) ในเมทริกซ์นั้นหรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced Phase)

4.1.1 ชนิด และองค์ประกอบทางวิทยาศาสตร์ด้านกายภาพและด้านเคมีของวัสดุคอมโพสิต

4.1.1.1 การแยกประเภท

การแยกประเภทของวัสดุคอมโพสิตตามรูปร่างของวัสดุเสริมความแข็งแรง

- 1.) Particulate Composite วัสดุเสริมแรงมีลักษณะเป็นก้อนที่มีขนาดเท่าๆ กันในทั้ง 3 ทิศทาง
- 2.) Flake Composite วัสดุเสริมแรงมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ขนาดเท่าๆ กันใน 2 ทิศทาง มีความหนา (ทิศที่ 3) น้อยกว่าขนาดในทิศอื่นๆ
- 3.) Fiber-Reinforced Composite วัสดุเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กเมื่อเทียบกับความยาว นั่นคือมีขนาดที่สำคัญอยู่ในทิศทางเดียว
- 4.) Laminated Composite ถือเป็นวัสดุประกอบแบบผสม คือเกิดจากการนำวัสดุในรูปแบบแผ่นบางมาเรียงซ้อนกันและเชื่อมต่อเป็นแผ่นเดียว

การแยกประเภทของวัสดุคอมโพสิตตามชนิดของเมทริกซ์

- 1.) Polymer Matrix Composite (PMC) น้ำหนักเบา
- 2.) Metal Matrix Composite (MMC) นำความร้อนได้ดี
- 3.) Ceramic Matrix Composite (CMC) ทนต่อความร้อนและการกัดกร่อน

4.1.1.2 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต

ส่วนเสริมแรง (Reinforce) ในวัสดุคอมโพสิตส่วนมากจะใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง แบ่งเป็น 3 ประเภทคือ

1. วิสเกอร์ (Whisker) เป็นวัสดุที่เป็นผลึกเดี่ยวมีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างสูง มีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูงและมีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปแล้ววิสเกอร์จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก ยกตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์อะลูมินา เป็นต้น
2. ลวดเล็ก (Fine Wire) เป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์ ส่วนมากแล้วจะหมายถึงโลหะเช่นเหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสเตน ยกตัวอย่างการใช้งานเช่น ลวดเหล็กกล้าที่ใช้เสริมแรงในยางรถยนต์ หรือลวดเสริมแรงในตัวเคสของจรวด (Rocket Casing) เป็นต้น
3. เส้นใย (Fiber) เป็นเส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึก หรือเป็นอสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นพอลิเมอร์หรือเซรามิก ยกตัวอย่างเช่น อะรามิด (Aramid) แก้ว คาร์บอน โบรอนออกไซด์ และอะลูมินา เป็นต้น

เนื้อประสาน (Matrix) อาจเป็นได้ทั้งโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วมักมีความเหนียวที่ดี หน้าที่หลักของเมทริกซ์คือยึดไฟเบอร์ไว้ด้วยกัน และเป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากระทำไปยังไฟเบอร์ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของไฟเบอร์เนื่องจากการขีดถูหรือปฏิกิริยาเคมี แรงของพันธะยึดติด (Adhesive Bonding Force) ระหว่างไฟเบอร์กับเมทริกซ์ควรมีค่าสูงพอ เพื่อป้องกันการที่ไฟเบอร์จะถูกดึงหลุดออกจากเมทริกซ์

อีพอกซี (Epoxy) เป็นส่วนประสานชนิดหนึ่งซึ่งเป็นพลาสติกเหลว โดยทั่วไปจะแยกเป็นสองส่วน คือ ส่วน A ที่เป็นเนื้ออีพอกซี ทำมาจาก Bis-Epi Resin และส่วน B ที่เป็นส่วนทำแข็ง (Hardener) ส่วนมากจะทำมาจากอะมีน (Amine) หรืออะไมด์ (Amide) ซึ่งเมื่อผสมเข้าไปในเนื้ออีพอกซีแล้วจะให้สมบัติของอีพอกซีที่แตกต่างกัน เป็นต้นว่า เนื้ออีพอกซีที่ใช้อะมีนเป็นตัวทำแข็ง จะไม่ทนความร้อนและด่าง (Alkalies) แต่ทนความเย็นได้ถึง -200 องศาเซลเซียส เนื้ออีพอกซีที่ผสมกับอะไมด์จะมีสมบัติไม่ทนความเย็นเท่าที่ผสมกับอะมีน แต่ทนความร้อนได้ถึง 70 องศาเซลเซียส เนื้ออีพอกซีแข็งตัวแล้วจะไม่สามารถทำให้กลับไปสู่สภาพเดิมได้ อีพอกซีมีสมบัติในการยึดเกาะสูงและทนต่อแรงดึงมาก มีความทนทานต่อการใช้งาน (Toughness) มากกว่า อะคริลิก (Acrylic) แต่น้อยกว่า ยูรีเทน (Urethane) ที่ทนทานต่อการขีดถูมากที่สุด จึงนิยมนำไปเคลือบพื้น แต่อีพอกซีมีสมบัติพิเศษคือทนทานต่อสารเคมี กรด และด่างมากกว่า ถึงเก็บสารเคมีจึงใช้อีพอกซีหล่อเป็นเนื้อแล้วเสริมแรงด้วยใยแก้ว ข้อด้อยอีกอย่างหนึ่งคือ อีพอกซีไม่ทนต่อรังสียูวี (UV) จึงนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานภายในอาคาร ถึงอย่างไรก็ตามในตลาดก็มีผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานภายนอก เพราะได้มีการผสมสารเสริม (Additive) ที่ทำให้ทนทานต่อรังสียูวี ไม่แตกหรือเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในเวลาอันรวดเร็ว อีพอกซีทั่วไปเมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะมีความหนืดสูง เมื่อเทออกมาจากภาชนะจะมีส่วนติดค้างอยู่มาก การผสมควรเตรียมภาชนะที่มีปริมาตรมากพอที่จะผสมส่วน A และ B ได้ ไม่ล้น การผสมควรใช้เครื่องปั่นไฟฟ้ากวนเพื่อให้ทั้งสองส่วนเข้ากันอย่างทั่วถึง ถ้าไม่เช่นนั้นอีพอกซีอาจจะไม่แข็งตัวหรือแข็งเป็นบางส่วน อีพอกซีทั่วไปมีราคาสูงกว่าสารเคลือบ ชนิดอื่น บางร้านจึงแอบผสมตัวทำละลาย เช่น ไซลีน (Xylene) เพื่อให้มีราคาถูกลง แต่นั่นคือการที่ได้เนื้ออีพอกซีที่ลดลง อัตราการหดตัว (Shrinkage) จะสูง และจะไม่ได้สมบัติตามที่คาดหวังไว้

สมบัติทางกายภาพของอีพอกซี วัสดุที่ทำจากอีพอกซีจัดเป็น Thermosetting Polymer (หรือ Thermoset) หรือพอลิเมอร์ที่ผ่านการทำให้มีความเหนียวหรือความแข็งและไม่คืนรูปโดยการใช้ความร้อน (ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C หรือ 392 °F) การทำปฏิกิริยาเคมี หรือการใช้รังสี ในกระบวนการผลิตจะถูกเปลี่ยนสถานะจากของเหลวหรือของแข็งที่ถูกกักให้เป็นแผ่นบางได้ จากนั้นจึงใช้แบบหล่อ (Mold) ในการขึ้นรูปให้เป็นวัสดุที่ต้องการหรือใช้เป็นกาวหรือสารยึดติด สำหรับกาวอีพอกซีอาจเตรียมขึ้นเองจาก Two-Part Epoxy ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนักและอยู่ในรูปของเหลวบรรจุในหลอด 2 หลอด ก่อนใช้ให้นำมาผสมเข้าด้วยกัน จะได้กาวอีพอกซีที่มีลักษณะข้น หรือบางชนิดเป็นคล้ายดินน้ำมัน 2 ท่อนที่เมื่อผสมกันและอยู่ตัวแล้วจะมีความแข็งเหมือนเหล็ก ไม่มีการหดตัว สามารถตัด เจาะ กลึง หรือเลื่อยได้ กาวอีพอกซีแต่ละชนิดหาซื้อได้ตามร้านค้าวัสดุก่อสร้าง

โพลีเอสเทอร์เรซิน คือ พลาสติกหล่อชนิดหนึ่ง เกิดจากการรวมตัวเป็นโพลีเมอร์แบบ Condensation Polymerization ของสารประกอบจำพวกไกลคอล (Glycol) และไดเบสิกอะซิด (Dibasic Acid) โดยทั่วไป

แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ 1. ชนิดอิ่มตัว (Saturated Polyester Resin) และ 2. ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin) ซึ่งชนิดไม่อิ่มตัวเป็นเรซินที่จำหน่ายในปัจจุบัน

โพลีเอสเตอร์เรซินอยู่ในสภาพของเหลว หลังเกิดปฏิกิริยาความร้อนจะทำให้แข็งตัวเป็นพลาสติกแข็งที่ไม่สามารถแปรสภาพเป็นพลาสติกเหลวคืนรูปได้อีก เรียกพลาสติกชนิดนี้ว่า Thermosetting Plastic

สมบัติทางกายภาพของโพลีเอสเตอร์เรซิน ได้แก่ แข็ง ใส เหนียว สามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงกว่าพลาสติกแบบ Thermoplastic แต่เมื่อเทียบกับโลหะเรซินมีความแข็งแรงน้อยกว่ามาก อย่างไรก็ตามเมื่อเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา เหนียว ไม่เปราะและแข็งแรงกว่าโลหะเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักต่อน้ำหนักสมบัติทางไฟฟ้าของโพลีเอสเตอร์เรซิน มีสมบัติทางไฟฟ้าครบถ้วน สามารถใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ได้สมบัติทางเคมีของโพลีเอสเตอร์เรซิน สามารถทนการกัดกร่อนของสารเคมี และไม่เปราะสนิมการแข็งตัวของเรซิน

1. โดยการใช้ตัว Hardener หรือตัวทำให้แข็งและความร้อน
2. โดยการใช้ตัว Hardener หรือตัวทำให้แข็ง และ Accelerator หรือตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง
3. โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเลต
4. โดยการใช้อิเล็กตรอน
5. โดยการใช้แสงแดด
6. โดยการใช้ความร้อน เช่นการอบ หรือตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานานความร้อนที่อยู่ในภาชนะเก็บ เช่น ถัง ปิ๊บ แกลลอน หรือขวด ถึงเป็นอุณหภูมิอุ่นๆ แต่เมื่อใช้เวลานานได้ที่ เรซินก็จะแข็งตัวได้

องค์ประกอบต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของเรซิน

1. อุณหภูมิ อุณหภูมิสูงเรซินจะแข็งตัวได้เร็วขึ้น อุณหภูมิต่ำเรซินจะแข็งตัวช้าลง มีผลต่อเนื้องานหล่อ อัตราการแตกร้าว ผิวเรซิน และมีผลต่ออายุการเก็บของเรซิน
2. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา การผสมตัวเร่งที่มากขึ้นการแข็งตัวก็จะเร็วขึ้นการหดตัวเพิ่มมากขึ้น หากผสมตัวเร่งเกิน 2% เรซินจะมีเนื้อนิ่มขึ้น เพราะในตัวเร่งมีสารนิ่มเป็นองค์ประกอบอยู่ภายใน และหากผสมตัวเร่งน้อยการแข็งตัวจะช้าลง การหดตัวน้อยลง
3. ความชื้นและน้ำ มีผลต่อเวลาในการแข็งตัวที่ช้ามากขึ้น และมีผลต่อเนื้องานให้เนื้องานชุ่มน้ำมีฟองอากาศมากกว่าปกติ โดยทั่วไปแล้วควรมีปริมาณน้ำในเรซินไม่เกิน 0.05%
4. ปริมาณออกซิเจน ออกซิเจนเป็นตัวป้องกันการแข็งปริมาณออกซิเจนสูงมากๆ เช่น กวนเรซินนานการแข็งตัวจะช้าลง และยังใช้เป็นเทคนิคในการยืดอายุการเก็บเรซิน เช่น กลิ้งถังให้เกิดออกซิเจนก็จะยืดอายุการเก็บเรซินมีอีกกระยะหนึ่ง (อาจยืดได้ประมาณ 1-2 วัน)

กลุ่มการใช้งานของโพลีเอสเตอร์เรซินแบ่งเป็น

1. กลุ่มงานหล่อ (Casting) เช่น หล่อพระ ตุ๊กตา กระดุม ของชำร่วย หินอ่อนเทียม แก้วเทียม ฯลฯ
2. กลุ่มงานเคลือบ (Laminate) เช่น กรอบรูปวิทยาศาสตร์ งานเคลือบไม้ และเฟอร์นิเจอร์

3. กลุ่มงานขึ้นรูป (Molding) เช่น กลุ่มงานหล่อไฟเบอร์กลาส FRP (Fiberglass Reinforce Plastics)

ลักษณะของโพลีเอสเตอร์เรซินแบ่งออกเป็น

1. เรซินแบบ Promote และ Non Promote

แบบ Promote คือ เรซินชนิดที่มีการผสมตัวช่วยเร่ง หรือ Accelerator เมื่อใช้งานนำเรซินผสมตัวเร่งได้เลย แบบนี้ให้ความสะดวกในการใช้งานแต่มีอายุการเก็บที่สั้นกว่าแบบ Non Promote

แบบ Non Promote คือ เรซินชนิดที่ยังไม่มีการผสมสารช่วยเร่ง เมื่อใช้งานจะต้องผสมตัวช่วยเร่งด้วย เรซินแบบนี้สามารถประยุกต์สูตรการทำงานได้หลายสูตร มีอายุการเก็บที่นานกว่าแบบ Promote แต่อาจมีความยุ่งยากและมีขั้นตอนในการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น

2. แบ่งตามสมบัติของเนื้อเรซิน สามารถแบ่งได้ดังนี้

เรซินเกรดออร์โธ (Ortho Resin) เป็นกลุ่มพื้นฐานสำหรับใช้งานไฟเบอร์ทั่วไปมีอยู่หลายเบอร์ตามแต่ผู้ผลิต โดยมีสมบัติที่แตกต่างกันไป มีทั้งที่ผสมโคบอลต์แล้ว (Cobalt Naphthenate) ผสมแว็กซ์ (Wax) ผสมสารต้านรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Anti - UV) หรือตัวพื้นฐาน (Base) ที่ไม่ผสมอะไรเลย โดยปกติจะมีสีใสอมเหลือง แต่ถ้าผสมโคบอลต์แล้วจะมีสีออกชมพู - ม่วง

เรซินเกรดไอโซ (Iso Resin) เป็นกลุ่มที่ใช้สำหรับงานที่ต้องทนสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อน เช่น สารเคมี หรือน้ำทะเล มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับ Orthophthalic และวิธีการใช้งานลักษณะเดียวกันกับ Bisphenol A ฟูมาเรท (Bisphenol A fumarate) คลอเรดิก (Chloredics) ไวนิลเอสเตอร์ (Vinyl Ester) เป็นกลุ่มที่มีความแข็งแรงและมีสมบัติในการทนกรดหลายชนิดได้ดีกว่าเรซินเกรด Isophthalic จึงนิยมใช้ในงานประเภทถังเคมี เคลือบพื้นโรงงาน รวมไปถึงเรือและอุปกรณ์กีฬาทางน้ำอีกด้วย การแบ่งตามสมบัติของเนื้อเรซิน ได้แสดงการเปรียบเทียบสมบัตินี้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสมบัติของโพลีเอสเตอร์เรซินชนิดต่างๆ จากผู้ผลิต

Type of Polyester resin	Orthodontic Resin	Isophthalic Resin	Vinylester Resin	Bisphenol Resin	Epoxy Resin
Density (g/cm ³)	1.12	1.1-1.18*	1.14-1.15	1.17*	1.21
Geltime @ 25 °c (min)	5 - 8	20 - 45	30 - 50	30-60	60-120
Young's Modulus (GPa)	3.1392	8.829	6.83*	6.727*	3
Flexural Modulus (GPa)	N/A	8.7309	6.71985	7.3575	13.2
Elongation (%)	1.8	2.5	6	N/A	6.7
Tensile Strength (MPa)	53.955	98.1	112.815	107.91	83
Flexural Strength (MPa)	107.91	196.2	145.188	176.58	98

Compressive Strength (MPa)	166.77	196.2	121*	156.96	179
Barcol Hardness	85	55	53	47	N/A
heat distortion temperature (°C)	78	200 <	100	< 200	124
Price (Bath/kg)	75	150	200	175	120-130

*ข้อมูลจากผู้ผลิต

3. แบ่งตามลักษณะการใช้งาน สามารถแบ่งได้ดังนี้

High Reactive Type ชนิดปฏิกิริยาสูง (การแข็งตัวเร็ว) Middle Reactive Type ชนิดปฏิกิริยาปานกลาง (การแข็งตัวเวลายานกลาง) Low Reactive Type ชนิดปฏิกิริยาดำ (การแข็งตัวช้า) General Purpose (G) Type ชนิดธรรมดาทั่วไป Flexible Type ชนิดยืดหยุ่นตัวได้ Heat Resistant Type ชนิดทนความร้อน Corrosion Resistant Type ชนิดทนทานต่อสารเคมี Flame Retardant Type ชนิดไฟไม่ลุกลาม Low Shrinkage Type ชนิดหดตัวต่ำ Good Weather Ability Type ชนิดทนทานสภาพดินฟ้าอากาศ

ฟีนอลลิคเรซิน (Phenolic Resin) เป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่เกิดจากการผสมฟีนอล (Phenol) กับฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เข้าด้วยกัน แล้วให้ความร้อน และกลั่นเอาน้ำออกโดยกระบวนการควบแน่น (Condensation) จะได้สารเหนียวๆ ที่เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงแล้วจะแข็งตัวเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นวัสดุฉนวนหุ้มสายไฟ ต่อมาพอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกเรียกว่า เบคเคลไลต์ (Bakelite) ตามชื่อของ Baekleland หรือฟีนอลลิคเรซิน (Phenolic Resin) ตามชื่อของมอนอเมอร์ที่ใช้ (ฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์) โดยได้แสดงสมบัติดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ตารางแสดงสมบัติทางกลของ Phenolic Resin

Property	Phenolic Resin
Density (g/ml)	1.4 - 1.5
Tensile Strength (MPa)	100 - 140
Tensile Modulus (GPa)	5.5 - 7.5
Elongation @ Break (%)	1.8 - 2.5
Flexural Strength (MPa)	150 - 200
Flexural Modulus (GPa)	6 - 8
Izod Impact Strength (KJ/m ²)	65 - 75
Coeff. Thermal Expansion (°C x 10 ⁻⁶)	10 - 15
Coeff. Thermal Conductivity (W/m/K)	0.20 – 0.24
Temperature Index (BS6853)	> 420 °C

ไวนิลเอสเตอร์ (Vinylester) เป็นเรซินชนิดหนึ่งที่สามารถทนกรดต่างและสารเคมีบางชนิดได้และสามารถใช้ร่วมกับเส้นใยแก้วได้ การขึ้นรูปของไวนิลเอสเตอร์นั้นสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ เช่น Hand Lay-Up Spray-Up และกระบวนการพันเส้นใย (Filament Winding) ก็สามารถขึ้นรูปไวนิลเอสเตอร์สำหรับเสาไฟฟ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ใช้ในโครงการนี้ได้ทั้งนี้สมบัติทางกลของไวนิลเอสเตอร์เรซินจะแตกต่างกันเมื่ออยู่ในสภาวะที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4-3 และ 4-4

