วิธีการจัดการแบตเตอรี่เสื่อมสภาพสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
Method of Damaged Batteries Management for Electric Vehicles

ธีรพงศ์ บริรักษ์[1]
Theerapong Borirak[1]
[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย
[1]School of Engineering, Eastern Asia University
Received: November 30, 2023
Revised: February 21, 2024
Accepted: February 28, 2024

บทคัดย่อ

ปัญหาวิกฤตการณ์จากการขาดแคลนพลังงาน ปัญหามลพิษทางอากาศจากรถยนต์ โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัญหาอุณภูมิที่สูงขึ้นในชั้นบรรยากาศจากสภาวะโลกร้อนเป็นอีกข้อกังวลของสาธารณชนและได้รับความสนใจอย่างมาก ยานยนต์ไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทจากความต้องการลดการปล่อยมลพิษ รวมถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีด้านแบตเตอรี่ถือเป็นกุญแจสำคัญอย่างหนึ่งในยานยนต์ไฟฟ้า ประเทศผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้า เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น จีน และเยอรมนี ได้เปิดตัวโครงการพิเศษที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ให้สามารถตอบสนองความต้องการของยานยนต์ไฟฟ้าได้ ผลการวิจัยจำนวนมากมีการคิดค้นและนำเทคโนโลยีต่าง ๆ ของแบตเตอรี่มาใช้ กระบวนการนี้ยังคงดำเนินต่อไปเพื่อให้บรรลุเป้าหมายประสิทธิภาพที่ต้องการ บทความนี้เป็นการนำเสนอรูปแบบการบริหารจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่หมดอายุการใช้งานแล้ว การนำกลับมาใช้ใหม่ ตัวอย่างการบริหารจัดการเกี่ยวกับแบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจากประเทศผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้าชั้นนำ เช่น สหภาพยุโรปมีการตั้งข้อกำหนดในการเรียกคืนแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แล้ว ในสหรัฐอเมริกานั้น มีหน่วยงานรับผิดชอบทางด้านสิ่งแวดล้อมกำหนดให้แบตเตอรี่ต้องถูกจัดการตามกฎ Universal Waste Rules ในญี่ปุ่นมีกฎหมายเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ และจีนได้กำหนดนโยบายเกี่ยวกับการ Recycle แบตเตอรี่ เป็นต้น

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

Abstract

Crisis problems from energy shortages and problems with air pollution from cars, especially the release of carbon dioxide. The issue of rising temperatures in the atmosphere due to global warming is another public concern and has received a great deal of attention. Electric vehicles have come into play due to the need to reduce emissions, including using energy efficiently to preserve the environment. Battery technology is one of the keys to electric vehicles. Electric vehicle-producing countries such as the United States, Japan, China, and Germany have launched special projects to improve battery performance to meet the needs of electric vehicles. As a result of much research, various technologies have been invented and introduced in the battery, and this process continues to achieve the desired performance target. This article presents a battery management model for electric vehicles that have reached the end of their useful life. As an example of battery management for electric vehicles from leading electric vehicle-producing countries, such as the European Union, there are requirements for recalling used electric vehicle batteries. In the United States, environmental agencies require batteries to be handled according to the Universal Waste Rules. In Japan, there are laws to address the problem of electronic waste. And China has set a policy regarding battery recycling, etc.

Keywords: electric vehicle, lithium iron battery, a worn out battery

บทนำ

นับตั้งแต่การปฏิวัติวงการอุตสาหกรรม จนถึงการเกิดการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจและการพัฒนากระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมขึ้นทำให้ปริมาณการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความต้องการทางด้านการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและสังคมทำให้ปริมาณการใช้พลังงานและการปล่อยปริมาณก๊าซเรือนกระจกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น อันเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะโลกร้อน ภาวะเรือนกระจก ฤดูกาลและสภาพอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เกิดการเจรจาในระดับนานาชาติเพื่อหาทางออกร่วมกันในการลดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะการณ์ดังกล่าว ภายใต้กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ” (UNFCCC) ในปี พ.ศ. 2535 นอกจากนี้ยังมีการประชุมรัฐภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสมัยที่ 21 (Conference of Parties--COP-21) ในปี พ.ศ. 2558 ณ กรุงปารีสได้มีการเจรจาข้อตกลงเกี่ยวกับการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างประเทศสมาชิก 196 ประเทศ และในที่ประชุมได้มีมติรับรองข้อตกลงว่าด้วยการต่อสู้กับภาวะโลกร้อน ปริมาณก๊าซเรือนกระจกมีแนวโน้มสูงขึ้นแบบก้าวกระโดดนับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 จนถึงปัจจุบัน ดังแสดงในภาพ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย ซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (Sulfur Hexafluoride--SF_6) เปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Perfluorocarbons--PFCs) ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (Nitrogen Trifluoride--NF_3) ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide--N_2O) การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและป่าไม้ (Land Use, Land-Use Change and Forestry--LULUCF) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbons--HFCs) มีเทน (Methane) หรือคาร์บอนเททราไฮไดรด์ (Carbon Tetrahydride--CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide--CO_2)

ปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเกิดจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม ใน

ปี 2565 การบริโภคผลิตภัณฑ์น้ำมันทั่วโลกขยายตัว 3.5% สูงกว่าค่าเฉลี่ยในปี 2553-2562 (+1% ต่อปี) แต่ช้ากว่าปี 2564 (+6.1%) เนื่องจากความซบเซาในสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรปและเพิ่มขึ้น 0.9% เฉพาะในจีนอันเป็นผลมาจากการชะลอตัวของเศรษฐกิจและนโยบาย Zero-Covid ในการขนส่ง การบริโภคผลิตภัณฑ์น้ำมันทั่วโลกที่เพิ่มขึ้นในภูมิภาคเอเชีย (+2.5%) โดยเฉพาะอินเดีย (+10%) อินโดนีเซีย (+9.3%) ซึ่งทั้งสองมีการเติบโตทางเศรษฐกิจที่แข็งแกร่ง ในขณะที่การบริโภคลดลงมากกว่า 1% ญี่ปุ่นและเกาหลีใต้ ในละตินอเมริกาเพิ่มขึ้น (+7.9% รวมถึง +13% ในเม็กซิโก +9.8% ในอาร์เจนตินา และ +2.5% ในบราซิล) ในตะวันออกกลาง (+7% โดยเฉพาะในซาอุดีอาระเบียและสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์) ในแอฟริกา (+4.5% โดยเฉพาะในอียิปต์และแอลจีเรีย) และในแคนาดา (+3.4%) การบริโภคผลิตภัณฑ์น้ำมันขยายตัวในระดับปานกลางในออสเตรเลีย (+1.3%) และรัสเซีย (+2.6%) ดังแสดงในภาพ 2

เมื่อพิจารณารายภาคกิจกรรมที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกดังแสดงในภาพ 3 พบว่า ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากภาคการขนส่งคิดเป็น 16% ยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันมีศักยภาพในการลดภาวะโลกร้อน (GWP) 10% ถึง 24% เมื่อเทียบกับรถยนต์สันดาปภายในที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลหรือเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (Hawkins. et al., 2013)

จากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมทั้งหมดด้วยปริมาณการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกและปัญหาด้านพลังงานจึงมีการพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนมาใช้พลังงานสะอาดของภาคขนส่งเป็นการดำเนินงานตามเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals--SDGs) ข้อ 7 ขององค์การสหประชาชาติ การกำหนดแนวทางการลงทุนเพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ นโยบายการลงทุน ที่เอื้อต่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมประกอบด้วย การลงทุนสถานีชาร์จไฟฟ้า การใช้แอปพลิเคชัน การส่งเสริมความปลอดภัย และการสร้างความเชื่อมั่นซึ่งเป็นการตัดสินใจที่มีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับหลายฝ่าย ปัจจัยที่มีอิทธิพลได้แก่ ความปลอดภัย ความคุ้มค่าด้านราคา ความคุ้มค่าด้านวิศวกรรม การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และความเชื่อมั่นในนวัตกรรม แนวทางการพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าในปีพ.ศ. 2566 มุ่งเน้นไปที่การรองรับรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแบตเตอรี่และในระยะยาวมีแนวโน้มที่จะพัฒนาไปใช้รถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีความพร้อมมากขึ้น (Chaiwannakup et al., 2023)

ยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันมีศักยภาพในการลดภาวะโลกร้อน (GWP) 10% ถึง 24% เมื่อเทียบกับรถยนต์สันดาปภายในที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลหรือเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (Hawkins et al., 2013)

ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า

นับตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 18 จนถึงปัจจุบันมีการวิวัฒนาการและพัฒนาการต่าง ๆ มากมายของยานยนต์ไฟฟ้าตลอดจนการเติบโตและการพัฒนาในด้านแบตเตอรี่ ปัจจัยหลายอย่างดีขึ้น ประสิทธิภาพ เทคโนโลยีล้ำหน้า การเชื่อมต่อความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เงียบยิ่งขึ้น การขับขี่และต้นทุนการดำเนินการต่ำถูกรวมเข้าด้วยกัน แม้ว่าจะมีข้อดีแต่มีข้อกังวลบางประการก่อนที่จะนำไปใช้ เช่น ระยะการขับรถ ต้นทุนเริ่มต้น การขาดโครงสร้างพื้นฐานในการชาร์จ และเวลาที่ต้องใช้เพื่อชาร์จยานพาหนะ ระยะการขับขี่เฉลี่ยของยานยนต์ไฟฟ้าอยู่ที่ 150–200 ไมล์ ซึ่งน้อยกว่ายานยนต์สันดาปภายในค่อนข้างมาก แต่จะดีกว่าสำหรับผู้ที่มีการเดินทางรายวัน 70–100 กิโลเมตร การชาร์จไฟรถยนต์เป็นอีกหนึ่งข้อกังวลของยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉลี่ยแล้วแบตเตอรี่ทั่วไปของยานยนต์ไฟฟ้าใช้เวลาประมาณ 8 ชั่วโมงในการชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 60 kWh จากแบตเตอรี่หมดจนเต็ม ซึ่งสามารถครอบคลุมระยะทางสูงสุด 200 ไมล์ เวลาในการชาร์จนี้สามารถลดลงเหลืออย่างน้อย 30 นาที ด้วยการใช้สถานีชาร์จด่วน การปรับปรุงเทคโนโลยีแบตเตอรี่ เวลาที่ต้องใช้ในการชาร์จแบบชาร์จเร็ว เมื่อพิจารณาปัจจัยและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีแล้ว ตลาดของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่จะถึงจุดเปลี่ยนในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า (Faraz et. al., 2021) จากภาพ 3 พบว่า ปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าสะสมในปัจจุบันมีจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าสะสมทั่วโลกเกินกว่า 10,000,000 คัน

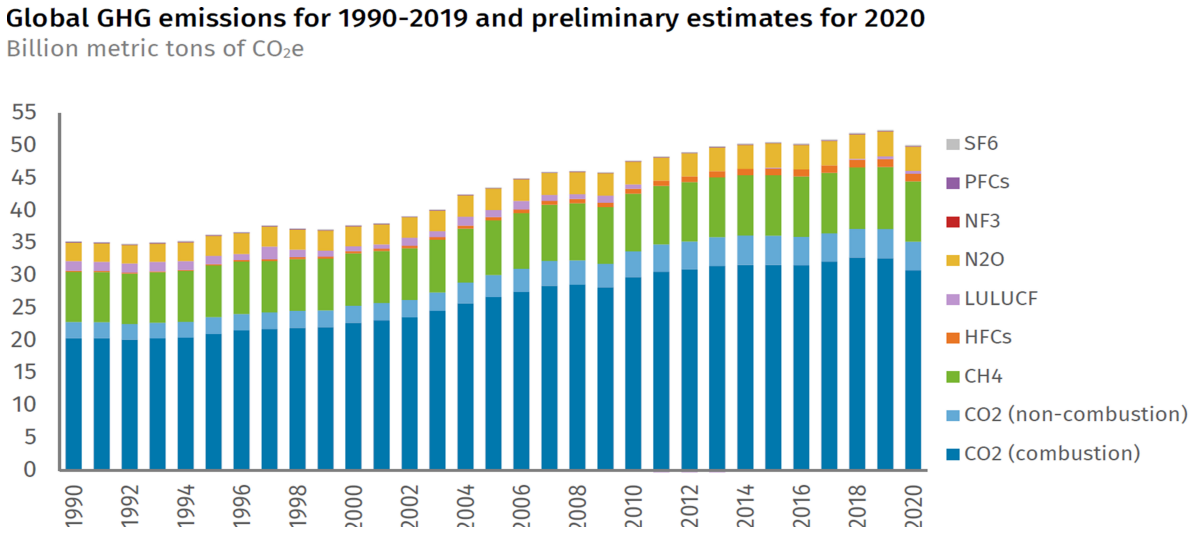
ยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicle) หมายถึง ยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว หรือทำงานร่วมกับเครื่องยนต์ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. ยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานผสม หรือไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle--HEV)

2. ยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานผสมแบบเสียบปลั๊ก หรือปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in Hybrid Electric Vehicle--PHEV)