ตารางที่ 4-3 สมบัติของไวนิลเอสเตอร์เรซินเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว

Property of fluid at 25°C	
Dynamic Viscosity	370 mPa.s
Kinematic Viscosity	350 cSt
Styrene Content	45 %
Density	1.046 g/ml

ตารางที่ 4-4 สมบัติของไวนิลเอสเตอร์เรซินเมื่อถูกขึ้นรูปเป็นของแข็ง

Property of casting at 25 °C		Method
Tensile Strength	86 MPa	ISO 527
Tensile Modulus	3200 MPa	ISO 527
Tensile Elongation at Yield	5-6 %	ISO 527
Flexural Strength	150 MPa	ISO 178
Flexural Modulus	3400 MPa	ISO 178
Density	1.14 g/cm ³	ISO 1183
Volume Shrinkage	7.8 %	N/A
Heat Distortion Temperature	105 °C	ISO 75
Glass Transition Temperature	120 °C	ISO 11357
Barcol Hardness	35	EN 59

4.1.2 สมบัติของวัสดุคอมโพสิตทั่วไปที่ใช้ในงานโครงสร้างทางวิศวกรรม

วัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยเสริมแรงจะมีคุณสมบัติรวมกันทั้งความแข็งแรง และมอดูลัส ซึ่งเทียบเท่าหรือดีกว่าวัสดุโลหะหลายชนิด เนื่องจากวัสดุผสมมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ อัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงกับน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างค่ามอดูลัสกับน้ำหนักจะมีค่าที่มากกว่าอย่างเด่นชัดเมื่อนำมาเทียบกับโลหะ นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างความต้านทานความล้ากับน้ำหนัก ตลอดจนค่าความอดทนต่อความเสียหายที่เกิดจากความล้า ซึ่งโดยทั่วไปคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตจะขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงที่มากระทำอย่างยิ่งยวด

4.2 วัสดุคอมโพสิตใช้ในชิ้นส่วนยานยนต์

4.2.1 ชนิดของวัสดุที่ประกอบกันเป็นวัสดุคอมโพสิตในงานด้านยานยนต์ สมบัติเชิงกล และกระบวนการผลิตและขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์

คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) คือพฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุที่สามารถแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ สมบัติเชิงกลได้แก่

4.2.1.1 ความเค้น (Stress)

เป็นลักษณะของแรงต้านที่อยู่ภายในของโลหะ ที่มีความพยายาม ในการต้านทานต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุนั้นๆ โดยแบ่งชนิดของความเค้นได้เป็นดังนี้ คือ

1. Tensile Stress หมายถึง ความเค้นแรงดึงที่เกิดจากแรงดึงที่มากระทำต่อชิ้นงาน
2. Compressive Stress หมายถึงความเค้นแรงกด หรือ ความเค้นแรงอัด
3. Shear Stress หมายถึงความเค้นแรงเฉือน เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงเฉือน
4. Bending Stress หมายถึงความเค้นแรงดัด เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นต่อเมื่อชิ้นงานนั้นๆได้รับแรงดัด
5. Torsion Stress หมายถึงความเค้นแรงบิด เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงบิดกระทำต่อชิ้นงานนั้นๆ

4.2.1.2 ความเครียด (Strain)

เป็นความเครียดที่ปรากฏภายใต้แรงที่มากระทำต่อเนื้อของวัสดุ จนวัสดุเกิดรับแรงนั้นไว้ไม่ไหว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มากระทำ เช่น เกิดการยืดตัวออก (Elongation) หรือหดตัวเข้า (Contraction) โดยแบ่งชนิดของความเครียดได้เป็นดังนี้ คือ

1. Tensile Strain หมายถึง ความเครียดแรงดึงที่เกิดจากแรงดึงที่มากระทำต่อชิ้นงาน
2. Compressive Strain หมายถึงความเครียดแรงกด หรือ ความเครียดแรงอัด
3. Shear Strain หมายถึงความเครียดแรงเฉือน เป็นความเครียดที่เกิดจากแรงเฉือน

4.2.1.3 ความยืดหยุ่น (Flexible)

ความยืดหยุ่นก็คือการที่มีแรงจากภายนอกมากระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างชั่วคราว (Elastic Deformation) และเมื่อเราปล่อยแรงกระทำนั้นออกก็จะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เอง คุณสมบัติจะคล้ายๆกับการเป็นสปริงนั่นเอง

4.2.1.4 ความอ่อนตัว (Ductility)

เป็นสมบัติเชิงกลอย่างหนึ่ง ของวัสดุที่รับแรงกดหรือแรงอัด แล้วเกิดเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Elastic Deformation) โดยเฉพาะอาจเกิดการอ่อนตัว ดีแก่ให้เป็นแผ่นบางได้ดี ตัวอย่างเช่น ทองคำ

4.2.1.5 ความเปราะ (Brittleness)

เป็นสมบัติเชิงกลอย่างหนึ่ง ของวัสดุที่รับแรงเพียงเล็กน้อย แล้วเกิดการ ขาดออกจากกัน เช่น เหล็กหล่อ แก้ว เป็นต้น โดยจะคิดจากค่า 5% ของความเครียดเป็นหลักกล่าวคือวัสดุใดๆก็ตามที่เกิดการแตกหักก่อนค่า 5% ของความเครียด วัสดุนั้นก็จะมี ความเปราะมากนั่นเอง

4.2.1.6 ความเหนียว (Toughness)

เป็นสมบัติของวัสดุที่สามารถยืดตัวออกไปได้อย่างถาวร หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งจะคิดจากค่า 5% ของความเครียดเป็นหลักเช่นกัน

4.2.1.7 ความแข็งแรง (Strength)

หมายถึงความแข็งแรงตึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงกด หรือแรงอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) ซึ่งเราสามารถจะสังเกต ได้จาก Stress-Stain Curve ซึ่งตรงจุดแตกหัก (Breaking Point) นั้นเราจะเรียกกันว่า เป็นจุดความแข็งแรงที่จุดแตกหักนั่นเอง

4.2.1.8 ความแข็งเกร็ง (Stiffness)

หมายถึงสมบัติของวัสดุที่แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือต่อการเปลี่ยนรูปในช่วง Elastic limit ในขณะที่กำลังรับแรงนั้นๆ อยู่ค่าความแกร่งค่าความแกร่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของ Modulus of Elastic และค่า Rigidity

4.2.1.9 พลาสติกซีตี (Plasticity)

หมายถึงสมบัติของวัสดุที่สามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ โดยที่มิได้เกิดขาดหรือแตกหัก โดยเฉพาะจะมีความสำคัญมากในงาน Rolling Extruding และ Drawing เป็นต้น

4.2.1.10 ความล้า (Fatigue)

หมายถึงแรงที่กระทำต่อวัสดุเป็นจังหวะๆ หรือซ้ำๆ จนวัสดุนั้นเกิดการเปราะและแตกหักในภายหลัง

4.2.1.11 การคืบ (Creep)

หมายถึง การเกิดความเครียดอย่างถาวร (Permanent Set) อย่างซ้ำๆ ภายในเนื้อของวัสดุที่ต้องรับแรงทางกลเป็นเวลาดูต่อเนื่องเนิ่นนานและอุณหภูมิสูงๆ จนกระทั่งเนื้อของวัสดุนั้นๆ เกิดการเคลื่อนตัวของอะตอมภายในเนื้อของวัสดุจนกระทั่งเกิดการขาดจากกันไปในที่สุด

4.2.1.12 ฮิสเตอร์ซิสทางกล (Mechanical Hysteresis)

หมายถึงพลังงานที่ถูกสะสมอยู่ในเนื้อของวัสดุ อันเป็นสาเหตุมาจากวัสดุนั้นๆ ปลดปล่อยพลังงานที่รับไว้กลับออกมาไม่หมดจึงเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (Thermal Energy) ออกมาแทนนั่นเอง

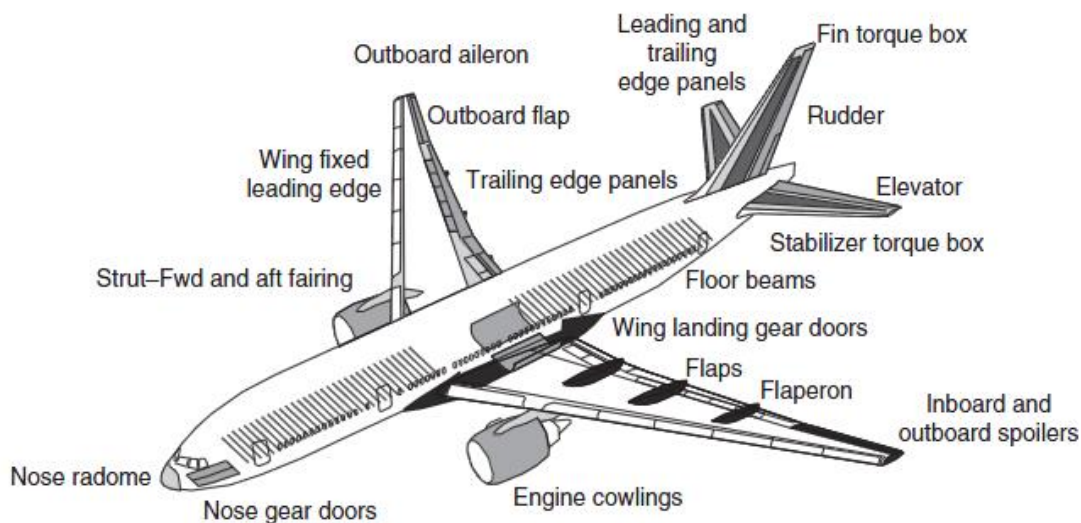
4.2.2 การประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิตในชิ้นส่วนยานยนต์

สมบัติของวัสดุคอมโพสิตสามารถออกแบบได้จากวัสดุองค์ประกอบ สัดส่วนระหว่างวัสดุองค์ประกอบ ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุองค์ประกอบ การเรียงตัวของสารเสริมแรง และการกระจายตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้มีส่วนทำให้สมบัติของวัสดุคอมโพสิตเป็นไปตามต้องการ ทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายสาขา คลอบคลุมตั้งแต่วัสดุสำหรับการใช้งานทั่วไป จนกระทั่งถึงวัสดุที่ใช้ในงานเฉพาะกิจที่ต้องการสมบัติพิเศษมากๆ

4.2.2.1 ด้านอากาศยานและเครื่องยนต์

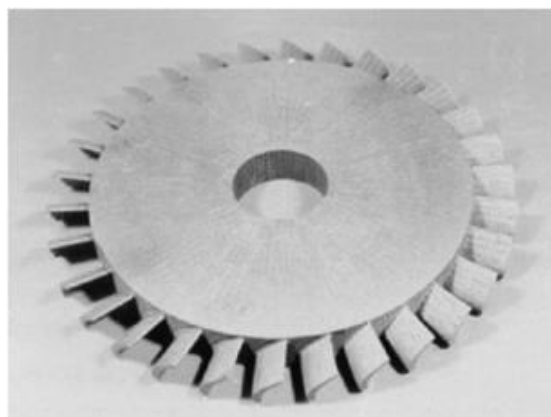
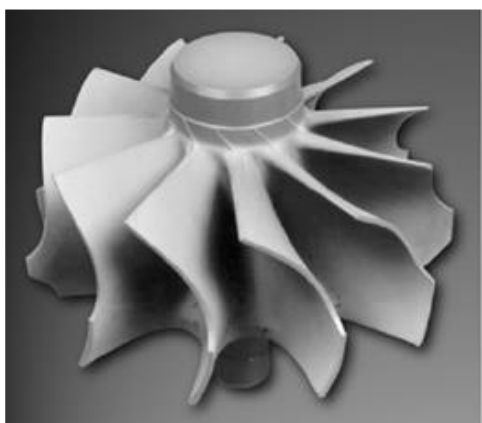
สมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงจำเพาะสูง หรือมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของวัสดุ จะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการขนส่งทางอากาศ เพราะถ้าน้ำหนักรวมของอากาศยานลดลงโดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลจะเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงในการขนส่งอย่างมาก และถ้าวัสดุที่ใช้มีความทนทานต่อการใช้งานจะมีประโยชน์ต่อการบำรุงรักษาในระยะยาวอีกด้วย ในระยะเริ่มต้นวัสดุคอมโพสิตถูกพัฒนามาเพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับเครื่องบินทหาร ดาวเทียม ต่อเนื่องมาจนถึงกระสวยอวกาศ และเครื่องบินพาณิชย์ในปัจจุบัน ทำให้สัดส่วนของวัสดุคอมโพสิตต่อวัสดุอื่นๆ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น [6]

พลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน ได้นำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักในโครงสร้างผิวของเครื่องบินทิ้งระเบิดรุ่นบี 2 (B2 Stealth Bomber) ทำให้มีสมบัติพิเศษที่ยากแก่การถูกตรวจจับ [2] และใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องบินพาณิชย์โบอิง 777 (รูปที่ 4-1 และโบอิง 787 นอกจากนี้พลาสติกเสริมแรงดังกล่าวนี้ยังนำมาใช้เป็นวัสดุทำตัวถังเครื่องบินพาณิชย์แอร์บัสเอ 380 ซึ่งเป็นเครื่องบินพาณิชย์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในปัจจุบัน [7]



รูปที่ 4-1 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ถูกใช้ในเครื่องบินพาณิชย์โบอิง 777

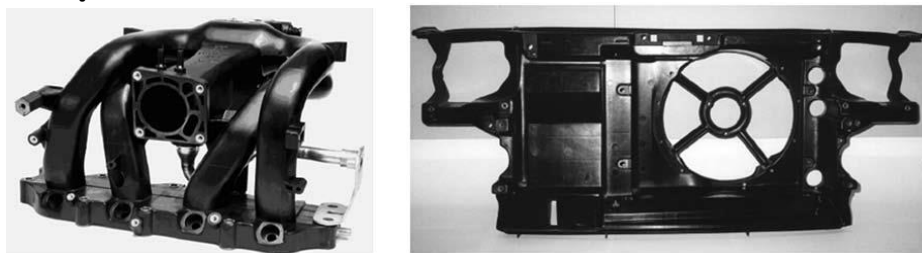
การค้นหาวัดที่มีสมบัติทนต่อความร้อนสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดีเพื่อใช้ผลิตอวกาศยานกลายเป็นแรงผลักดันให้เกิดการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตโลหะขึ้น โดยเมทริกซ์อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ได้นำมาใช้แทนที่อะลูมิเนียมในการผลิตเครื่องบินรบเอฟ 16 ทำให้มีความทนทานต่อการใช้งานมากขึ้น [3, 4] ด้านเครื่องยนต์สำหรับอวกาศยานเช่น เครื่องยนต์กังหันแก๊ส จะผลิตจากวัสดุคอมโพสิตโลหะซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถรักษาความแข็งแรงเฉพาะ ณ อุณหภูมิสูงได้ สำหรับเครื่องยนต์กังหันแก๊สบางรุ่น และท่อปล่อยแก๊สในเครื่องบินขนาดใหญ่อื่น ๆ อาจใช้วัสดุคอมโพสิตเซรามิกเป็นวัสดุในการผลิต (รูปที่ 4-2) เช่น เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์เสริมแรงเมทริกซ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ [5, 8] ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตเซรามิกที่เหนือวัสดุคอมโพสิตโลหะคือ สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากความร้อนต่ำและทนทานต่อสภาวะกัดกร่อน แต่ข้อด้อย คือ ความเปราะของเมทริกซ์เซรามิก



รูปที่ 4-2 วัสดุคอมโพสิตเซรามิกที่นำมาใช้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

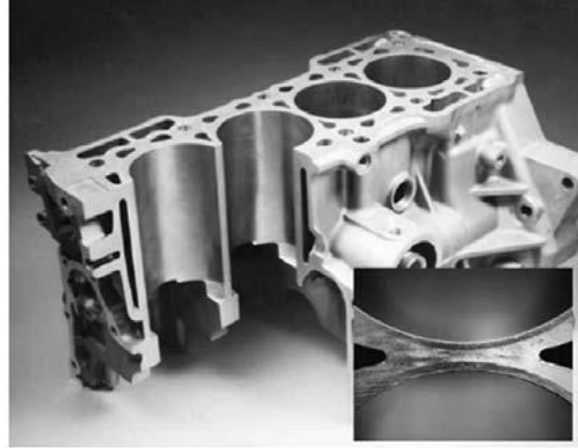
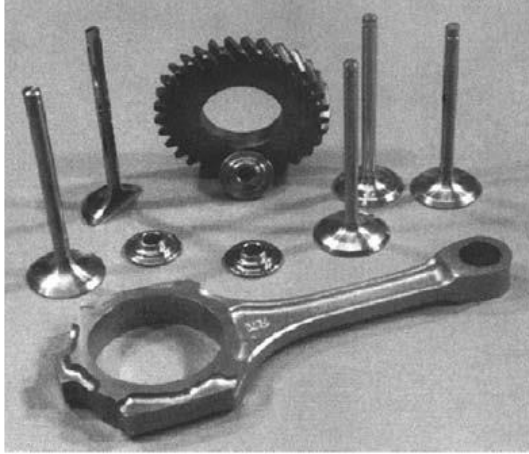
4.2.2.2 ด้านยานยนต์ เรือ และเครื่องยนต์

ข้อได้เปรียบของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ได้แก่ การมีความแข็งแรงสูง และสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนที่ซับซ้อนได้ ในระยะเริ่มต้นวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์นำมาใช้เป็นชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น แผ่นคันเร่ง วัสดุทำขอบยึดกระจก และขอบแผ่นกรองตามมาด้วยชิ้นส่วนกึ่งโครงสร้าง เช่น ห้องรวมท่ออากาศชิ้นส่วนในห้องเครื่องส่วนหน้า (รูปที่ 4-3) [9] และส่วนโครงสร้าง เช่น กันชน โครงสร้างร่วมในห้องโดยสาร เป็นต้น โดยชนิดของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์มีหลายชนิด ทั้งเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง ได้แก่ พอลิเอสเตอร์ อีพอกซี และเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก ได้แก่ พอลิพรพิลีน พอลิเอไมด์ และพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน เป็นต้น รวมทั้งลักษณะของสารเสริมแรงอาจอยู่ในรูปของเส้นใยสั้น หรือเส้นใยต่อเนื่องที่ถูกทอเป็นผืนซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการนำไปใช้ในแต่ละส่วน



รูปที่ 4-3 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในรถยนต์

ในด้านการผลิตเรือ วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์นำไปใช้เป็นวัสดุในการทำเรือขนาดเล็กมาตั้งแต่ยุคเริ่มต้นการผลิต เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งาน สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยมือ ต่อมาเมื่อวัสดุคอมโพสิตถูกพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีมากขึ้น จึงกลายเป็นส่วนประกอบสำหรับเรือโดยสารขนาดใหญ่จนถึงเรือรบ เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในการทำเรือได้แก่ พอลิเอสเตอร์ ไวนิลเอสเตอร์ และอีพอกซี โดยใช้เส้นใยแก้ว ชนิดเส้นใยสั้นและเส้นใยผืนเป็นสารเสริมแรง นอกจากนี้ ยังพบการใช้วัสดุคอมโพสิต พอลิเมอร์ประกบร่วมกับแกน ซึ่งเป็นวัสดุที่เบาและแข็งแรงเพื่อทำเป็นตัวเรือ ทำให้ได้เป็นแผ่นตัวเรือที่แข็งแรง มีน้ำหนักเบาและทนทานต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ มีการนำไปใช้เป็นวัสดุแทนที่เหล็กและเหล็กหล่อในการผลิตชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ (รูปที่ 4-4) [4, 10] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของลูกสูบเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากอัตราการขยายตัวจากความร้อนของวัสดุคอมโพสิตต่ำกว่าของโลหะ และมีการใช้วัสดุคอมโพสิตประเภทนี้เป็นวัสดุในระบบเบรก และเพลลา เนื่องจากทนทานต่อความล้าสูง



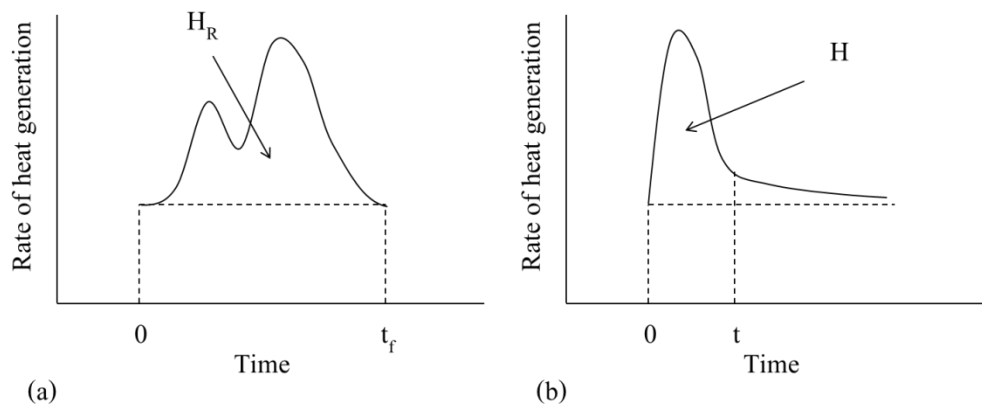
รูปที่ 4-4 วัสดุคอมโพสิตโลหะที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องยนต์

4.3 สมบัติของวัสดุคอมโพสิตในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

4.3.1 สมบัติทางการไหลตัว การบ่มตัว และการหดตัว ของวัสดุพื้นในวัสดุคอมโพสิต สมบัติความแข็งแรง และการยึดจับกับวัสดุพื้นของเส้นใย

การไหลตัวของยางเรซิน การไหลของยางเรซินผ่านโครงข่ายของเส้นใยแบบแห้ง (ใน Liquid Composite Molding [LMC]) หรือ Prepreg Layup (ในแม่พิมพ์แบบถุง) เป็นจุดวิกฤตในชิ้นส่วนที่ผลิตแบบปล่อย และเส้นใยแบบดี ในยางเรซินแบบเทอร์โมเซตการบ่มจะเกิดขึ้นพร้อมกับการไหลของยางเรซิน และถ้าความหนืดของยางเรซินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะทำการบ่ม การไหลของยางเรซินจะถูกยับยั้ง เป็นสาเหตุทำให้การยึดเกาะไม่เกิดผล

การบ่มตัว นักวิจัยได้ทำการทดลองวัดค่าความร้อนที่ค่อยๆ เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการบ่ม และได้ทำการเชื่อมโยงเข้ากับความร้อนของการบ่มในช่วงเวลาในกระบวนการบ่ม การทดลองนั้นได้ผลจากเครื่องวัดความร้อน (DSC) โดยใช้ชิ้นตัวอย่างขนาดเล็กซึ่งมีน้ำหนักเพียงไม่กี่มิลลิกรัม และให้ความร้อนแบบอุณหภูมิคงที่หรือแบบเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างคงที่แบบใดแบบหนึ่ง อุปกรณ์ภายในเครื่องวัดความร้อนจะแสดงอัตราของแหล่งกำเนิดความร้อนในรูปฟังก์ชันของเวลาและบันทึกไว้ในรูปที่ 4-5 แสดงรูปแบบกราฟของอัตราความร้อนของแบบที่อุณหภูมิคงที่และแบบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างคงที่



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงค่าอัตราความร้อน โดย (a) เป็นแบบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ และ (b) เป็นแบบอุณหภูมิคงที่

การหดตัว เป็นการลดปริมาณหรือขนาดเชิงเส้น สาเหตุที่ทำให้เกิดการหดตัวเนื่องจากการบ่มตลอดจนการหดตัวเนื่องจากความร้อน การหดตัวเนื่องจากการบ่มเกิดขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลโพลิเมอร์ ทำให้มวลชิดกันมากขึ้นในปฏิกิริยาการบ่ม การหดตัวเนื่องจากความร้อนเกิดขึ้นในช่วงเวลาเย็นตัวของปฏิกิริยาการบ่ม และอาจเกิดขึ้นได้ทั้งภายใน และภายนอกแม่พิมพ์

ปริมาณของการหดตัวสำหรับยางเรซินแบบอีพอกซีจะอยู่ในช่วง 1%-5% และสำหรับโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์จะอยู่ในช่วง 5%-12% การเพิ่มเส้นใยเข้าไปจะช่วยลดปริมาณของการหดตัวในยางเรซิน อย่างไรก็ตามในกรณีที่เส้นใยวางไปในทิศทางเดียวกัน การลดของการหดตัวจะเกิดขึ้นในแนวยาวมากกว่าในแนวขวาง

4.3.2 วัสดุเติมแต่งเพื่อปรับสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเพื่อการผลิตและการใช้งาน

4.3.2.1 การปรับปรุงเรซินให้มีสมบัติการทนไฟ (Flame Retardant)

สารต้านการลามไฟ (Flame Retardant) เป็นสารเคมีที่ใช้ใน Thermoplastics, Thermosets, สิ่งทอ และสารเคลือบที่ยับยั้งหรือต่อต้านการแพร่กระจายของไฟ สารต้านการลามไฟ (Flame Retardant) ใส่ผสมกับ โพลีเอทิลีน โพลีคาร์บอเนต โพลีเอไมด์ โพลีเอสเตอร์ และโพลิเมอร์อื่นๆ เพื่อจะเพิ่มความต้านทานต่อการติดไฟ ลดการแพร่กระจายของไฟ ยับยั้งการก่อตัวของควัน จุดประสงค์หลักของสารต้านการลามไฟก็เพื่อที่จะทำให้การติดไฟและการลุกลามของไฟช้าลง เพื่อที่จะมีเวลาให้คนที่อยู่ในบริเวณนั้นได้แก้ไขเหตุการณ์ได้ทัน ส่วนจุดประสงค์รองลงมา ก็คือเพื่อลดความเสียหายของทรัพย์สิน

พลาสติกที่มีส่วนผสมของสารต้านการลามไฟจะใช้ใน บ้านเรือน ตึกสำนักงาน รถยนต์ ยานพาหนะหนัก เพอร์นิเจอร์ ไฟเบอร์ และการใช้งานอื่นๆ โดยทั่วไปแล้วการใช้งานจะใช้กับงานที่ถูกบังคับจากข้อบังคับของอาคาร หรือมาตรฐานอุตสาหกรรม ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ใช้สารต้านการลามไฟเช่น ฉนวนผ้าเปดาน ตัวถังของพรม ผ้าในรถยนต์ ส่วนประกอบของรถไฟและเครื่องบิน วัสดุทำเต็นท์ ที่นั่งในสเตเดียม ส่วนของวิทยุและคอมพิวเตอร์ สายไฟ และอื่นๆ

ไฟจะติดได้ต้องมี เชื้อเพลิง ออกซิเจน และวัสดุที่ติดไฟ สารต้านการลามไฟจะใช้เป็นตัวขัดขวางการรวมตัวของสามสิ่งนี้ โดยจะเป็นทั้งตัวที่ทำให้สารเย็นต่ำกว่าจุดติดไฟโดยการฟอร์มตัวเป็นของแข็งหรือแก๊สเพื่อป้องกันออกซิเจน หรือเป็นตัวที่ก่อให้เกิดแก๊สเฉื่อยเพื่อให้เกิดการติดไฟได้น้อยลง การป้องกันแบบที่กล่าวมานี้สามารถทำได้โดยให้เย็นขึ้นโดยสารต้านการลามไฟจะทำปฏิกิริยากับธาตุในสถานะที่เป็นแก๊ส หรือป้องกันโพลิเมอร์โดยการก่อตัวขึ้นเป็นชั้นของคาร์บอนที่ผิว ในทางการค้าแล้วสารต้านการลามไฟจะมีส่วนผสมของโบรมีนกับคลอรีนหรือพวกที่มีฟอสฟอรัสเป็นหลัก หรืออีกพวกหนึ่งคือโลหะออกไซด์

Halogen Flame Retardant คอมพาวด์ที่ก่อให้เกิดฮาโลเจนโดยชนิดที่มีโบรมีนเป็นหลักพวกนี้โดยส่วนมากจะใช้เป็นตัวยับยั้งการลามไฟในพลาสติก พวกนี้จะทำปฏิกิริยาคายความร้อนโดยการดึงอนุมูลอิสระหลังจากมันฟอร์มตัวขึ้นมา ซึ่งจะทำให้ลดแก๊สที่ทำให้ติดไฟ ถ้าคำนึงถึงเรื่องประสิทธิภาพและราคาเป็นหลักคอมพาวด์ที่มีส่วนผสมของโบรมีนจะเป็นตัวที่ดีกว่าตัวอื่น ถ้าคำนึงถึงสมบัติด้านความแข็งแรงและการ

ยืดหยุ่น (Tensile and Elongation) เป็นสิ่งสำคัญแล้ว ก็ควรจะใช้เฟลมรีทาร์แดนท์ประเภทโบรมีน เพราะว่าพวกนี้จะให้เรซินยังคงสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านกายภาพคงไว้ และยังคงดีในการขึ้นการแปรรูปด้วย โดยเฉพาะพวกโพลีเอทิลีนและพวกโพลีพร็อพิลีนฟิล์มสารด้านการลามไฟพวกคลอรีนจะใส่เข้าไปในมาสเตอร์แบทช์ เช่น พาราฟินที่ทำให้เกิดคลอรีน (Chlorinated Paraffin) หรือพวกที่มีโครงสร้างเป็นไซโคลอะลิฟาติก (Cycloaliphatic) สารด้านการลามไฟพวกคลอรีนจะมีราคาต่ำกว่าพวกสารด้านการลามไฟพวกโบรมีน และทนทานต่อแสงได้ดีกว่าพวกโบรมีน แต่ทนทานต่อความร้อนได้ต่ำกว่าพวกโบรมีน และกีดกอนต่ออุปกรณ์มากกว่าพวกโบรมีน สารด้านการลามไฟ พวก Chlorinated Cycloaliphatic จะมีความต้านทานอุณหภูมิได้สูงกว่าพวกพาราฟินเกรด และพวกนี้สามารถใช้ได้ถึงอุณหภูมิ 320°C การที่จะใช้สารด้านการลามไฟพวกโบรมีน และคลอรีน จะต้องใส่สารตัวเร่งเข้าไปในสูตร ซึ่งในสูตรของมาสเตอร์แบทช์มักจะใช้ Antimony Trioxide ถึงแม้ว่าจะมีตัวอื่นที่ใช้ได้เช่นพวก Zinc Borate และ Zinc Molybdate ตัวเร่งพวกนี้จะไม่มีความปฏิกิริยาต่อการเกาะยึดของสารด้านการลามไฟ ตัวเร่งยังช่วยกันการลามไฟด้วย โดยการฟอร์ม Antimony Trihalides และ Antimony Oxyhalides ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในสถานะแก๊ส

Non-Halogen Flame Retardant สารด้านการลามไฟที่ไม่ก่อให้เกิดฮาโลเจนจะมีสองพวกคือที่เป็นแบบฟอสฟอรัส หรือเรียกว่า Char Former ส่วนอีกพวกหนึ่งคือพวกโลหะออกไซด์ หรือเรียกว่า Endothermic สารด้านการลามไฟที่เป็นพวกฟอสฟอรัสเป็นหลักจะเป็นพวก Organic, Inorganic หรือ สารประกอบ Elemental Phosphorus ซึ่ง จะ รวม ไป ถึง Organic Phosphate Esters, Phosphates, Halogenated Phosphorus Compounds, และ Inorganic Phosphorus-Containing Salts พวกนี้จะทำให้สารด้านการลามไฟมีสมบัติที่แตกต่างกันไป เช่น บางพวกจะขจัดไฮโดรเจนและไฮโดรออกไซด์ในสภาวะของก๊าซ หรือบางพวกจะให้กรดฟอสฟอริกออกมาเมื่อมีการลุกไหม้ ซึ่งกรดพวกนี้จะไปจำกัดการย่อยสลายของพวกโพลีเมอร์ต่อไป ถึงแม้ว่าสารด้านการลามไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นหลักจะใช้ได้ดีมากในโพลีเมอร์ และพวกนี้จะสลายตัวที่อุณหภูมิการผลิตสูงกว่า 400 F แต่จะให้พวกกรดฟอสฟอริกออกมาจะมีผลให้สมบัติของโพลีเมอร์ต่ำลงไป โลหะพวกที่เป็นไฮดรอกไซด์โดยมากจะใช้เป็นสารด้านการลามไฟที่ไม่เกิดฮาโลเจน หรือ Non-Halogenated Flame Retardants อลูมินัมไตรไฮเดรต (Aluminum Trihydrate) จะมีราคาถูกและมีอยู่มาก Aluminum Trihydrate จะฟอร์มตัวเป็นอลูมินัมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 180°C ถึง 200°C แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ก็มีผลคล้ายกับอลูมินัมไตรไฮเดรต แต่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัวที่ 300°C ข้อด้อยที่เกิดขึ้นในขบวนการผลิตของพวกโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น การผลิตฟิล์มจะต้องมีการเติมสูงถึง 65% ซึ่งจะไปกระทบกับสมบัติทางกลของโพลีเมอร์และความสามารถในการขึ้นรูปของโพลีเมอร์ด้วยตัวเคมีอื่นๆ ก็จะส่งผลต่อการลามไฟในโพลีเมอร์ด้วย

ประเภทของสารหน่วงไฟ (Classification of Flame Retardants)

การใช้สารหน่วงไฟเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดการเกิดอัคคีภัยได้ โดยจะไปขัดขวางกระบวนการลุกไหม้ให้เกิดขึ้นน้อยลง สารหน่วงไฟสามารถแบ่งได้หลายประเภท เช่น

1. สารหน่วงไฟที่จำแนกตามความคงทน

สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน (Nondurable Flame Retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ กรดอินทรีย์ เช่น กรดบอริก กรดฟอสฟอริก และซิงค์คลอไรด์ หรือเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียม

คาร์บอน แต่เนื่องจากกรดและเบสจะทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อน ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้ว มักนิยมใช้สารหน่วงไฟในรูปของเกลือมากกว่า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ยูเรียฟอสเฟต และแอมโมเนียมซัลฟา-เมต

สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน (Semidurable Flame Retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เกลือของกรดอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เกลือฟอสเฟตหรือเกลือโบเรตของโลหะดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม รวมทั้งเกลือที่มีไอออนของพอลิฟอสเฟตน้ำหนักโมเลกุลสูง สารหน่วงไฟประเภทนี้ยังมีความคงทนภายหลังการซักล้าง 20 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์ผ้าปูที่นอน เคาะสิ่งทอ และพรม เป็นต้น

สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง (Durable Flame Retardant) สารหน่วงไฟประเภทนี้จะมีฟอสฟอรัสหรือฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบหรือเป็นสารประกอบประเภท Organophosphorus สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนภายหลังการซัก 50 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า

2. สารหน่วงไฟที่จำแนกจากองค์ประกอบ มีดังนี้

สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน (Halogen-Based Flame Retardants) เลือกใช้เรซินที่มีการสังเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลให้มีกลุ่มฮาโลเจน เช่น โบรมีน เป็นต้นคอมพาวด์ที่ก่อให้เกิดฮาโลเจนโดยชนิดที่มีโบรมีนเป็นหลัก พวกนี้โดยส่วนมากจะใช้เป็นตัวยับยั้งการลามไฟในพลาสติก พวกนี้จะทำปฏิกิริยากายความร้อนโดยการดึงอนุมูลอิสระหลังจากมันฟอร์มตัวขึ้นมา ซึ่งจะทำให้ลดแก๊สที่ทำให้ติดไฟ ถ้าคำนึงถึงเรื่องประสิทธิภาพและราคาเป็นหลักคอมพาวด์ที่มีส่วนผสมของโบรมีนจะเป็นตัวที่ดีกว่าตัวอื่น ถ้าคำนึงถึงสมบัติด้านความแข็งแรงและการยืดหยุ่น (Tensile and Elongation) เป็นสิ่งสำคัญแล้วควรจะใช้เฟลมรีทาร์แดนท์ประเภทโบรมีน เพราะว่าพวกนี้จะให้เรซินยังคงสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านกายภาพคงไว้ และยังคงดีในการขึ้นการแปรรูปด้วยโดยเฉพาะพวกโพลีเอทิลีนและพวกโพลีโพรพิลีนฟิล์ม เฟลมรีทาร์แดนท์พวกคลอรีนจะใส่เข้าไปในมาสเตอร์แบทช์เช่น พาราฟฟินที่ทำให้เกิดคลอรีน (Chlorinated Paraffin) หรือพวกที่มีโครงสร้างเป็นไซโคลอะลิฟาติก (Cycloaliphatic) ในแง่ที่พวกกลุ่มของ Isocyanate ที่มีการสร้างพันธะยึดเหนี่ยวโดยตรงกับอนุมูลอิสระของ Cycloaliphatic Hydrocarbon (เช่น Cyclohexane) เฟลมรีทาร์แดนท์พวกคลอรีนจะมีราคาต่ำกว่าพวกเฟลมรีทาร์แดนท์พวกโบรมีน และทนทานต่อแสงได้ดีกว่าพวกโบรมีน แต่ทนทานต่อความร้อนได้ต่ำกว่าพวกโบรมีน และกัดก่อนต่ออุปกรณ์มากกว่าพวกโบรมีนเฟลมรีทาร์แดนท์ พวก Chlorinated Cycloaliphatic จะมีความต้านทานอุณหภูมิได้สูงกว่าพวกพาราฟฟินเกรด และพวกนี้สามารถใช้ได้ถึงอุณหภูมิ 320°C การที่จะใช้เฟลมรีทาร์แดนท์พวกโบรมีน และ คลอรีน จะต้องใส่สารตัวเร่งเข้าไปในสูตร ซึ่งในสูตรของมาสเตอร์แบทช์มักจะใช้ Antimony Trioxide ถึงแม้ว่าจะมีตัวอื่นที่ใช้ได้เช่นพวก Zinc Borate และ Zinc Molybdate ตัวเร่งพวกนี้จะไม่มีการปฏิกิริยาต่อการเกาะยึดของเฟลมรีทาร์แดนท์ ตัวเร่งยังช่วยกันการลามไฟด้วย โดยการฟอร์ม Antimony Trihalides และ Antimony Oxyhalides ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในสถานะแก๊ส