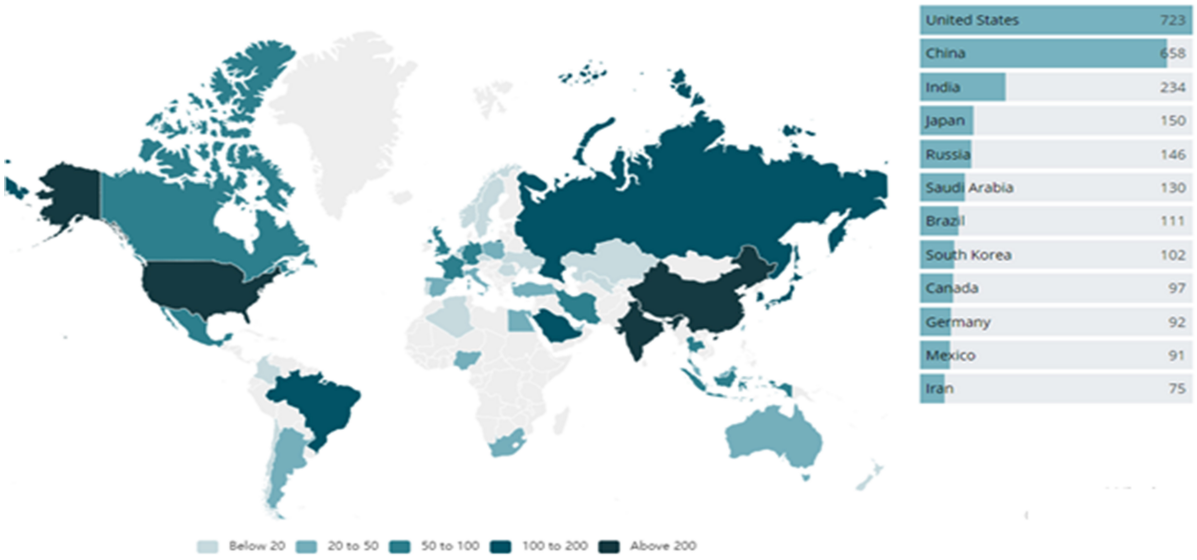
3. ยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle--BEV)

4. ยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle--FCEV)



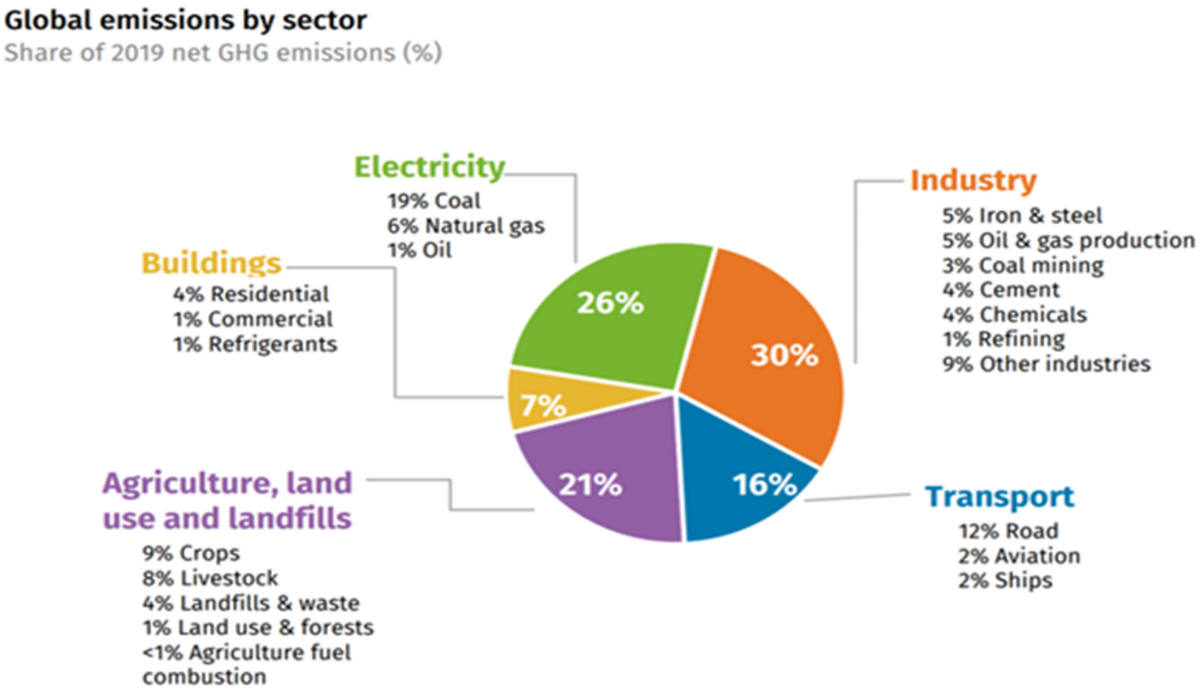
ภาพ 1 แสดงปริมาณก๊าซเรือนกระจก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 - ค.ศ. 2019

Note. From Preliminary 2020 Global Greenhouse Gas Emissions Estimates by Rhodium Group, LLC, 2020, retrieved from https://rhg.com/research/preliminary-2020-global-greenhouse-gas-emissions-estimates/



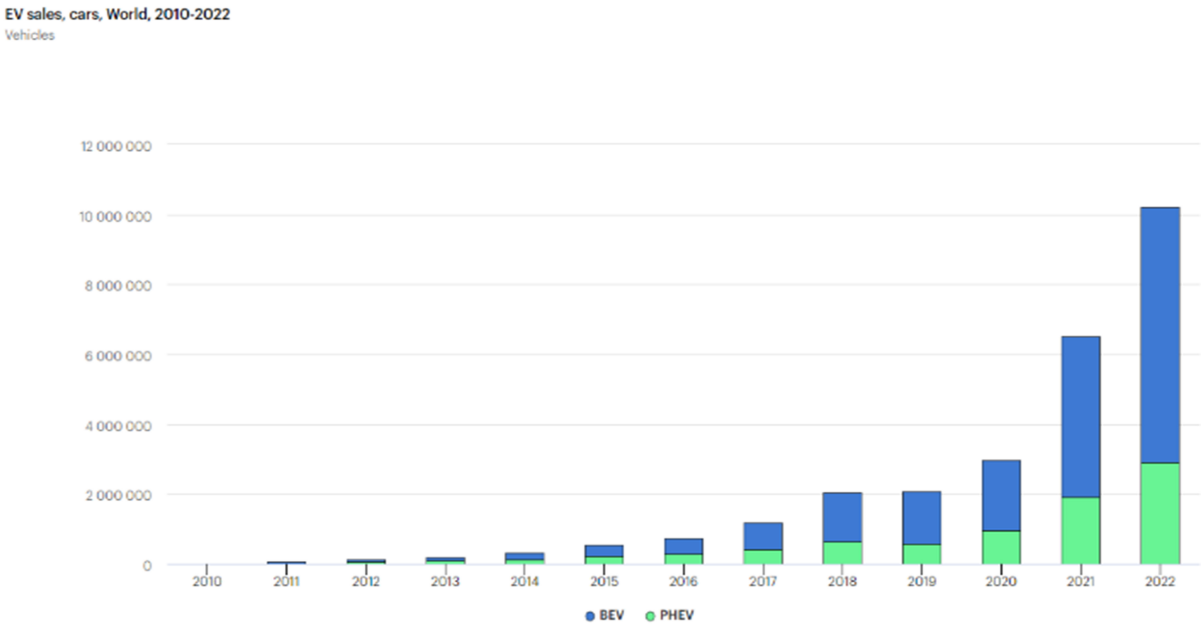
ภาพ 2 แสดงการบริโภคผลิตภัณฑ์น้ำมันทั่วโลก ในปี 2022

Note. From *Oil products domestic consumption* by Enerdata, 2022, retrieved from https://yearbook.enerdata.net/oil-products/world-oil-domestic-consumption-statistics.html



ภาพ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำแนกตามกิจกรรม

Note. From *Preliminary 2020 Global Greenhouse Gas Emissions Estimates* by Rhodium Group, LLC., 2020, retrieved from https://rhg.com/research/preliminary-2020-global-greenhouse-gas-emissions-estimates/



ภาพ 4 แสดงปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าสะสมทั่วโลกตั้งแต่ปี 2010–2022

Note. From *Explore and download the full data behind the Global EV Outlook* by International Energy Agency, 2023, retrieved from https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer

จากภาพ 4 แสดงปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าสะสมทั่วโลกที่มีการจัดจำหน่ายตั้งแต่ปี 2010 จนถึงปี 2022 มีมากกว่า 10 ล้านคัน โดยประเทศจีนมีปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าสะสมสูงสุดถึง 6 ล้านคัน ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้าทั้งหมดใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน

มีการประเมินยานยนต์ไฟฟ้าที่จะหมดอายุการใช้งานในสหรัฐอเมริกา คาดว่าอยู่ระหว่าง 200,000 คัน ถึง 500,000 คันต่อปี อาจใกล้ถึง 1 ล้านคันในปี 2568 และ 2 ล้านคันภายในปี 2583 (Ai & Borucki, 2018)

แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะกลายเป็นปัญหาใหญ่ในอนาคตอันใกล้หากไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้อง ทั้งนี้ก็เพราะมีสารเคมีที่เป็นพิษสูงสร้างผลกระทบต่อระบบนิเวศ นอกจากพลาสติกแล้ว ตัวทำละลายแล้วชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนที่ใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่ด้วยโลหะสำคัญที่เป็นองค์ประกอบ เช่น ทองแดง นิกเกิล ลิเธียม และโคบอลต์ ตลาดการ recycle แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเติบโตแบบทวีคูณจาก 200,000 เมตริกตันของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่สามารถ recycle ได้ในปี 2021 ถึง 7 ล้านเมตริกตันในปี 2578 ซึ่งมีมูลค่าเกิน 15 พันล้านยูโร (Muller et.al., 2021)

แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับยานยนต์และยานยนต์ไฟฟ้า

ปัจจุบันมีแบตเตอรี่เพียง 3 ชนิดเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า คือ แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิลเมทัลไฮไดร์ด และแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน โดยแบตเตอรี่ลิเทียมมีคุณสมบัติที่เหมาะกับการนำมาใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติด้านความหนาแน่นพลังงานที่สูง ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมมีขนาดและน้ำหนักน้อยกว่าแบตเตอรี่ตะกั่ว และแบตเตอรี่นิกเกิลที่มีความจุเท่ากัน

1. แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด (Lead Acid battery)

แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วในปัจจุบันเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในยานยนต์ โดยใช้เป็นแบตเตอรี่สำหรับติดเครื่องยนต์เป็นส่วนใหญ่ แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรดนั้นมีขั้วบวกทำจากตะกั่วที่มีลักษณะพรุน (porous lead) ขั้วลบทำจากตะกั่วออกไซด์ (PbO_2) ที่มีลักษณะพรุนเช่นกัน และมีกรดกำมะถัน หรือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลด์ แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรดมีความจุพลังงานต่อน้ำหนักและปริมาตรต่ำ การใช้งานในยานยนต์จึงมักใช้สำหรับติดเครื่องยนต์เพียงเท่านั้น มีการนำไปใช้กับ ยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กบ้าง

2. แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิลแคดเมียม (Nickelcadmium battery)

แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดอัลคาไลน์ชนิดแรก โดยชื่ออัลคาไลน์นั้นมาจากสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ซึ่งมีธาตุที่อยู่ในหมู่อัลคาไลน์เป็นส่วนประกอบ แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิลแคดเมียมมีขั้วบวกผลิตมาจากนิกเกิลออกไซด์ (NiO(OH)) ขั้วลบผลิตมาจากแคดเมียม (Cd) และมีสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นอิเล็กโทรไลต์

3. แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิลเมทัลไฮไดร์ด (Ni-MH battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้อาศัยปฏิกิริยาเคมีที่มีขั้วลบซึ่งเป็นโลหะผสมที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนจนเกิดเป็นเมทัลไฮไดร์ดได้ โดยโลหะพวกนี้มักมีสูตรเคมีอยู่ในรูป AB_2 หรือ AB_5 เช่น $ZrNi_2$ หรือ $LaNi_5$ ส่งผลให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความจุพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรดมาก

4. แบตเตอรี่ประเภทเมทัลแอร์ (Metal-Air Battery)

แบตเตอรี่ประเภท Metal–Air มีความหนาแน่นพลังงานสูง แต่มีเพียงแบตเตอรี่ Zn-Air เท่านั้นที่ได้รับการพัฒนา และทดสอบจริงกับยานยนต์ไฟฟ้า โดยแบตเตอรี่ประเภท Zn-Air มีขั้วแอโนดที่ผลิตจากสังกะสี และขั้วแคโทด คือ ก๊าซออกซิเจนจากอากาศ โดยเซลล์ประเภทนี้ต้องมีทางให้ออกซิเจนซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวกผ่านเข้ามาทำปฏิกิริยาระหว่างการคายประจุ

5. แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน (Lithium Iron Battery)