สารหน่วงไฟประเภทที่ไม่ก่อให้เกิดฮาโลเจน (Non-Halogen Flame Retardant)

- สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส (Phosphorus-Based Flame Retardants)

- สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ (Inorganic Salt Flame Retardants) เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum Hydroxide, $\text{Al}(\text{OH})_3$), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และ สารประกอบโบรอนเป็นต้นซึ่งก็คือการเลือกเติม Additive จำพวก Flame Retardant ซึ่งในกลุ่มนี้จะมีหลายตัว แต่มีลักษณะเป็นผง เช่น ATH, MDH, ฟอสเฟต เป็นต้นซึ่งได้แสดงสมบัติทางกลของ ATH เทียบกับ MDH ดังตารางที่ 4-5

- สารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจน (Nitrogen-Based Flame Retardants)

ตารางที่ 4-5 ตารางแสดงสมบัติทางกลของ ATH เทียบกับ MDH

Property	ATH	MDH
Physical Form	Powder	Powder
Particle Morphology	Hexagonal platelet	Hexagonal platelet
Color	White	White
Specific Gravity, (g/cm^3)	2.42	2.36
pH Value	9 - 10	10 - 11
Mohs Hardness	2.5 - 3.5	2.0 - 3.0
Refractive Index	1.57	1.58
Decomposition Temperature	220°C / 428°F	330°C / 626°F
Heat of Decomposition, (cal/g)	280	328
Theoretical Loss on Ignition, (%)	34.60%	31.00%

กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ (Flame Retardant Mechanisms) สารหน่วงไฟจะเข้าไปก่อกวนกระบวนการลุกไหม้ของผ้าหรือสิ่งทอไม่ให้ลุกไหม้ได้ปกติ สามารถอธิบายตามทฤษฎีต่างๆดังนี้

Endothermic Theory (Thermal Theory) ทฤษฎีนี้ สารหน่วงไฟจะดูดความร้อนบางส่วนจากระบบไปทำให้สารหน่วงไฟเกิดการสลายตัวในรูปของการหลอมเหลวหรือการระเหิด ซึ่งจะทำให้เส้นใยได้รับความร้อนน้อยลงจนไม่สามารถร้อนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดการเผาไหม้ได้

Gas Theory ทฤษฎีนี้ สารหน่วงไฟที่เมื่อติดไฟแล้วจะสลายให้แก๊สที่ติดไฟยากหรือแก๊สที่ไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไอน้ำ ทำให้เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ได้

Melt Theory ทฤษฎีนี้ สารหน่วงไฟที่โดนความร้อนแล้วจะหลอมละลายปกคลุมพื้นผิวเส้นใย ทำให้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกปล่อยออกมายาก และยังทำให้อากาศหรือออกซิเจนไม่สามารถแทรกเข้าไปในเส้นใยได้อีกด้วย เส้นใยจึงไม่เกิดการเผาไหม้

Radical Capture Theory ทฤษฎีนี้สารหน่วงไฟที่โดนความร้อนแล้วจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยเซลลูโลส เช่น H OH กลายเป็นแก๊ส ซึ่งทำให้ปฏิกิริยา Free-Radical Chain Propagation สิ้นสุด การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง

Dehydration Theory ทฤษฎีนี้สารหน่วงไฟที่ใช้สำหรับเส้นใยเซลลูโลสจะไปทำให้เส้นทางการสลายตัวของเส้นใยเซลลูโลสเปลี่ยนแปลง จากเดิมที่เคยสลายตัวให้อิโอะและแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้การลุกไหม้ดำเนินต่อไปนั้นเปลี่ยนเป็นการสลายตัวที่เกิดแต่ถ่านคาร์บอน และน้ำหรืออีกวิธีหนึ่ง คือเลือกใช้เรซินชนิดที่มีความสามารถในการทนไฟได้สูง เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) เป็นต้น

4.3.2.2 เจลโค้ท (Gel Coat)

เจลโค้ท (Gel coat) คือส่วนที่ปิดผิวหน้าของชิ้นงาน หรือสีผิวของชิ้นงาน นั้นเอง โดยวัตถุดิบจะมีลักษณะเหลวข้นคล้ายกาวแป้งเปียก ซึ่งสามารถผสมกับสีผสมเรซินให้เป็นสีต่างๆ ได้ โดยจะช่วยให้ชิ้นงานมีสีที่เงางามมากขึ้น ส่วนประกอบของเจลโค้ทนั้นมีดังนี้

1. โพลีเอสเตอร์เรซิน เป็นส่วนประกอบที่มีอัตราส่วนสูงที่สุดในจำนวนส่วนประกอบทั้งหมด
2. ผงเบา (Fumed Silica) มีสมบัติเป็น Thixotropic ช่วยป้องกันการไหลของเจลโค้ทหรือเรซินไม่ให้ไหลมากองอยู่ส่วนล่างของแม่แบบเมื่อทำการพ่นหรือทาในแนวตั้ง และสามารถเกาะยึดเข้ากับผิวของแม่แบบ (Mold) ดีกว่า เนื่องจากทำให้มีลักษณะเข้มข้นกว่าโพลีเอสเตอร์เรซินแบบธรรมดา อีกทั้งยังช่วยให้ผิวเรียบเนียนขัดแต่งได้ง่าย
3. สารเพิ่มประสิทธิภาพ หรือสารปรุงแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติพิเศษ (Additives) สารส่วนใหญ่ที่นิยมผสมลงในเจลโค้ทนั้นมีอยู่ 2 ชนิด คือ ตัวกันตกตะกอนและโมโนแว็กซ์หรือวานิชเบอร์ 1
4. ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือโคบอลท์ (ตัวม่วง)

เจลโค้ทนั้นเมื่อใช้ในงานพ่นอาจจะมีกลิ่นเหม็นไปส่งผลให้พ่นไม่ออกนั้นจะต้องผสมโมโนสไตรีนประมาณ 10 - 20 % เพื่อให้เจลโค้ทนั้นมีความเหลวมากขึ้น

คุณสมบัติของเจลโค้ทที่สำคัญ คือ ให้ความสวยงาม มีสีใส มีความคงทนต่อดินฟ้าอากาศ ทนความร้อนและความเย็นได้ค่อนข้างสูง มีความยืดหยุ่นมากพอสมควร เป็นส่วนที่ปกป้องผิวชิ้นงาน

4.3.2.3 สีเรซิน

สีเรซิน คือสีที่ผสมลงในเจลโค้ทเพื่อให้มีสีต่างๆ โดยอัตราส่วนผสมลงในเจลโค้ท หรือโพลีเอสเตอร์นั้นอยู่ที่ประมาณ 15 - 20 % โดยน้ำหนัก

วิธีการทดสอบว่าสีที่ผสมลงไปนั้นมีความเข้มข้นพอดีหรือไม่ จะทำการทดสอบโดยใช้ไม้ป้ายเจลโค้ทที่ผสมสีแล้วบนกระดาษหนังสือพิมพ์ให้มีความหนาประมาณ 0.5 มม. หากว่าความเข้มข้นของสีใช้ได้จะมองเห็นตัวหนังสือข้างล่าง หากว่ายังเห็นตัวหนังสืออยู่ควรเติมสีลงไปอีก แต่ไม่ควรเติมเกินปริมาณที่กำหนดไว้โดยสีที่ใช้นั้นควรเป็นสีเฉพาะที่ใช้กับโพลีเอสเตอร์เท่านั้น

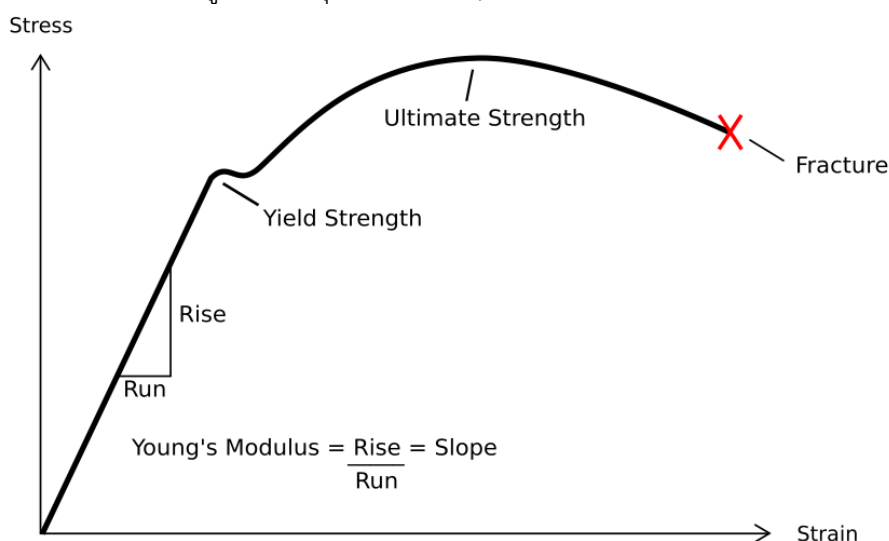
4.3.2.4 UV Stabilizer หรือ UV light Absorbers

เป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่ผสมลงไปในเรซินสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทำงานกลางแจ้ง เพื่อป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ที่ทำให้วัสดุนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยเป็นสารที่มีการดูดซับรังสีของอัลตราไวโอเล็ตจากการแผ่ได้ดี และมีความสามารถในการส่งผ่านพลังงานที่ดูดซับจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนโดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญของ UV Stabilizer

4.4 สมบัติของวัสดุคอมโพสิตต่อการรับภาระทางกลในส่วนยานยนต์

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของวัสดุคอมโพสิต เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship) ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 4-6 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 4-6 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [12]

4.4.2 กลศาสตร์ของวัสดุ และกลเม็ดในการออกแบบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงกลเม็ดโดยทั่วไป และการคำนวณที่เป็นประโยชน์แก่ผู้ออกแบบ/ผู้ใช้วัสดุ

4.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงระหว่างปริมาตร และสัดส่วนของน้ำหนัก

กระบวนการของเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกโดยส่วนใหญ่ และแสดงผลในรูปของน้ำหนัก และ/หรือ ปริมาตรของเส้นใยและยางเรซิน ยังรวมไปถึงการคำนวณสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการ และประเมินคุณสมบัติของ วัสดุ เมื่อทราบสัดส่วนของค่าปริมาตรของเส้นใยและเมทริกซ์ จะสามารถหาค่าสัดส่วนน้ำหนักได้ดังนี้

$$W_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m} \quad (4.1)$$

$$W_m = \frac{V_m \rho_m}{V_f \rho_f + V_m \rho_m} \quad \text{หรือ} \quad W_m = 1 - W_f \quad (4.2)$$

เมื่อ W_f คือ น้ำหนักของเส้นใย, V_f คือ ปริมาตรของเส้นใย, V_m คือ ปริมาตรของเมทริกซ์แบบเรซิน ρ_f คือ ความหนาแน่นของเส้นใย ρ_m คือ ความหนาแน่นของเมทริกซ์แบบเรซิน ถ้าเราทราบค่าน้ำหนักของเส้น ใยและเมทริกซ์ ค่าปริมาตรจะสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_f / \rho_f + W_m / \rho_m} \quad (4.3)$$

$$V_m = \frac{W_m / \rho_m}{W_f / \rho_f + W_m / \rho_m} \quad \text{หรือ} \quad V_m = 1 - V_f \quad (4.4)$$

เมื่อ W_m คือ น้ำหนักของเมทริกซ์แบบเรซิน

การใช้งานสารเติมแต่ง

สารเติมแต่ง เช่น รงควัตถุ มักจะถูกเติมในวัสดุคอมโพสิตเพื่อลดน้ำหนัก หรือเติมสี ซึ่งในบทนี้การ เปลี่ยนแปลงระหว่างสัดส่วนของน้ำหนักและปริมาตรจะรวมไปถึงสารเติมแต่งนี้ด้วย จากสมการ 4.1 จะได้ว่า

$$W_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m + V_a \rho_a} \quad (4.5)$$

เมื่อ V_a คือ ปริมาตรของสารเติมแต่ง และ ρ_a คือ ความหนาแน่นของสารเติมแต่ง และจากสมการที่ 4.3 จะได้ว่า

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_f / \rho_f + W_m / \rho_m + W_a / \rho_a} \quad (4.6)$$

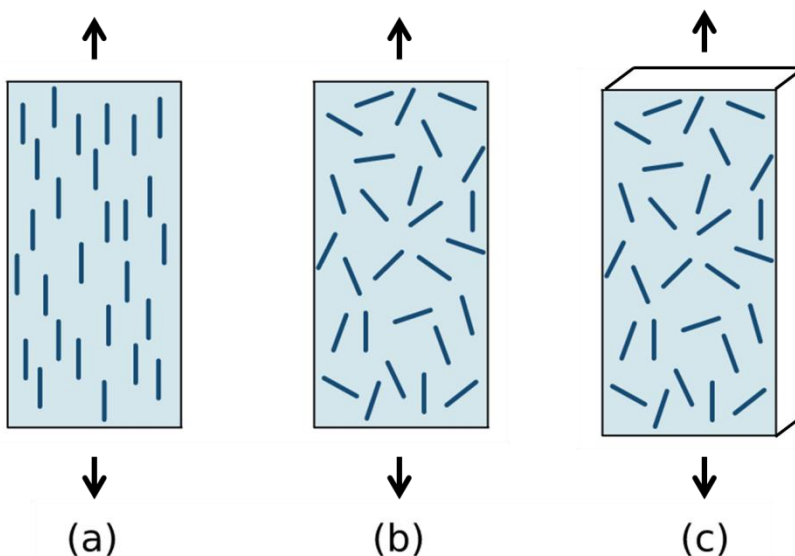
4.4.2.2 การทำนายค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงของเส้นใยคอมโพสิตแบบไม่ต่อเนื่อง และต่อเนื่อง

○ เส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง

โดยพื้นฐานของการทำนายค่าความแข็งแรง, อัตราส่วนของปัวซอง และค่าความแข็งแรงของเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น คอมโพสิต SMC, LET และ GMT) จะเป็นการผสมผสานของกลศาสตร์จุลภาค และกลศาสตร์มหภาค

- ค่าความแข็งแรงของแผ่นที่มีเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง

ค่าความแข็งแรงของแผ่นที่มีเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องไปในทิศทางเดียวกัน (รูปที่ 4-7(a)) สามารถหาได้จากสมการของ Halpin-Tsai



รูปที่ 4-7 Typical Discontinuous Fibers: (a) Oriented Discontinuous Fibers; (b) 2D Randomly Oriented Discontinuous Fibers; และ (c) 3D Randomly Oriented Discontinuous Fibers. [11]

ส่วนพวกลอการิติกจะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.7 ถึงสมการที่ 4.14 สมการเหล่านี้จะถูกใช้ในการในการคำนวณค่าความแข็งแรงของแผ่นที่มีทิศทางของเส้นใยหันไปในทิศเดียวกัน ค่าความแข็งแรงมักถูกใช้เพื่อคาดคะเนรูปทรงทางเรขาคณิตของเส้นใยเสริมแรง

โดยสมการเหล่านี้จะมีสมมติฐานได้แก่

1. เส้นใยเป็นแบบกลม
2. เส้นใยถูกเรียงตัวอยู่แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส
3. เส้นใยต้องกระจายตัวในลักษณะเดียวกันในเมทริกซ์
4. ทั้งเส้นใย และเมทริกซ์เป็นแบบลักษณะเดียวกัน และอีลาสติกแบบเส้นตรง

5. เส้นใย และเมทริกซ์ต้องเป็นอิสระต่อกัน
6. ส่วนที่สัมผัสกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์จะต้องพอดีกัน
7. เส้นใยจะต้องแยกออกจากกันโดยสมบูรณ์

ในการทำนายจะใช้การพิจารณาค่าอัตราส่วนของรูปร่างของเส้นใย (l/d) ซึ่งสามารถนำมาจำแนกค่าได้ โดยที่ค่าอัตราส่วนของรูปร่างของเส้นใยเท่ากับ 1 จะเรียกว่า ขอบเขตล่าง สำหรับเส้นใยแบบต่อเนื่องค่าอัตราส่วนนี้จะมีค่านันต์ซึ่งจะเรียกว่า ขอบเขตบน

ค่ามอดูลัสตามยาวของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องสามารถหาได้จากสมการ

$$E_{11} = \frac{1+2(l_f/d_f)\eta_L V_f}{1-\eta_L V_f} E_m \quad (4.7)$$

ค่ามอดูลัสตามขวางของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องสามารถหาได้จากสมการ

$$E_{22} = \frac{1+2\eta_T V_f}{1-\eta_T V_f} E_m \quad (4.8)$$

ค่ามอดูลัสของแรงเฉือนของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องสามารถหาได้จากสมการ

$$G_{12} = G_{21} \frac{1+\eta_G V_f}{1-\eta_G V_f} G_m \quad (4.9)$$

ค่าอัตราส่วนปัวของหลักของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องสามารถหาได้จากสมการ

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (4.10)$$

เมื่อ $\eta_L = \frac{(E_f/E_m)-1}{(E_f/E_m)+2(l_f/d_f)}$

$$\eta_T = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + 2}$$

$$\eta_G = \frac{(G_f/G_m) - 1}{(G_f/G_m) + 1}$$

ตัวห้อย m และ f แทนเมทริกซ์ และเส้นใยตามลำดับ และ l_f/d_f คือค่าอัตราส่วนของรูปร่างของเส้นใย E_{11}, E_{22} เป็นค่ามอดูลัสแรงดึงที่ขนาน และตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย (คุณสมบัติของเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง) G_{12} คือค่ามอดูลัสของแรงเฉือน (คุณสมบัติของเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง) $P_f = E_f, G_f$ (เมื่อ E_f และ G_f เป็นค่ามอดูลัสแรงดึง และแรงเฉือนของเส้นใย ตามลำดับ) $P_m = E_m, G_m$ (เมื่อ E_m และ G_m เป็นค่ามอดูลัสแรงดึง และแรงเฉือนของเมทริกซ์ ตามลำดับ)

จากสมการจะแสดงให้เห็นว่าค่ามอดูลัสตามยาว E_{11} เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าของอัตราส่วนของรูปร่างของเส้นใย ในขณะที่ค่ามอดูลัสตามขวาง E_{22} ไม่มีผล ค่ามอดูลัสตามยาวของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยไม่ต่อเนื่องจะมีค่าน้อยกว่าแบบที่มีเส้นใยต่อเนื่อง

สำหรับวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยไม่ต่อเนื่องแบบ 2 มิติ โดยเส้นใยเรียงตัวกันแบบสุ่ม (รูปที่ 4-7(b))

$$E_{2D} = \frac{3}{8} E_{11} + \frac{5}{8} E_{22} \quad (\text{สำหรับ 2 มิติ}) \quad (4.11)$$

$$G_{2D} = \frac{1}{8} E_{11} + \frac{1}{4} E_{22} \quad (4.12)$$

$$v_{2D} = \frac{E_{2D}}{2G_{2D}} - 1 \quad (4.13)$$

สำหรับวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยไม่ต่อเนื่องแบบ 3 มิติ โดยเส้นใยเรียงตัวกันแบบสุ่ม (รูปที่ 4-7(c))

$$E_{2D} = \frac{1}{5} E_{11} + \frac{4}{5} E_{22} \quad (\text{สำหรับ 3 มิติ}) \quad (4.14)$$

เมื่อค่า E_{11} และ E_{22} เป็นค่ามอดูลัสแรงดึงแบบขนาน และตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย (คุณสมบัติของเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง) ตามลำดับ

- ค่าความแข็งแรงของแผ่นที่มีเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง

ทราบขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย และค่าความแข็งแรงของผิวสัมผัสของเส้นใย/เมทริกซ์ จะสามารถหาค่าความยาวของเส้นใยที่จำเป็น (l_c) ได้ดังสมการ

$$l_c = \frac{\sigma_{fu}}{2 \cdot \tau_i d_f} d_f \quad (4.15)$$

เมื่อ σ_{fu} คือค่าต้านทานการดึงสูงสุดของเส้นใย l_c คือความยาวของเส้นใยที่จุดวิกฤตสำหรับค่าความเครียดของเส้นใยสูงสุดซึ่งเท่ากับค่าต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ความยาวครึ่งหนึ่งของเส้นใย τ_i คือค่าต้านทานแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใย/เมทริกซ์ หรือค่าต้านทานแรงเฉือนของเมทริกซ์ตรงที่ติดกับผิวสัมผัส ถึงอย่างไรก็ตามถือว่ามิติน้อยมาก

ถ้า l_f คือความยาวของเส้นใยที่ใช้จริง จะสามารถพิจารณาได้ 2 แบบคือ แบบแรกเมื่อ $l_f > l_c$ ส่วนอีกแบบคือ เมื่อ $l_f < l_c$

จะหาค่าความเครียดจากแรงดึงตามยาวของเส้นใยที่ไม่ต่อเนื่องได้จากสมการดังนี้

กรณี $l_f > l_c$ จะได้ว่า

$$\sigma_{Lu} = \sigma_{fu} \left(1 - \frac{l_c}{2l_f}\right) V_f + \sigma'_m V_m \quad (4.16)$$

เมื่อ σ'_m คือค่าความแข็งแรงของเมทริกซ์ที่ค่าความเค้นสูงสุด และ σ_{fu} คือค่าความแข็งแรงทางแรงดึงในวัสดุเส้นใย

และในกรณีที่ $l_f > l_c$ จะได้ว่า

$$\sigma_{Lu} = \tau_i \frac{l_f}{d_f} V_f + \sigma_{mu} V_m \quad (4.17)$$

เมื่อ σ_{mu} คือค่าความต้านทานการดึงสูงสุดของวัสดุเมทริกซ์

- ค่าความแข็งแรงของการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่ม

ค่าความแข็งแรงของการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มสามารถหาได้จากสมการของความเครียดที่เกิดจากแรงดึงในระนาบ และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของทิศทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ จะได้ว่า

$$S_r = \frac{4}{\pi} \sqrt{S_{Lt} S_{Tt}} \quad (4.18)$$

เมื่อ S_r = ค่าความแข็งแรงของการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่ม

S_{Lt} = ค่าความแข็งแรงตามยาวที่ระนาบ 0°

S_{Tt} = ค่าความแข็งแรงตามขวางที่ระนาบ 0°

○ เส้นใยแบบต่อเนื่อง

ภาระกรรมตามทิศทางของเส้นใย การตีค่าความแข็งแรง และค่าความแข็งแรงที่เหมาะสมของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยต่อเนื่อง จะได้มาจากกฎของสารผสม รูปที่ 4-8 (a) จะแสดงกรณีที่แรงกระทำทำต่อวัสดุคอมโพสิตในทิศทางเดียวกับเส้นใย ถ้าทราบสัดส่วนปริมาตร หรือสัดส่วนน้ำหนักของเส้นใย คุณสมบัติของเส้นใยที่เป็นส่วนประกอบและเมทริกซ์, ค่ามอดูลัสตามยาวของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยต่อเนื่องที่มีทิศทางของเส้นใยไปในทิศทางเดียวกัน ก็จะสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (4.19)$$

เมื่อ E_{11} คือค่ามอดูลัสของวัสดุคอมโพสิตในทิศทางของเส้นใย E_f และ E_m คือค่ามอดูลัสของส่วนประกอบของเส้นใยและยางเรซิน ตามลำดับ V_f และ V_m คือสัดส่วนปริมาตรของเส้นใยและยางเรซินตามลำดับ

สัดส่วนปริมาตรของวัสดุคอมโพสิต V_c ไม่ได้คิดรวมสำหรับช่องว่างนี้ คือ

$$V_c = V_f + V_m \quad (4.20)$$

ค่ามอดูลัสตามขวาง (ขวางตามความกว้าง) สำหรับวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยต่อเนื่องที่มีทิศทางของเส้นใยไปในทิศทางเดียวกัน จะสามารถหาได้จาก

$$E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (4.21)$$

ค่าหลักของอัตราส่วนปัวซอง V_{12} สำหรับวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยต่อเนื่องที่มีทิศทางของเส้นใยไปในทิศทางเดียวกัน หาได้จาก

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (4.22)$$

และค่ารองของอัตราส่วนปัวซอง V_{21} คือ

$$v_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} v_{12} \quad (4.23)$$

เมื่อ V_f และ V_m คือค่ามอดูลัสแรงเฉือนของเส้นใยและยางเรซิน ตามลำดับ

ค่ามอดูลัสแรงเฉือน G_{12} หาได้โดย

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \quad (4.24)$$

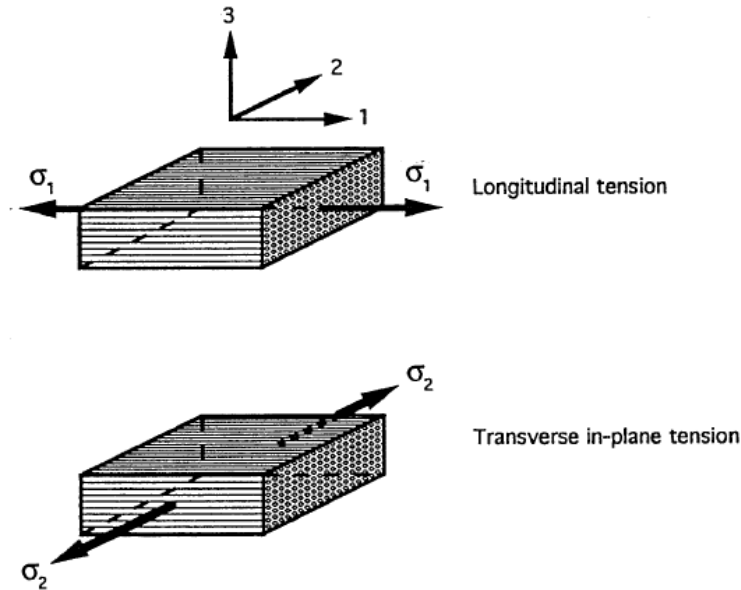
เมื่อ G_f และ G_m เป็นค่ามอดูลัสแรงเฉือนของเส้นใยและยางเรซิน ตามลำดับ

ในลักษณะเดียวกันค่าความแข็งแรงตามแนวยาวของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยต่อเนื่องสามารถจะหาได้จาก

$$\sigma_{11} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (4.25)$$

สัดส่วนของภาระกรรมที่เส้นใยในวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยต่อเนื่องสามารถรับได้ หาได้โดย

$$\frac{P_f}{P} = \frac{\sigma_f V_f}{\sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)} = \frac{E_f V_f}{E_f V_f + E_m (1 - V_f)} K \quad (4.26)$$



รูปที่ 4-8 วัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยต่อเนื่อง (a) แรงกระทำตามแนวเส้นใย และ (b) แรงกระทำขวางแนวเส้นใย [14]

○ การกระกรรมตามขวาง

เมื่อแรงดึงตามขวางได้กระทำต่อระนาบ เส้นใยจะมีบทบาทในการส่งถ่ายแรงลดลง (รูปที่ 4-8(b)) เส้นใยจะเข้าไปรวมยาก และคุณสมบัติหนึ่งคือการครอบคลุมของเมทริกซ์ ความแข็งแรงดึงตามขวางของวัสดุคอมโพสิตที่มีทิศทางของเส้นใยทิศทางเดียวหาได้โดย

$$\sigma_{Tu} = \frac{\sigma_{mu}}{K_{\sigma}} \quad (4.27)$$

เมื่อ K_{σ} คือค่าเครียดสูงสุดของเมทริกซ์ที่มีเส้นใยจัดเรียงตัวกันแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสามารถหาค่าได้โดย

$$K_{\sigma} = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}{1 - \left(\frac{4V_f}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)} \quad (4.28)$$

○ การกระกรรมแบบอัด

สัดส่วนปริมาตรของเส้นใยมีอิทธิพลต่อการล้มเหลวภายใต้แรงอัด ถ้าสัดส่วนปริมาตรของเส้นใยต่ำ ($V_f < 20\%$) จะมีผลในความเค้นของการยืดออกในเมทริกซ์ และวัสดุคอมโพสิตจะเสียหายในสภาวะยืดออกนี้ (รูปที่ 4-9(a)) ที่สัดส่วนปริมาตรของเส้นใยสูง วัสดุคอมโพสิตจะเสียหายภายใต้สภาวะแรงเฉือนของการรัดระดับจุลภาค (Microbuckling) (รูปที่ 4-9(b))

ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด σ_{Lcu} ของวัสดุคอมโพสิตที่มีทิศทางของเส้นใยไปในทิศเดียวกันสำหรับ สัดส่วนปริมาตรของเส้นใยต่ำ ($V_f < 0.2$) ภายใต้สภาวะการยืดออก จะหาค่าได้โดย

$$\sigma_{Lcu} = 2V_f \left(\frac{V_f E_m E_f}{3(1-V_f)} \right)^{1/2} \quad (4.29)$$

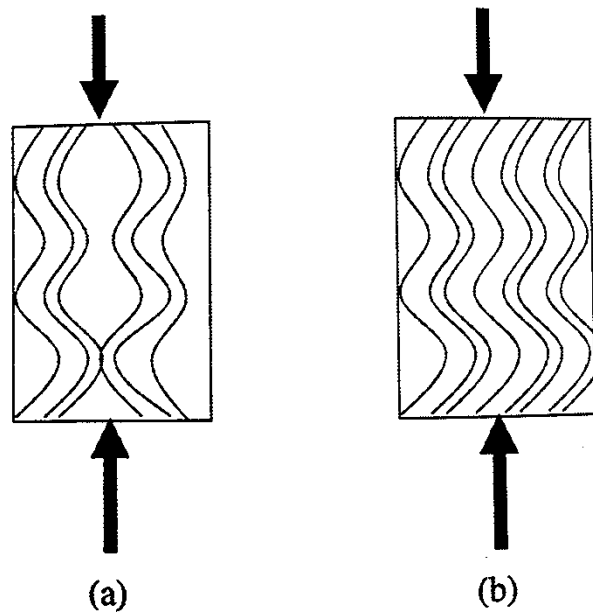
ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด σ_{Lcu} ของวัสดุคอมโพสิตที่มีทิศทางของเส้นใยไปในทิศเดียวกันสำหรับ สัดส่วนปริมาตรของเส้นใยสูง ($V_f > 0.2$) ภายใต้สภาวะแรงเฉือน จะหาค่าได้โดย

$$\sigma_{Lcu} = \frac{G_m}{1-V_f} \quad (4.30)$$

เมื่อ G_m เป็นค่ามอดุลัสแรงเฉือนของเมทริกซ์

4.4.2.3 ความเท่ากันของความแข็งแรง

เมื่อนำวัสดุคอมโพสิตไปใช้แทนวัสดุโลหะ ชิ้นส่วนนั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบใหม่โดยต้องปัจจัยหลาย อย่างในการตัดสินใจ ได้แก่ รูปทรงเรขาคณิต วัสดุ และกระบวนการผลิต การออกแบบวัสดุคอมโพสิตไม่สามารถ ทำเหมือนรูปทรงเดิมของชิ้นส่วนที่เป็นวัสดุโลหะ การออกแบบต้องให้ได้ขนาดที่เหมาะสมในส่วนที่คงที่ และ บางส่วนที่ยืดหยุ่นสำหรับการเปลี่ยนแปลง



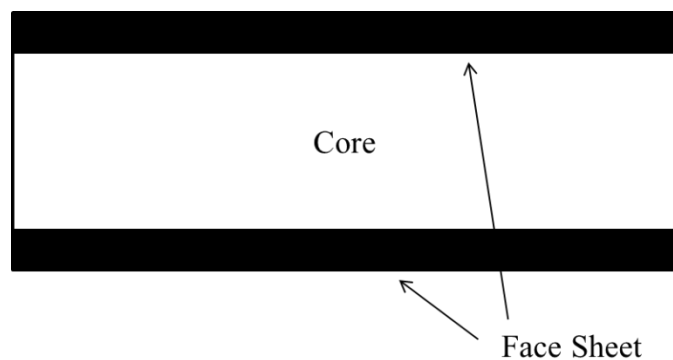
รูปที่ 4-9 รูปแบบความเสียหายของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยต่อเนื่อง (a) Extension Buckling Mode, V_f 0.2; และ (b) Shear Buckling Mode ($V_f < 20\%$) [11]

ตารางที่ 4-6 Properties and Relative Mass Steel, Aluminum and HGF/PUR Composite Beam [10]

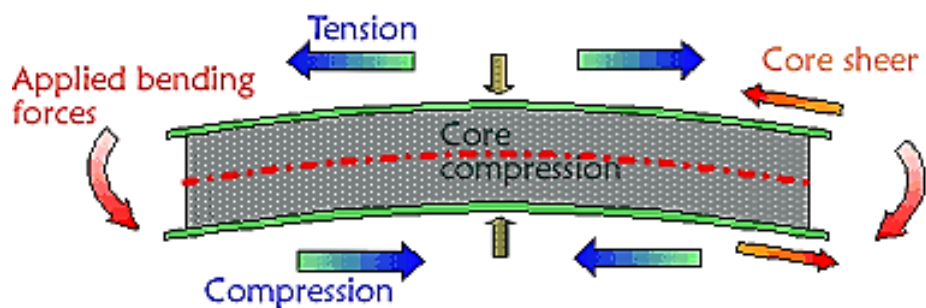
Material	Steel	Aluminium	HGF/PUR
Elastic Modulus (psi)	30×10^6	11×10^6	6.9×10^6
Density (g/cm ³)/psi	7.8 (0.281)	2.7 (0.097)	1.97 (0.071)
Height, H (in.)	1	1.396	1.631
Mass, m (lbs)	0.281	0.135	0.116
Relative natural frequency (f_n)	1	1.37	1.43

4.4.2.4 วัสดุคอมโพสิตแบบแซนวิช

โครงสร้างแบบแซนวิชถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในยานยนต์ รถบรรทุก และรถขนส่ง เนื่องจากมีการรับแรงบิดที่ดี ในวัสดุคอมโพสิตแบบแซนวิชจะมีแกนหลักเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำอยู่ระหว่างผิวของเส้นใยเสริมแรง (พื้นผิว) (รูปที่ 4-10) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายคานรูปตัวไอ (Flange และ Web) หน้าแปลน (Flange) จะเป็นตัวรับแรงดึงและแรงอัด และตัวแกนกลาง (Web) จะช่วยถ่ายเทแรงเฉือนไปให้หน้าแปลน (รูปที่ 4-11) ไม้บัลซาร์ โฟมโพลีไวนิลคลอไรด์ โฟมโพลียูรีเทนแบบมีโครงสร้างรังผึ้ง และโครงสร้างรังผึ้งโพลิโพรพิลีนมักถูกใช้เป็นวัสดุแกนกลางในแซนวิชสำหรับรถบรรทุกหนัก รถขนส่ง และพื้นของรถประจำทาง ส่วนหน้าแปลนมักทำมาจากเทอร์โมเซต ไยแก้ว (E-glass)/อีพอกซี ไยแก้ว/โพลิเอสเทอร์ (หรือไวนิลเอสเทอร์) และเทอร์โมพลาสติก โพลิโพรพิลีนที่มีวัสดุเสริมแรงในตัว PP-GF ไยแก้ว/PE



รูปที่ 4-10 Sandwich construction facesheets and core [11]



รูปที่ 4-11 Illustration of stress distribution in a sandwich composite [11]

พิจารณาคานคอมโพสิตแบบแซนวิชดังรูปที่ 4-10

โดยที่ E_f = ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของหน้าแปลน

E_c = ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของแกนกลาง

b = ความกว้างของคาน

t_f = ความหนาของหน้าแปลน

t_c = ความหนาของแกนกลาง

h = ระยะทางระหว่างของพื้นผิว ($h = t_c + t_f$)

l = ความยาวของคาน (ระยะทางระหว่างจุดรับแรง 2 จุด)

P = ภาระกรรมที่กระทำตรงกลางของคาน

ค่าความต้านทานการดัด (D) หาได้โดย

$$D = E \times I \quad (4.31)$$

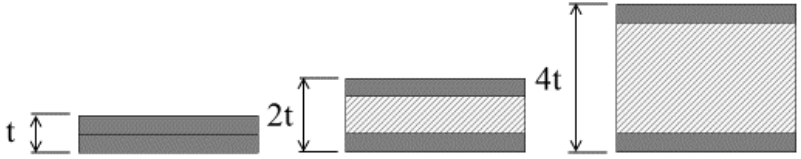
เมื่อ E = ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

I = โมเมนต์ความเฉื่อย

สำหรับคานแซนวิชที่สมมาตร สามารถหาค่าความต้านทานแรงดัดได้โดย

$$D = E \times I = \left(\frac{E_f b t_f^3}{6} \right) + \left(\frac{E_f b t_f h^2}{2} \right) + \left(\frac{E_c b t_c^3}{12} \right) \quad (4.32)$$

ตารางที่ 4-7 Effectiveness of a Sandwich Construction [11]



Stiffness	1	7	37
Flexural rigidity	1	3.5	9.2
Weight	1	1.03	1.06

ถ้าความหนาของผิวบางเมื่อเทียบกับแกนกลาง t_f^3 ในเทอมแรกของสมการข้างบนสามารถไม่นำมาคิดได้ ถ้าแกนกลางมีค่าความแข็งน้อยกว่าผิวมาก ($E_c \ll E_f$) E_c ในเทอมสุดท้ายของสมการจะไม่นำมาคิดเช่นกัน จะสามารถเขียนสมการ 4.32 ได้ใหม่ดังนี้

$$D = E \times I = \left(\frac{E_f t_f h^2 b}{2} \right) \quad (4.33)$$

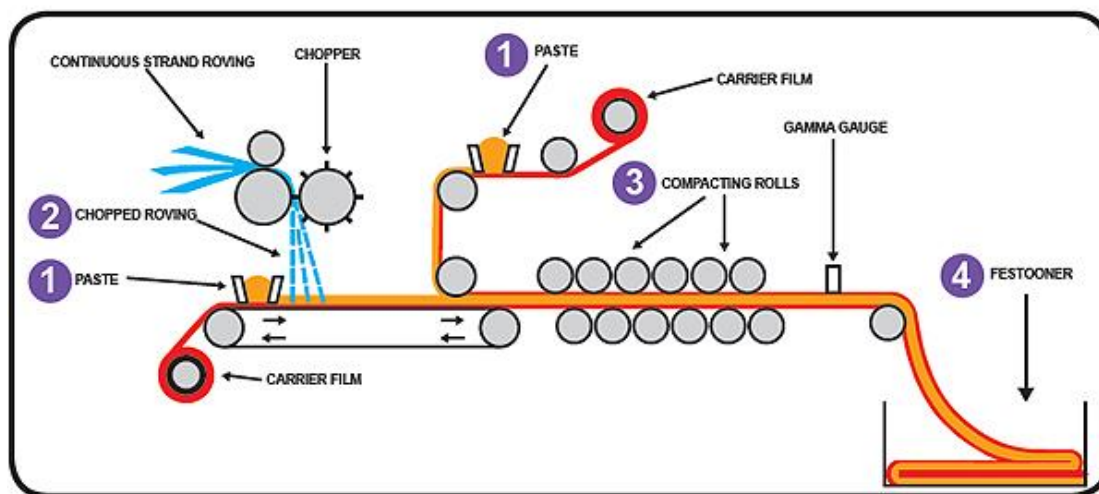
4.4. กระบวนการผลิตชิ้นส่วนที่ทำด้วยวัสดุคอมโพสิต

4.4.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยเส้นใยสั้นและเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง

4.4.1.1 Sheet Molding Compound

การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่อง (Sheet-Molding Compound: SMC) การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องเป็นที่ยอมรับมากในอุตสาหกรรมการขนส่งของอเมริกา บริษัทฟอร์ตมอเตอร์ ใช้การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องมากขึ้นทุก ๆ ปี ประมาณ 68-71 ล้านกิโลกรัม แผงตัวรถยนต์ต้องการใช้การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องแทนเหล็ก

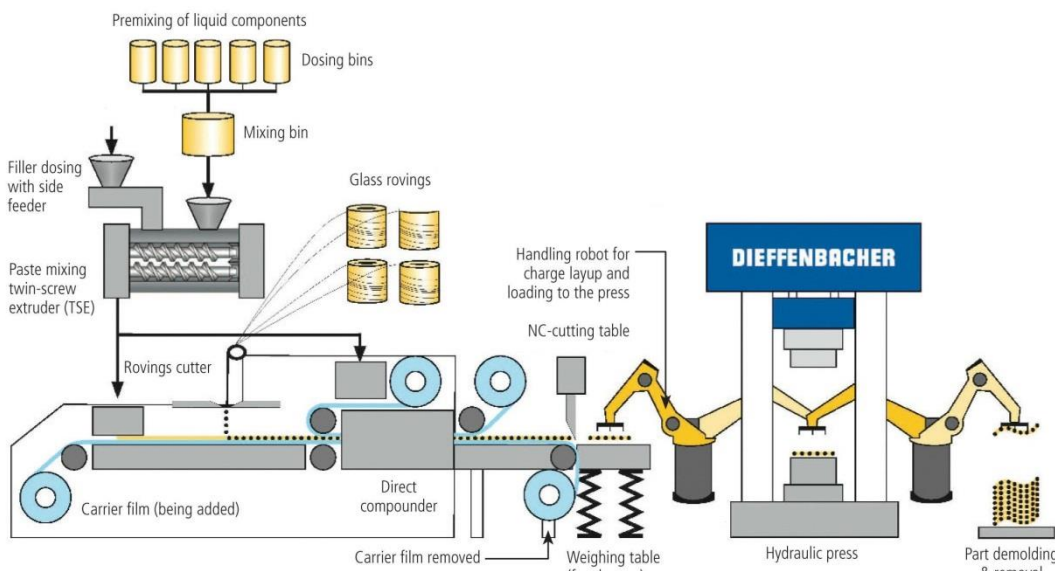
การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องแบบเก่าจะใช้วัสดุ UPEs หรือ VE สำหรับเป็นเรซิน การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องเริ่มต้นที่การผสมกันของส่วนประกอบต่าง ๆ และถังรวมเรซิน (รูปที่ 4-12) ส่วนผสมหลักของการขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องคือเรซิน (25%) ฟิลเลอร์ (50%) และเส้นใยไฟเบอร์กลาส (25%) ฟิลเลอร์ที่ใช้โดยทั่วไปในสูตรเหล่านี้ Kaolin และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งได้แก่ สารเติมแต่ง เม็ดสี สารที่ทำให้หลุดจากแม่พิมพ์ และสารการบ่ม ขั้นตอนหลังการปล่อยอากาศออก (Deaeration) และการผสมที่เหมาะสมคือการส่งต่อเข้าสู่สายการผลิตแบบต่อเนื่อง มันเป็นการกระจายตัวในสูตรที่คงที่บนสายพานที่มีความกว้างพิเศษ ไฟเบอร์จะถูกใช้งานจะต้องผ่านตัวชุดลูกกลิ้งก่อนที่ความหนืดของมันจะเพิ่มขึ้น แผ่นที่อยู่ในม้วนโรลจะถูก Matured ในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมได้ หลังจาก Maturation มันจะถูกขึ้นรูปเป็นส่วนประกอบต่างๆ โดยกระบวนการกดในแม่พิมพ์ [15]



รูปที่ 4-12 ขั้นตอนในการขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่อง (ที่มา: Oxford Brookes University, DOGMA project) [16]

การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องถูกนำไปใช้ในชิ้นส่วนหลาย ๆ ประเภทของรถยนต์เช่น สปอยเลอร์ กระโปรงหน้ารถ กระเบาะรถ และผนังด้านบน กระทั่งกล่องบรรจุทุกสินค้า ประตูลิฟต์ แผ่นบังโคลนรถของรถปิกอัพและรถขนาดใหญ่ ก็ทำมาจากวัสดุคอมโพสิตเทอร์โมเซตที่มีการผลิตแบบการขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่อง ชิ้นส่วนเหล่านี้ต้องทนกับสภาวะแวดล้อมข้างนอกโดยตรงไม่ว่าจะเป็น ความร้อน โอโซน ความชื้น สารเคมี และแสงยูวี

การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องโดยวิธีตรง (Direct SMC Process) เป็นการพัฒนามาจากการขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องโดยวิธีมาตรฐาน (Standard SMC Process) การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องโดยวิธีตรงคือกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องซึ่งวัตถุดิบจะถูกเปลี่ยนเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องการภายในไม่กี่นาที (รูปที่ 4-12) ส่วนของของเหลวอย่างเช่น เรซิน สารเติมแต่ง และสารประกอบเพอร์ออกไซด์ (Peroxide) ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องผสม เรซินพร้อมด้วยส่วนผสมอื่นๆ ยกเว้นเส้นใยเสริมแรงถูกป้อนเข้าสู่เครื่องอัดรีดซึ่งเส้นใยเสริมแรงสามารถทำงานได้ในส่วนนั้น เส้นใยเสริมแรงจะถูกทำให้เป็นเส้นๆ ที่เปียกและกระจายอยู่ในเครื่องอัดรีด ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องอัดรีดคือวัสดุที่ถูกอัดซึ่งถูกตัดตามความยาวที่ระบุไว้ในอัตราส่วนที่ต้องการและถูกวางบนสายพานส่ง วัสดุที่อัดรีดถูกให้ความร้อนโดยคลื่นขนาดเล็กระดับไมโครเพื่อให้เกิดความหนืด จากนั้นมันจะถูกป้อนเข้าสู่การกดเพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง กระบวนการของสายพานและการตัดวัสดุออกโดยทั่วไปจะเป็นแบบอัตโนมัติ



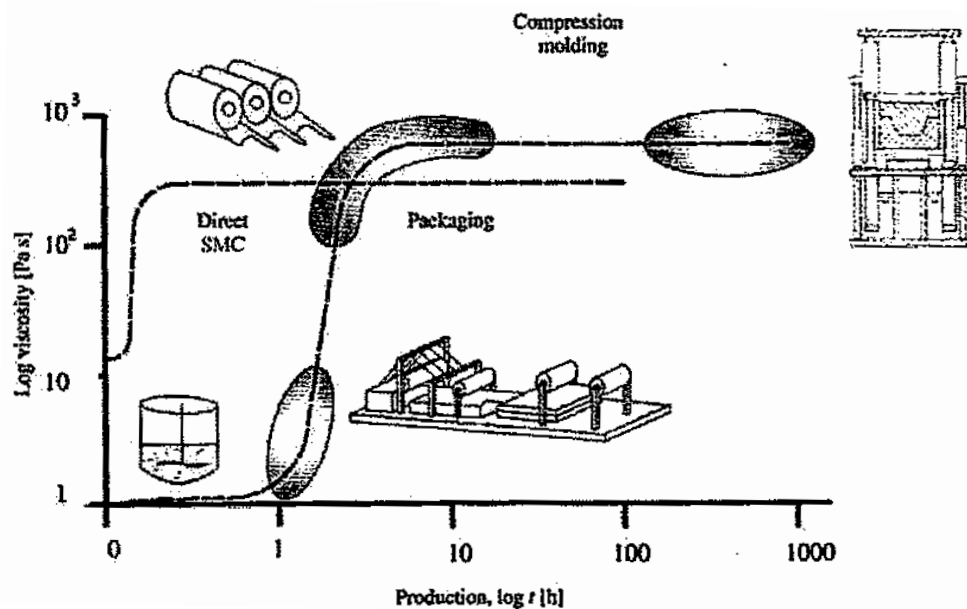
รูปที่ 4-13 การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องโดยวิธีตรง (Direct SMC Process) (ที่มา: Potyra et al., 2008) [17]

ตามที่แสดงในรูปที่ 4-13 ในกระบวนการผลิตแบบเก่า วัสดุจะมีความหนืดเริ่มต้นต่ำมากเพื่อที่จะสามารถให้ผสมกับฟิลเลอร์และสารเติมแต่งได้ และเพื่อให้เส้นใยมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการขึ้นรูปเป็นแผ่น ความหนืดจะต้องเพิ่มขึ้นในเวลาที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อที่ว่าแผ่นจะสามารถผ่านไปสู่กระบวนการผลิตต่อไปได้ ในทางกลับกัน กระบวนการผลิตแบบตรง ความหนืดเริ่มต้นจะสูงกว่าเพราะว่าไฟเบอร์ต้องเปียกในระหว่างขั้นตอนการอัดรีด ความหนืดเพิ่มขึ้นภายในไม่กี่วินาทีเนื่องจากการเติมไฟเบอร์เพราะมันจะเข้าสู่ระดับที่ต่ำกว่าในกระบวนการผลิตแบบเก่า ความหนืดสุดท้ายที่ต่ำกว่าจะก่อให้เกิดชิ้นส่วนที่มีคุณภาพของพื้นผิวที่สูงกว่าด้วย

นอกจากนี้อัตราส่วนของเศษที่เหลือก็ต่ำกว่า การปล่อยของ VOC ก็ต่ำกว่าเพราะว่าวัสดุถูกบรรจุอยู่ในชั้นขนาดใหญ่ระหว่างการผลิตและจำนวนของการทำงานซ้ำก็น้อยลง ซึ่งทำให้สามารถต้นทุนการผลิตลดลงได้

การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องโดยวิธีตรง (Direct SMC Process) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในส่วน of ชิ้นส่วนด้านนอกที่สัมผัสกับอากาศโดยตรง เช่น กล่องบรรจุทุกของของรถปิกอัพ วัสดุคอมโพสิตที่ผลิตแบบการขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องที่สามารถทนต่อสภาพอากาศได้ถูกออกแบบให้มีสีดำและเส้นใยมีความแข็งแรงสูงเพื่อให้มีคุณสมบัติที่แข็งแรงตรงตามความต้องการของรถบรรทุก การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องโดยวิธีดั้งเดิม (Conventional SMC Process) มีความแปรผันของคุณภาพของแผ่นที่ได้และคุณภาพของชิ้นส่วนที่ผลิต

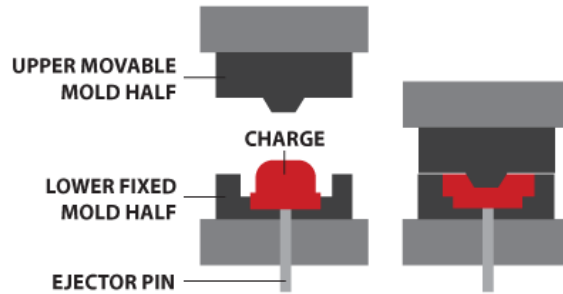
ความก้าวหน้าในวัสดุคอมโพสิตแบบเทอร์โมเซตสำหรับการใช้งานทางยานยนต์มีผลทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ มีคุณภาพสูงขึ้น ฐานของรถปิกอัพที่เป็นคอมโพสิตเป็นตัวอย่างที่พิสูจน์แล้วว่าประสบผลสำเร็จ เนื่องจากความแข็งแรงทนทานและความสามารถในการออกแบบที่สร้างสรรค์ ผู้ผลิตหลายๆ ที่ รวมทั้ง Ford ก็ใช้วัสดุคอมโพสิตซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าเหล็ก



รูปที่ 4-14 รูปแบบของความหนืดกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบ การขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องวิธีดั้งเดิม (Classic SMC Process) และการขึ้นรูปแบบแผ่นต่อเนื่องโดยวิธีตรง (Direct SMC Process) (ที่มา: Potyra et al., 2008)

4.4.1.2 Compression Molding

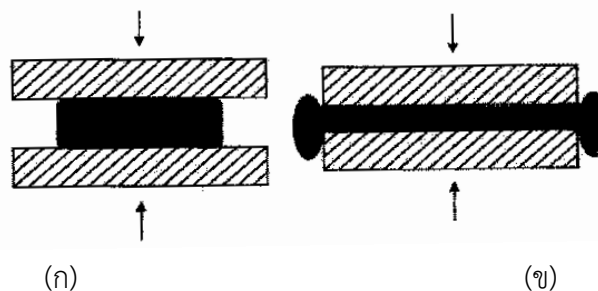
การขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์อัด (Compression Mold) เป็นกระบวนการทั่วไปของการทำ GMT, LFT-ECM และ SMC ตลอดจนชิ้นส่วนคอมโพสิตเส้นใยต่อเนื่อง การขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์อัดใช้เครื่องมือ Closed-Cavity ซึ่งการ Perform, Charge, หลอมละลายโพลิเมอร์หรือฟรีเพลกส์ถูกวางใน Female Cavity และปิด Male Plug ลงเพื่อขึ้นรูปชิ้นส่วนนั้น ๆ (รูปที่ 4-15) อุณหภูมิ ความดัน และเครื่องช่วยให้เกิดสุญญากาศ ทั้งหมดนี้เพื่อสร้างชิ้นส่วนที่ต้องการ ในระหว่างกระบวนการ เช่น การเปลี่ยนถ่ายเรซิน การทำให้แห้ง ถูกรวมกันโดยการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์อัด และเรซินจะถูกฉีดภายใต้ความดันที่เป็นบวกเพื่อทำการเอาส่วนที่เปียกออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 4-15 รูปแบบของแม่พิมพ์กดของ SMC GMT หรือ LFT

การขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์อัด (Compression Mold) ให้รูปร่างชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากหลาย ๆ ขั้นตอนถูกนำมาใช้ร่วมกัน เช่น การดัดแบบผง (Powder Impregnated Tows) การดัดแบบผสม (Commingled Tows) Tapes Pellets และ Fabrics ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์อัดคือการ อุณหภูมิ Preheat การเปลี่ยนแปลงเวลาจากจุดที่ Preheat ไปถึงตอนกดและการทำให้แข็งตัว

สำหรับกระบวนการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์อัด ความเข้าใจในศาสตร์การไหลของตัวเติมเป็นสิ่งที่สำคัญมาก Isothermal Squeeze Flow เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการอธิบายลักษณะของการไหลของการขึ้นรูป เช่น GMT SMC และ LFT วิธีการ Isothermal Squeeze Flow ประกอบด้วยความเร็วหรือแรงที่ถูกควบคุมสำหรับการกดอัดวัสดุที่อุณหภูมิคงที่ระหว่างแผ่นที่มีปริมาตรคงที่ (รูปที่ 4-16 (ก)) หรือพื้นที่คงที่ (รูปที่ 4-17 (ข))



รูปที่ 4-16 squeeze flow ของเทอร์โมพลาสติก polymer/fiber charge ที่ (ก) ปริมาตรคงที่ และ (ข) พื้นที่คงที่ (ที่มา: Thattaparthasathy, 2008)

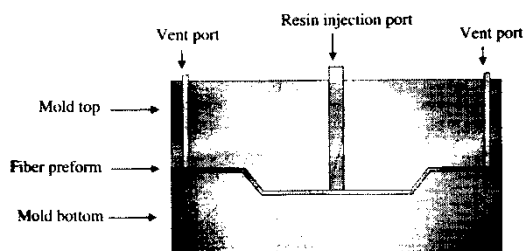
4.5 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยแบบต่อเนื่อง สำหรับการใช้งานด้านยานยนต์และการขนส่ง

มีแนวทางต่างๆ มากมายในกระบวนการผลิต แนวทางที่สอดคล้องในการใช้งานด้านยานยนต์และการขนส่ง ได้แก่ เรซินโมลดิ้ง (Resin Transfer Molding) อินฟิวชันโมลดิ้ง (Infusion Molding) เทอร์โมแสตมป์ (Thermostamping) โมลดิ้งกดอัด (Compression Molding) และอื่นๆ เฉพาะบางกระบวนการจากที่กล่าวมาจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

4.5.1 Resin Transfer Molding (RTM)

กระบวนการโมลของเหลว อาทิเช่น เรซินโมลดิ้ง (RTM) เรซินโมลดิ้งแบบตัวช่วยสุญญากาศ (VARTM) การฉีดปฏิกิริยาโครงสร้างโมลดิ้ง (SRIM) และกระบวนการที่คล้ายคลึง จะมีการผสมเรซินเพื่อใช้ในการผลิต การผสมทำโดยการอัดความดันบวกในในหลุมเครื่องมือแบบปิดโดยเป็นสุญญากาศอย่างเดียว หรือเป็นการผสมผสานระหว่างสุญญากาศกับความดันก็ได้ (Advani and Sozer, 2003) ในการผลิตปกติจะดึงอากาศออกก่อนเพื่อที่จะผสมหรือเติมส่วนที่จำเป็น ความหนืดของระบบเทอร์โมเซตจะเข้ามามีส่วนช่วยในกระบวนการโมลของเหลวในการยับยั้งการเกิดเทอร์โมพลาสติกเรซินที่จะมีความหนืดสูงกว่า