ลิเทียมเป็นแร่ที่มีน้ำหนักเบาที่สุดในตารางธาตุรองมาจากไฮโดรเจน และมีค่าความเสถียรต่ำซึ่งทำให้แบตเตอรี่ประเภทนี้มีค่าความต่างศักย์ และความจุพลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทอื่น ๆ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ในปัจจุบันใช้ $LiCoO_2$--LCO โลหะออกไซด์อื่น ๆ หรือสารประกอบฟอสเฟต เช่น $LiMn_2O_4$--LMO $LiNiO_2$--LNO Li-Mn-Ni-Co-O_2—NMC LiFePO4--LFP เป็นขั้วแคโทด และคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด มีสารละลายอินทรีย์ของเกลือที่มี Li+ เป็นส่วนประกอบเป็นอิเล็กโทรไลต์ชนิด

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ได้รับความนิยมมีใช้อยู่ในปัจจุบันแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. Lithium Iron Phosphate--LFP

2. Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide--NMC

3. Lithium Titanate--LTO

4. Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide--NCA

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภทมีคุณสมบัติและความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกันไป ดังแสดงในภาพ 5 โดยพิจารณาคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. ค่าความจุพลังงานจำเพาะ (specific Energy) หมายถึง ปริมาณความจุแบตเตอรี่ต่อหนึ่งหน่วยมวล มีหน่วยเป็น Wh/kg

2. ค่ากำลังจำเพาะ (specific Power) หมายถึง กำลังที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ต่อหนึ่งหน่วยมวลมีหน่วยเป็น W/kg

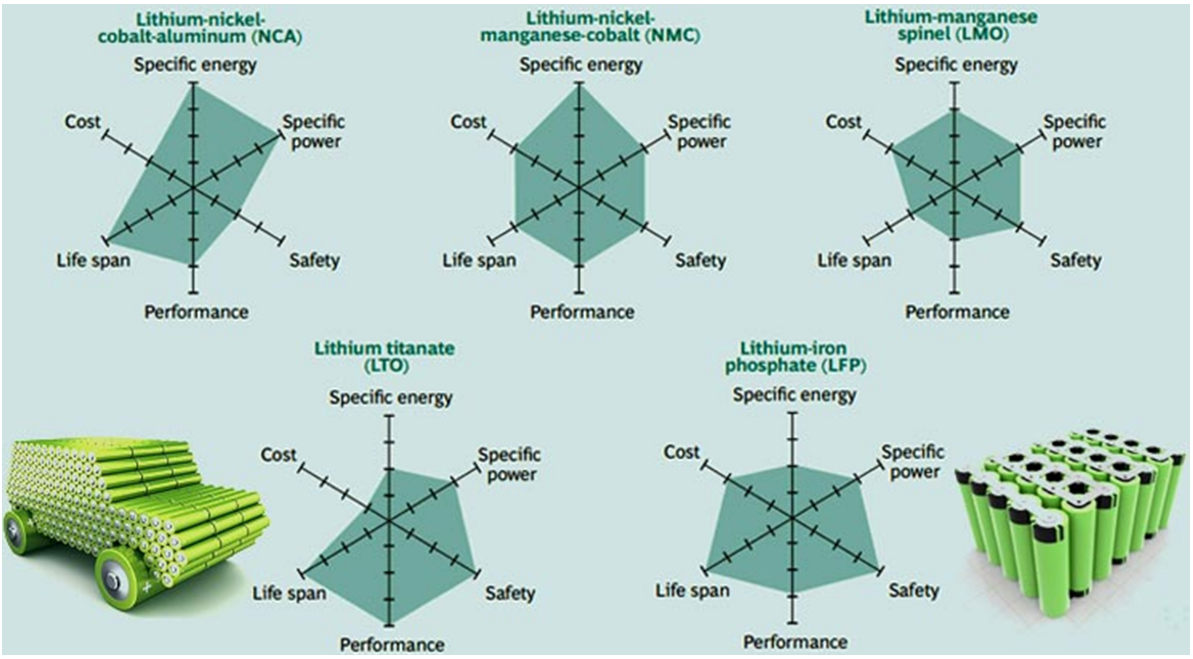
3. ความปลอดภัย (safety) หมายถึง ความสามารถในการระบายความร้อน ถ้าแบตเตอรี่สามารถระบายความร้อนได้ดีจะมีความปลอดภัยสูงกว่า

4. สมรรถนะ (performance) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแบตเตอรี่ขณะใช้งาน อัตราส่วนของพลังงานที่จ่ายโหลดต่อพลังงานที่ชาร์จแบตเตอรี่ ที่สถานะ SOC ก่อนชาร์จแบตเตอรี่ เท่ากับ SOC หลังจ่ายโหลดให้กับแบตเตอรี่