ในกระบวนการ RTM ทั่วไป ดังรูปที่ 4-17 การทำเส้นใย (Fiber Perform) จะถูกวางไว้ในอุปกรณ์ฟีเมลไปตามส่วนอื่นๆ เช่น แกนโฟม อุปกรณ์ยัดต่างๆ สำหรับการทำให้แห้ง (Dry Perform) จะถูกประกอบเช่นเดียวกับขั้นตอนการโมลดิ้งแบบอัด การทำสามารถดึงอากาศออกโดยใช้เวลาหลายนาที่ถึงหลายชั่วโมง ขึ้นอยู่กับขนาดและความซับซ้อนของชิ้นส่วน เรซินความหนืดต่ำเช่น UPE VE หรือ Epoxy จะถูกฉีดเข้ามาโดยระบบ Metering Mixing และ Dispensing ในการอัดแน่น การตกแต่งเส้นใย การซึมผ่านในระนาบและตามขวาง จะส่งผลต่ออัตราการนำความชื้นออกและคุณลักษณะการไหลของเรซิน (Mayer et al., 1998) เรซินจะเก็บรักษาในช่วงไม่กี่นาที่ในชิ้นส่วนยานยนต์จากกระบวนการ RTM ส่วนใหญ่ และชิ้นส่วนจะถูกนำออกจากโมลและตัดตกแต่ง



รูปที่ 4-17 การจำลองกระบวนการ RTM

RTM ให้ข้อดีในการสร้างรูปร่างโดยรวมที่คล้ายจริงตามที่ต้องการแบบไว้ อัตราการผลิตสูง และความสามารถในการปรับแต่ง เช่น เพิ่มเติม ปรับออก และทำให้ต่างของวัสดุ ในการทำขั้นตอนเดียว และได้รับชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง บังโคลนรถ เครื่องกันชน ชิ้นส่วนได้ตัวถังรถ และเสาหลักปี เป็นชิ้นส่วนที่ถูกสร้างจากกระบวนการ RTM

4.5.2 การโมลแบบฉีด (Infusion Molding)

หลักการคือจะวางใยแก้วและวัสดุเสริมแรงอื่นๆตามที่ต้องการลงไปโมล ก่อนปิดผนึกโมลให้สนิทด้วยฟิล์มและปิดผนึกกันรั่ว จากนั้นใช้ปั๊มดูดอากาศออกแล้วปล่อยให้เรซินซึมผ่านเข้าไปในโมลอย่างช้าๆ ด้วยแรงดูดของปั๊ม จะมีเรซินส่วนเกินเข้าไปในระบบน้อยมาก เพราะเมื่อเรซินเกินก็จะถูกดูดไหลออกโดยปั๊ม เมื่อเรซินเต็มชิ้นงานจะทำการปิดปั๊ม รอให้แห้งจากนั้นทำการแกะชิ้นงานออกจากโมล

4.5.3 การโม่แบบอโตเคลฟ (Autoclave Molding)

การโม่แบบอโตเคลฟสามารถถูกพิจารณาเป็นการผสมผสานระหว่างกระบวนการโม่แบบอุณหภูมิและความดัน และสุญญากาศ เครื่องอบจะต้องเป็นถึงความดันทนความร้อนที่ทำงานในระบบสุญญากาศในการขึ้นรูปโม่ที่ถูกระทำในลักษณะวัฏจักรการถนอม กระบวนการนี้จะได้คุณภาพสูง ไม่มีหุ้มน้ำจากการควบคุมรูปแบบของอุณหภูมิ สุญญากาศ และความดันในถังแบบปิด การบวนการดังกล่าวถูกใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมอากาศยาน ในการประกอบชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เช่น Prepregs และในกรณีส่วนมากวัสดุอุณหภูมิสูง เช่น คาร์บอน/อีพอกซี และคาร์บอน/ฟีนิก ความดันในการเก็บรักษาโดยปกติจะอยู่ในช่วง 50 – 100 ปอนด์ และวัฏจักรการถนอมปกติจะเป็นหลายชั่วโมง ในอุตสาหกรรมยานยนต์การใช้การโม่แบบอโตเคลฟถูกจำกัดในด้านเศรษฐกิจ และถูกจำกัดในการใช้งานด้านประสิทธิภาพหรือพาหนะสำหรับแข่ง เช่น ตัวถังของพอร์เช่คาร์บอน/อีพอกซีจะโม่จากพรีเพรกในเครื่องอบ

4.6 การวิเคราะห์กระบวนการผลิต

4.6.1 ปัจจัยที่จำเป็นในการผลิตวัสดุคอมโพสิต

สมมติความต้องการในการผลิตของชิ้นส่วนด้านในประตูของรถยนต์กลาง สมมติอัตราเศษเหลือ 5% ซึ่งถูกรวมในการคำนวณของ LFT และ P4 และ 20% ของทั้ง SMC และRTM การดำเนินงานนี้แสดงถึงรู และ ส่วนที่ถูกตัดออกของชิ้นส่วนที่ถูกตกแต่ง และกำจัดทิ้งหลังจากกระบวนการขึ้นรูป ความต้องการในการผลิตสำหรับกระบวนการผลิตทั้งหมดสามารถพิจารณาได้ดังที่แสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 Production Data for Inner Door Panel [19]

	RTM	SMC	HexMC	LFT	P4
No. of parts per year	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
Scrap rate	20%	20%	20%	5%	5%
No. of working days per year	280	280	280	280	280
Required parts per day	171	171	171	150	150
Required parts per hour	21	21	21	19	19
Cycle time per part (hr)	0.25	0.13	0.08	0.08	0.05
No. of presses required	5	3	2	2	1

4.6.2 การวิเคราะห์ราคาและต้นทุนของวัสดุคอมโพสิตสำหรับการออกแบบ

ในการวิเคราะห์ราคาของกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นงานทั้ง 4 กระบวนการจะคิดในตอนท้ายที่กระบวนการผลิตสิ้นสุดลง ส่วนสิ่งที่เกิดขึ้นนอกเหนือกระบวนการผลิต ราคาบรรจุภัณฑ์ การสิ้นสุดของกระบวนการ และค่าใช้จ่ายในการ

บริหารสิ่งเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายด้วยเช่นกัน และเราจะไม่นำปรวมในการตีราคา การตีราคาจะคิดเฉพาะอุปกรณ์หลักที่ถูกใช้งาน และค่าการแก้ไขย่อยที่จำเป็น ราคาของวัตถุดิบในแต่ละแบบสามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 4-9 และราคาของคาร์บอนไฟเบอร์เป็นตัวแทนราคาของกลุ่มเส้นใยหลักที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมด

ตารางที่ 4-9 Raw Materials Cost the Production of Equivalent Stiffness Plate [19]

	RTM	SMC	HexMC	LFT	P4
Carbon fiber price (\$/kg)	24	24	24	24	24
Resin system used	Epoxy RTM	Vinyl ester SMC	Epoxy SMC	PA66	PU SRIM
Resin price per kg	8.00	6.00	8.00	6.00	4.10

ราคาทั้งหมด ณ จุดสิ้นสุดของการผลิตแผ่นจะแสดงในตารางที่ 4-9 ราคาต่อส่วนนั้นเพื่อความเท่าเทียมกันสำหรับเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทางเลือกจะมีราคาต่ำลงคือ $LFT < P4 < SMC$ ตามลำดับ HexMC มีราคาที่แพงกว่าตัวเลือกที่ราคาต่ำที่สุด 1.9 เท่า ในทางกลับกันราคาของส่วนที่เป็น RTM มีราคาที่แพงกว่า ส่วนที่ทำจาก HexMC เกิน 60% การเปลี่ยนแปลงของราคาแบบตัวคูณของผลิตภัณฑ์ที่เป็นตัวกลางเหล่านี้จะอยู่บนพื้นฐานของการสันนิษฐาน (ยกเว้น RTM ที่การตีราคาจะมีทิศทางไปในทิศทางเดียวกับราคาสิ่งทอ) และความจำเป็นที่จะต้องแก้ไขไปตามสิ่งที่ใส่เข้าไปตามความเป็นจริงจากผู้ทำสิ่งทอ จำนวนชิ้นส่วนที่ถูกตัดออกมากขึ้น ทำให้อัตราการเศษเหลือเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อความประหยัดของ SMC, HexMC และ RTM

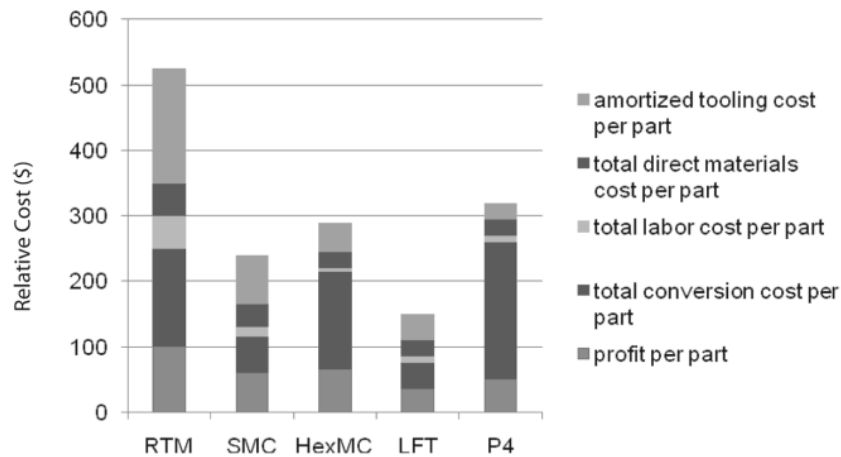
ตารางที่ 4-10 Cost Breakdown [19]

	RTM	SMC	HexMC	LFT	P4
Tooling - matched steel per set of tools	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
No. of parts per tool set	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
No. of tools required during production campaign	26	11	7	6	4
Tooling cost, total	7,714,28	3,428,57	2,142,85	1,875,00	1,312,50
	6	1	7	0	0
Amortized tooling cost per part	192.86	85.71	53.57	46.88	32.81
Direct materials					
Carbon fiber cost per part (\$)	23.46	18.66	24.73	16.44	18.37
Resin cost per part (\$)	4.91	5.37	4.77	6.17	3.85
Other costs (additives, stitch thread, binder)	2.84	2.40	2.95	2.26	2.22
assume 10% of total cost					

	RTM	SMC	HexMC	LFT	P4
Total direct materials cost per part	31.21	26.43	32.45	24.87	24.45
Conversion cost					
Conversion cost multiple per process	4.00	1.50	4.00	1.50	4.00
Total conversion cost per part	124.83	39.65	129.80	37.30	97.79
Direct labor					
No. operators required per work station	2	2	2	2	2
Burdened labor rate per hour	60	60	60	60	60
Labor cost per hour	642.86	342.86	214.29	187.50	112.50
Total labor cost per hour	30.00	39.65	129.80	37.30	97.79
Profit margin	30.00%	30.00%	30.00%	30.00%	30.00%
Profit per part	113.67	50.34	67.75	35.71	48.31
Total price per part	495.56	218.13	293.57	154.76	209.36

การสนับสนุนเฉพาะส่วนของราคาในแต่ละหน่วยจนทำให้ราคาของแต่ละชิ้นนั้นมากเกินไปดังแสดงในรูปที่ 4-11 จากรูปสามารถที่จะสรุปได้ว่าค่าใช้จ่ายของผู้ดำเนินการสำหรับ RTM เป็นทั้ง ค่าการแปรรูปในการถักทอ/การเย็บ และค่าอุปกรณ์ที่ต้องการสำหรับการผลิต 40,000 ชิ้นส่วนต่อปี (นี่คือผลสำหรับวงจรที่ใช้เวลาน้อย และมีจำนวนของแม่พิมพ์พอกับการผลิต) ค่าใช้จ่ายของผู้ดำเนินการสำหรับทางเลือกอื่นๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอุปกรณ์ต่อชิ้นส่วนที่จะลดลงตามลำดับจาก SMC ไป P4 และค่าแปรรูปที่สูงสำหรับกระบวนการขึ้นรูปของ HexMC และP4

เพื่อที่จะลดค่าวัสดุดิบในชิ้นส่วน การใช้แก้ว/คาร์บอนผสมกันเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่ควรพิจารณาเนื่องจากเป็นวัสดุเดียวที่เป็นไปได้สำหรับชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบา ที่ยังมีผลของ ราคา/การกระทำ ที่พอเหมาะ



รูปที่ 4-11 Cost breakdown for fabrication of 0.54 m² using different manufacturing processes. [18]

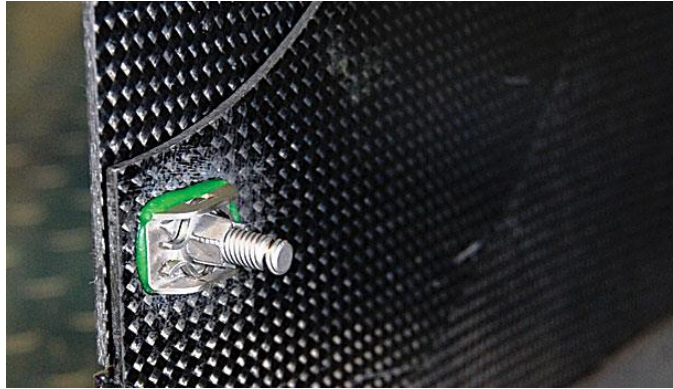
4.7 การเชื่อมต่อชิ้นส่วนยานยนต์ที่ทำจากวัสดุคอมโพสิต

การผลิตชิ้นงานด้วยวัสดุคอมโพสิต โดยส่วนมากจะไม่ทำให้ชิ้นส่วนมีขนาดใหญ่เกินไป เนื่องจากข้อจำกัดในกระบวนการผลิต ได้แก่ ขนาดของเครื่องมือที่จำกัด และต้องผลิตภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ตลอดจนข้อจำกัดในเรื่องของการขนส่ง ในทางปฏิบัติจึงควรแบ่งผลิตชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ แล้วจึงนำไปประกอบกันในภายหลัง ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงการเชื่อมต่อชิ้นส่วนย่อยๆ เหล่านั้น ให้เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละรูปแบบให้เหมาะสม ในหลักการเบื้องต้น บริเวณจุดเชื่อมต่อจะต้องมีความแข็งแรงเท่าเทียมหรือไม่น้อยกว่าตำแหน่งอื่น ถ้าจุดเชื่อมต่อไม่แข็งแรงเพียงพอ ต่อให้ชิ้นส่วนอื่นได้รับการออกแบบให้ดีด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงเพียงใด ก็อาจได้รับความเสียหาย

เทคนิคการเชื่อมต่อสำหรับวัสดุคอมโพสิต แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ การเชื่อมต่อทางกล (Mechanical Fastening) การใช้กาวประสาน (Adhesive Bonding) และการเชื่อมประสาน (Fusion and Welding)

4.7.1 เทคนิคการเชื่อมต่อทางกล (Mechanical Fastening)

ข้อดีของเทคนิคชนิดนี้ คือสามารถถอดประกอบใหม่ได้ โดยชิ้นงานไม่เสียหาย ใช้เวลาติดตั้งน้อย สภาพพื้นผิวสะอาด แต่เทคนิคนี้จะต้องมีการตัด คว้าน เจาะ เนื้อชิ้นงาน ทำให้บริเวณดังกล่าวอาจเกิดความเค้นรวมจุด (Stress Concentration) ทำให้เส้นใย Fiber ไม่ต่อเนื่อง ความแข็งแรงไม่ได้เท่ากับที่ได้ออกแบบไว้ นอกจากนี้ ยังทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น จากชิ้นส่วนที่ใช้จับยึด ตัวอย่างการจับยึดของเทคนิคนี้ได้แก่ Riveting Clamping Bolting เป็นต้น



รูปที่ 4-12 เทคนิคการเชื่อมต่อทางกลโดยวิธี Bolting [20]

4.7.2 เทคนิคการใช้กาวประสาน (Adhesive Bonding)

ข้อดีของเทคนิคนี้คือเพิ่มประสิทธิภาพทางกลของโครงสร้าง น้ำหนักของโครงสร้างลดลงเมื่อประสิทธิภาพยังคงเท่าเทียมกับวิธีการอื่น และลดพื้นที่ที่ต้องใช้ในการเชื่อมต่อ เมื่อเทียบกับวิธีเชื่อมต่อทางกลโดยยังคงให้ประสิทธิภาพเท่าเดิม วิธีการนี้นิยมใช้ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนภายในยานยนต์อย่างกว้างขวาง ซึ่งวัสดุและวิธีการที่ใช้จะขึ้นอยู่กับประเภทของชิ้นงานที่จะนำมาต่อ และตำแหน่งที่จะติดตั้ง ยกตัวอย่างเช่น พรหมพ่นรถ มือจับประตู ชิ้นส่วนที่คอนโซล เป็นต้น

เทคนิคการเชื่อมด้วยกาวจะมีประสิทธิภาพดีต้องมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ตำแหน่งที่จะติด จะต้องมีการขัดเตรียมสภาพผิวให้เหมาะสม ความชื้นและอุณหภูมิต้องเหมาะสมกับสารยึดติดแต่ละชนิดทำให้ปฏิกิริยาเคมีมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เทคนิคนี้จำแนกออกตามกระบวนการได้ 3 รูปแบบ คือ Hot-Melt Adhesives Liquid Adhesives และ Web and Pre-Applied Adhesives



รูปที่ 4-13 เทคนิคการเชื่อมประสานแบบกาว [20]

4.7.3 เทคนิคการเชื่อมประสาน (Welding)

เทคนิคชนิดนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ทำจาก Thermoplastic Composite เพราะจุดเชื่อมต้องมีความแข็งแรงทนทาน อาจมีการใช้หุ่นยนต์เชื่อม ทำให้มีความแม่นยำ เหมาะกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและชิ้นงานขนาดใหญ่ แต่มีค่าใช้จ่ายสูง เทคนิคการเชื่อมวัสดุคอมโพสิตมีมากกว่า 20 วิธี แต่จะสามารถจำแนกตามแหล่งความร้อนที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมได้ 3 แบบ คือ 1. ความร้อนจากแหล่งพลังงานภายนอก (External Heat Source) 2. ความร้อนที่ใช้เกิดจากพลังงานกลจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน (Heat Generated by Mechanical Movement) และ 3. ความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetism)

การเลือกใช้วิธีใดๆ ก็ขึ้นอยู่กับ วัสดุคอมโพสิตที่จะเชื่อมประสาน อย่างไรก็ตาม การเชื่อมย่อมมีผลทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเส้นใยที่ใช้เสริมแรง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานโดยรวม กระบวนการเชื่อมจะมีประสิทธิภาพดีมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องของหลายปัจจัย เช่น เวลา อุณหภูมิ และความดัน เป็นต้น ต้องควบคุมปัจจัยดังกล่าวให้เหมาะสม สอดคล้องกับการเชื่อมต่อนั้นในแต่ละรูปแบบ

เทคนิคการเชื่อมโดยความร้อนจากแหล่งพลังงานภายนอก มีเทคนิคที่ใช้คือ Hot Plate Welding, Hot Bar Welding, Impulse Welding, Hot Gas Welding, Extrusion Welding และ Flat Free Welding เป็นต้น

เทคนิคการเชื่อมโดยใช้ความร้อนที่เกิดจากพลังงานกล เช่น Vibration Welding, Spin Welding, Orbital Welding, Ultrasonic welding และ Friction Stir Welding เป็นต้น

เทคนิคการเชื่อมโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ Resistive Implant Welding, Induction Welding, High Frequency Welding, Laser Welding, Infrared Welding และ Microwave Welding เป็นต้น

4.8 เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Goede: SLC Project December 2003 and May 2008, VW.
- [2] A. Beukers, “Polymer Matrix Composites: Application”, in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, L. B. Ilcewicz, E. J. Kramer, and S. Mahajan, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2001, pp. 7384-7388.
- [3] W. H. Hunt, “Metal Matrix Composites: Applications” in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, L. B. Ilcewicz, E. J. Kramer, and S. Mahajan, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2001, pp. 5442-5447.
- [4] W. H. Hunt, “Metal Matrix Composites” in Comprehensive Composite Materials, A. Kelly and C. Zweben, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2000, pp. 57-66.
- [5] K. M. Prewo and W. K. Tredway, “Ceramic Matrix Composites: Application” Encyclopedia of Materials: Science and Technology, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, L. B. Ilcewicz, E. J. Kramer, and S. Mahajan, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2001, pp. 1056-1060.
- [6] R. Boyer, “Aircraft Materials” in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, L. B. Ilcewicz, E. J. Kramer, and S. Mahajan, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2001, pp. 66-73.

- [7] L. B. Ilcewicz, “Composite Applications in Commercial Airframe Structures” in Comprehensive Composite Materials, A. Kelly and C. Zweben, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2000, pp. 87-119.
- [8] D. W. Richerson, “Industrial Applications of Ceramic Matrix Composites” in Comprehensive Composite Materials, A. Kelly and C. Zweben, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2000, pp. 549-570.
- [9] R. Brooks, “Composites in Automotive Applications: Design” in Comprehensive Composite Materials, A. Kelly and C. Zweben, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2000, pp. 341-363.
- [10] D. B. Miracle, “Metal matrix composites–From science to technological significance”, Composites Science and Technology, 65, 2005, pp 2526–2540.
- [11] Composite Manufacturing Process Analysis for Automotive parts
- [12] <http://www.thaimetaltech.com/สมบัติเชิงกล.html>
- [13] <http://www.rmutphysics.com/charud/meta/1/Mechanical%20Properties.htm>
- [14] Daniel I.M. and Ishai O. (1994). Engineering Mechanics of Composite Materials. New York: Oxford University Press.
- [15] Vaidya U. (2011). Composites for Automotive, Truck and Mass Transit. DEStech Publications, Inc.
- [16] <http://www.designworldonline.com/reinforcement-strategies-for-high-performance-composites/>
- [17] <http://www.compositesworld.com/articles/formulation-flexibility-direct-smc>
- [18] Vaidya U. (2011). Composites for Automotive, Truck and Mass Transit. DEStech Publications, Inc.
- [19] Composite Manufacturing Process Analysis for Automotive parts
- [20] <http://www.assemblymag.com/articles/print/90348-aerospace-fastening-in-the-21st-century>
- [21] <http://www.sealantequipment.com/composite-adhesive-dispense-equipment.htm>

บทที่ 5

แนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน โดยข้อมูลจาก International Energy Agency หรือ IEA แสดงให้เห็นถึงจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริดและแบตเตอรี่สะสมทั่วโลกที่สูงถึง 2 ล้านคัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ หลายประเทศทั่วโลกยังได้กำหนดมาตรการสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้าด้านต่างๆ เช่น การสนับสนุนด้านการเงินและภาษีแก่ผู้ซื้อยานยนต์ไฟฟ้า การสร้างสถานีอัดประจุไฟฟ้าสาธารณะ และการสนับสนุนการวิจัยและพัฒนายานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีที่นักวิจัยทั่วโลกได้ให้ความสนใจในการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะยานยนต์ไฟฟ้า คือ การวิจัยและพัฒนาแบตเตอรี่ขับเคลื่อนที่มีความจุพลังงานเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักเบา และราคาถูก ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวของแบตเตอรี่ขับเคลื่อนนับเป็นปัจจัยสำคัญในการส่งเสริมให้ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ ในการพัฒนาแบตเตอรี่ได้มีการค้นคว้าและพัฒนาวัสดุชนิดใหม่เพื่อใช้สำหรับเซลล์แบตเตอรี่ อาทิเช่น ลิเทียม-อากาศ หรือการใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบแข็ง (Solid-state) เป็นต้น ด้านการวิจัยและพัฒนามอเตอร์ มุ่งเน้นการพัฒนามอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีน้ำหนักลดลง และมีความปลอดภัยทางไฟฟ้ามากขึ้น รวมถึงระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์เพื่อให้การใช้งานมอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด

นอกจากนี้ จากการรวบรวมข้อมูลยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEV) ที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบันในต่างประเทศดังแสดงในตารางที่ 5-1 พบว่า สมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น โดยสามารถวิ่งได้ไกลถึง 180 – 300 กิโลเมตร ต่อการอัดประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ให้มีความจุพลังงานเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 5-1 การเปรียบเทียบรายละเอียดยานยนต์ไฟฟ้านิสสัน ลีฟ [1] และ BMW i3 [2]



Manufacturer	Nissan	BMW
Model	LEAF S30	i3 2016
City/Highway/combine MPGe	124/101/112	137/111/124
EV Driving Range (mile/km)	107/172	80/128
Energy Consumption (km/kWh)	5.7	3.9
Cost (USD)	34,200	43,395
Motor Specification	AC synchronous electric motor. Power 80 kW / Torque 280 Nm	AC synchronous electric motor. Power 125 kW / Torque 249 Nm
Battery Specification	30kWh lithium-ion (Li-ion) battery	33 kWh lithium-ion battery
Battery chargers	AC 3.3 kW & 6.6 kW (Optional)	7.4 kW Onboard Charger
Charging Time	3.3 kW AC: 10 hours 6.6 kW AC: 5 hours DC 20 min	1.83 kW AC : 18 hours

ตารางที่ 5-1 (ต่อ) ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน [3, 4 ,5]



Manufacturer	Chevrolet	Mercedes-Benz	Chevrolet
Model	2016 SPARK EV 1LT	B-Class Electric	Chevrolet Bolt EV
City/Highway/combine	128/109/119	85/82/84	128/110/119

MPGe			
EV Driving Range (mile/km)	82/131.2	124 / 198	200/ 320
Energy Consumption (km/kWh)	5.71	4	5.3
Cost (\$USD)	25,120	39,900	35,000
Motor Specification	104.4 kW / Torque 443 Nm	132 kW / Torque 340 Nm	permanent magnetic drive motor 150 kW Torque 360 Nm
Battery Specification	19 kWh lithium-ion(Li-ion) battery	28 kWh lithium-ion (Li-ion) battery	60 kWh lithium-ion (Li-ion) battery
Battery chargers	AC 0.95 kW & 2.71 kW (Optional) & CHAdeMO	Standard 10 kW onboard charge	AC 7.2 kW & DC 30 kW
Charging Time	0.95 kW AC: 20 hrs 2.71 kW AC: 7 hrs DC 20 min	10 kW home wallbox : 3 hrs	7.2kW AC : 9.5 hrs 30 kW DC : 50 mile @ 2 hrs

ตารางที่ 5-1 (ต่อ) ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน [6, 7 ,8]



Manufacturer	Volkswagen	Ford	Tesla
Model	e-Golf	Focus Electric	MODEL S – P90D
City/Highway/combine MPGe	265.35	110/99/105	89/98/93
EV Driving Range (mile/km)	118/190	76/122	250/402
Energy Consumption (km/kWh)	7.85	5.3	4.5
Cost (£)	31,680	29,170	110,700
Motor Specification	synchronous motor 85 kW / torque 270 Nm	electric motor 107 kW / Torque 250 Nm	AC synchronous electric motor, Peak 270 kW / Torque 440 Nm
Battery Specification	24.2 kWh lithium-ion (Li-ion) battery	23 kWh liquid-cooled, lithium-ion battery	90 kWh lithium-ion battery
Battery chargers	Combo charging 3.3 kW on-board charger	6.6 kW Onboard Charger	(11.5-17.3 kW AC) HPWC J1772 adapters (public station) NEMA 5-15 2.8 kW (120V) NEMA 14-50 9.6 kW (240V)
Charging Time	3.3 kW AC: 480 minute DC: 35 minutes	3.6 hours / 240V charging 20 hours / 120V charging	76.75 Hrs Charge Time @ 2.8 kW , 8.5 Hrs Charge Time @ 9.6 kW and 1 Hr Charge Time @ 440V

นอกจากตารางที่ 5-1 ซึ่งแสดงถึงยานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันแล้ว บริษัทผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้าหลายรายได้มีการออกแบบยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายในอนาคต โดยมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

Mitsubishi iMiEV

บริษัท Nissan และ Mitsubishi ได้ร่วมมือวิจัยเพื่อพัฒนารถยนต์รุ่นใหม่ ซึ่งอยู่ในกลุ่มรถยนต์ขนาดเล็กหรือมินิคาร์ อีกทั้งวิจัยและพัฒนาชิ้นส่วนสำคัญๆ เช่น แบตเตอรี่ อีกด้วย ทั้งนี้ บริษัท Nissan มีความเชี่ยวชาญด้านรถยนต์ไฟฟ้าจากการผลิตรถยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf ที่มียอดจำหน่ายทั่วโลกกว่า 124,000 คัน ในขณะที่บริษัท Mitsubishi ก็มีความเชี่ยวชาญในการออกแบบและผลิตรถยนต์ไฟฟ้า ดังจะเห็นได้จากความสำเร็จของรถยนต์ไฟฟ้า Mitsubishi iMiEV ที่วางจำหน่ายมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2009 อีกทั้งยังเป็นรถยนต์ไฟฟ้าที่มีราคาถูกที่สุดในประเทศญี่ปุ่น โดยตั้งราคาจำหน่ายเพียง 1.78 ล้านบาท เมื่อนับรวมกับเงินสนับสนุนจากรัฐบาล 740,000 บาท ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ที่รถยนต์ไฟฟ้าใหม่ที่จะเกิดจากความร่วมมือระหว่าง Mitsubishi และ Nissan นั้น จะมีหลายส่วนที่เหมือนกัน โดยเฉพาะส่วนที่คาดว่าจะมีความสำคัญ อาทิเช่น ชิ้นส่วนที่ใช้วัสดุน้ำหนักเบา นอกจากนี้คาดว่าจะมีราคาจำหน่ายเพียง 1.5 ล้านบาท เมื่อนับรวมกับเงินสนับสนุนจากรัฐบาล



รูปที่ 5-1 Mitsubishi imiev [9]

Nissan Leaf

บริษัท นิสสัน มอเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด เตรียมเปิดตัวรถยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ Nissan Leaf 2018 อย่างไรก็ตามยังไม่ทราบถึงรายละเอียดต่างๆ รวมไปถึงวันและเวลาการเปิดตัวของ Nissan Leaf 2018 ใหม่ที่ชัดเจน ทั้งนี้ รถยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf 2018 ออกจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่ประเทศญี่ปุ่นเมื่อวันที่ 2 ตุลาคม 2560 นี้ ด้วยราคาเริ่มต้นที่ 962,000 บาท (โดยประมาณ) โดยการเปิดตัวรถยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf 2018 โนม

ใหม่ในครั้งนี้ เพื่อต่อยอดสู่ด้านยานยนต์ไฟฟ้าและความมุ่งมั่นของ Nissan ในการใช้เทคโนโลยี e-Power และยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อนำประเทศไทยไปสู่อนาคตรวมทั้งสิ่งแวดล้อมที่ดี รถยนต์ไฟฟ้า Nissan Leaf 2018 ใหม่ ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าประเภท AC Synchronous electric motor ที่ให้กำลังสูงสุด 150 แรงม้า ที่ความเร็ว 3,283 – 9,795 รอบต่อนาที ซึ่งมากกว่ารุ่นเดิมถึง 38 แรงม้า และแรงบิดสูงสุด 320 นิวตันเมตร ที่ 0 – 3,283 รอบต่อนาที พร้อมแบตเตอรี่ประเภท Li-ion ที่มีความจุ 40 กิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) สามารถวิ่งไกลสุด 400 กิโลเมตรต่อการอัดประจุไฟฟ้า 1 ครั้ง (ทดสอบตามมาตรฐาน JC08 ของประเทศญี่ปุ่น)



รูปที่ 5-2 Nissan Leaf 2018 [10]

FOMM

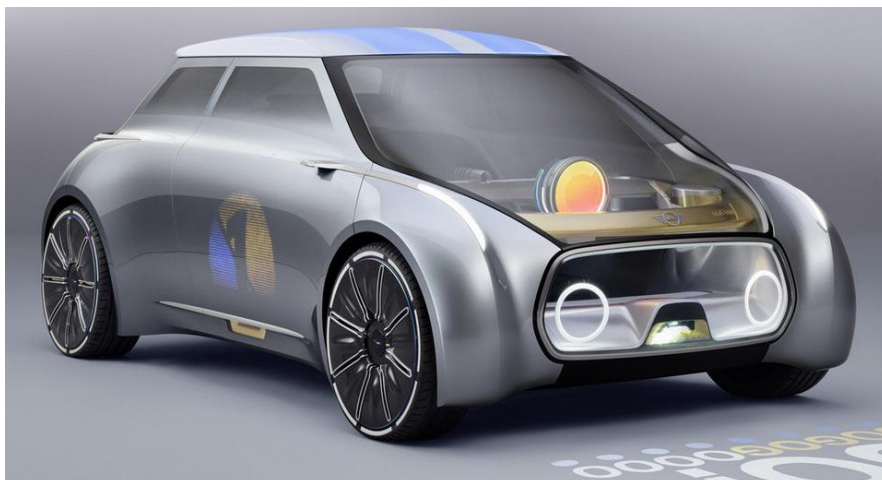
ยานยนต์ไฟฟ้าของบริษัท FOMM เป็นยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก 4 ที่นั่ง ซึ่งบริษัทได้ออกแบบขึ้นโดยมีแผนที่จะจำหน่ายจริงในปี ค.ศ. 2018 ทั้งนี้ บริษัท FOMM เคยเปิดตัวรถยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก Concept One ครั้งแรกไปแล้วในงานบางกอก มอเตอร์โชว์ 2014 ซึ่งยานยนต์ไฟฟารุ่นนี้มีความพิเศษ คือสามารถลอยน้ำได้ อย่างไรก็ตาม ยานยนต์ไฟฟ้า FOMM Concept One ยังติดปัญหาด้านกำลังขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่น้อยกว่าข้อกำหนดจากกรมการขนส่งทางบก อย่างไรก็ตาม กรมการขนส่งทางบกได้ปรับปรุงแก้ไขข้อกำหนดด้านพิกัดกำลังมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าให้มีความสอดคล้องกับสหภาพยุโรปมากขึ้น ดังนั้นยานยนต์ไฟฟ้า FOMM EV จึงผ่านข้อกำหนดและสามารถจดทะเบียนได้ ยานยนต์ไฟฟ้า FOMM EV ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งติดตั้งอยู่ที่ล้อหน้า โดยมอเตอร์ที่ล้อหน้าทั้ง 2 ฝั่งนั้นให้กำลังรวม 15 กิโลวัตต์ หรือประมาณ 20 แรงม้าจากเดิมที่ให้กำลัง 13.4 แรงม้า และแรงบิดอยู่ที่ 560 นิวตันเมตร ยานยนต์ไฟฟ้า FOMM EV สามารถใช้งานได้ประมาณ 6 ชั่วโมง หรือขับเคลื่อนได้ระยะทางประมาณ 100 กิโลเมตร ต่อการอัดประจุไฟฟ้าเต็มหนึ่งครั้ง



รูปที่ 5-3 FOMM EV [11]

All Electric MINI

บริษัท BMW ได้เปิดเผยรายละเอียดเกี่ยวกับยุทธศาสตร์สำหรับการใช้พลังงานไฟฟ้าในอนาคต ซึ่งรวมไปถึงการเปิดตัวแนวคิดยานยนต์ไฟฟ้า All-Electric MINI ซึ่งมีการตั้งเป้าการผลิตในปี ค.ศ. 2019 โดยระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์ e-mobility ของบริษัท BMW ในแคว้นบาวาเรีย เมืองมิวนิค ประเทศเยอรมนี ก่อนที่จะถูกนำไปติดตั้งลงในรถรุ่นใหม่ที่โรงงานของ MINI ในเมืองฮ็อกพอร์ด สหราชอาณาจักร บริษัท BMW คาดการณ์ว่า ยานยนต์ไฟฟ้าสัดส่วนของยานยนต์ไฟฟ้าจะสูงขึ้นในช่วงระหว่าง 15 -25% ของยอดขายภายในปี ค.ศ. 2025 อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างเช่น นโยบายเพื่อสร้างแรงจูงใจ อีกทั้งโครงสร้างพื้นฐานในส่วนของการอัดประจุไฟฟ้า และระยะการขับขี่ ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในความสำเร็จของยานพาหนะที่ใช้ไฟฟ้าจากตลาดสู่ตลาด โดยทาง BMW Group จะพัฒนาแพลตฟอร์มแบบแยกส่วนซึ่งจะสามารถรองรับระบบขับเคลื่อนทั้งสามแบบ ได้แก่ เครื่องยนต์สันดาปภายใน ระบบปลั๊กอินไฮบริด และระบบไฟฟ้าแบบเต็มรูปแบบ นอกจากนี้บริษัท BMW ยังมีแผนที่จะเปิดตัวยานยนต์ไฟฟ้า i8 Roadster ในปี ค.ศ. 2018 และ X3 ซึ่งเป็นรุ่นที่ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในปี ค.ศ. 2020 และ iNext ในปี ค.ศ. 2021 ตามลำดับ



รูปที่ 5-4 BMW [12]

Hyundai Kona

Hyundai Kona เป็นรถประเภท SUV ขนาดคอมแพ็ค โดยในยุโรป บริษัท Hyundai มีแผนเปิดตัว Hyundai Kona ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า โดยติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่กว่ารุ่น Ioniq EV และตั้งเป้าว่าจะสามารถขับเคลื่อนเป็นระยะทางสูงสุดกว่า 390 กิโลเมตรต่อการอัดประจุหนึ่งครั้ง ทั้งนี้ Hyundai Kona EV เป็นหนึ่งใน 15 รุ่นของฮุนได ที่จะมาพร้อมระบบขับเคลื่อนแบบไฟฟ้า รวมถึงเครื่องยนต์ไฮบริด ปลั๊กอินไฮบริด และเซลล์เชื้อเพลิง โดยทั้งหมดมีแผนเปิดตัวภายในปีค.ศ. 2020 ที่จะถึงนี้



รูปที่ 5-5 Hyundai Kona [13]

5.1 เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.nissanusa.com/>
- [2] <https://www.bmwusa.com/>

- [3] <http://www.chevrolet.com/>
- [4] <http://www.mercedes-benz.co.uk/>
- [5] <http://www.chevrolet.com/>
- [6] <http://www.volkswagen.co.uk/new/golf-gte-vii/home>
- [7] <https://www.ford.com/>
- [8] https://www.tesla.com/en_GB/models/design
- [9] <https://www.autodeft.com/deftreport/inter-mitsubishi-nissanminicar/>
- [10] <https://auto.mthai.com/news/44990.html>
- [11] <https://auto.mthai.com/news/43515.html>
- [12] <https://auto.mthai.com/news/42342.html>
- [13] <http://auto.sanook.com/60647/>