5. อายุในการใช้งาน (life Span) หมายถึง จำนวนครั้งในการประจุไฟ

6. ต้นทุน (cost) หมายถึง ต้นทุนในการผลิตแบตเตอรี่ต่อ 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง

จากภาพ 5 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีการผลิตในปัจจุบันโดยเปรียบเทียบคุณสมบัติทั้ง 6 ด้าน พบว่าแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเป็นแหล่งจ่ายไฟที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ข้อดีคือ อายุการใช้งานยาวนาน ความจุพลังงานสูง ประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนยังประกอบด้วยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีระดับความปลอดภัยสูง (Muslimin et.al, 2021)



ภาพ 5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบต่าง ๆ

Note. From *A detailed comparison of popular Li-ion battery chemistries used in electric vehicles* by Circuit Digest, 2023, retrieved from https://circuitdigest.com/article/a-detailed-comparision-of-popular-li-ion-battery-chemistries-used-in-evs

การผลิตและการประยุกต์ใช้รถยนต์ไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ขนาดใหญ่ แบตเตอรี่เป็นประเด็นสำคัญประการหนึ่ง การผลิตและการใช้งานแบตเตอรี่เหล่านี้ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะวัสดุโลหะมีค่าที่ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และระบบนิเวศโดยรอบ จากการประเมินแบตเตอรี่ $LiFePO_4$ และแบตเตอรี่ Li (NiCoMn) O_2 ซึ่งนิยมใช้กับรถยนต์โดยสารไฟฟ้า จากการวิจัยพบว่า ทั้งสองประเภทของแบตเตอรี่แสดงลักษณะผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละระยะ ตัวอย่างเช่น $LiFePO_4$ แบตเตอรี่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นในขั้นตอนการผลิต ในขณะที่แบตเตอรี่ Li (NiCoMn) O_2 เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นในขั้นตอนการใช้งานและการขนส่ง อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ $LiFePO_4$ โดยทั่วไปจะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าแบตเตอรี่ Li (NiCoMn) O_2 จากวงจรชีวิตทั้งหมด นอกจากนี้ผลการวิจัยพบว่า $LiFePO_4$ มีมวลมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นจึงทำให้กักเก็บพลังงานได้มากขึ้น (Shu et.al, 2021)

จากข้อมูลของแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่กล่าวมาสามารถทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติตามประเภทแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงตามตาราง 1

รูปแบบการบริหารจัดการแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วในยานยนต์ไฟฟ้า

เมื่อแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าที่ถูกนำไปใช้งานกระทั่งประสิทธิภาพลดลงจนไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีกจะมีรูปแบบของการบริหารจัดการโดยส่วนใหญ่แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. การ Reuse แบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วในยานยนต์ไฟฟ้า

กรณีของการนำกลับมาใช้ใหม่ในส่วนของแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งาน (ค่าเฉลี่ยปัจจุบันประมาณ 9 ปี) แต่เมื่อนำมาตรวจสอบแล้วพบว่า ยังคงเหลือความจุแบตเตอรี่ประมาณร้อยละ 80 ของความจุทั้งหมด หากสามารถซ่อมแซมได้ เช่น เซลล์แบตเตอรี่ชำรุดบางส่วนแล้วนำมาซ่อมจนมีความจุสูงกว่าร้อยละ 80 แบตเตอรี่นั้นจะถูกนำกลับไปใช้ในรูปแบบที่เรียกว่าการรีแพ็ก (Repack) ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ได้อีกประมาณ 4 ปีครึ่ง แต่ในกรณีที่ไม่สามารถซ่อมแซมจนมีความจุสูงกว่าร้อยละ 80 ได้ จะถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์สำรองพลังงานแบบตั้งอยู่กับที่ (stationary energy storage) เพื่อใช้ในกรณีฉุกเฉิน หรือช่วยเสริมไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามากเกินไปได้ โดยสามารถใช้งานต่อได้อีก 4-5 ปี กรณีเช่นนี้เรียกการจัดการแบตเตอรี่แบบนำกลับมาใช้ซ้ำ (reuse) ข้อดีประการหนึ่งของการ Repack และ Reuse คือเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว ส่งผลให้แบตเตอรี่มีมูลค่าโดยรวมมากขึ้นและเป็นการลดสัดส่วนมูลค่าขณะใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าลงทำให้ผู้บริโภคไม่ต้องแบกรับภาระจากราคาแบตเตอรี่มากจนเกินไป นอกจากนั้นการ Reuse แบตเตอรี่เพื่อใช้งานใน Stationary Energy Storage แทนการใช้งานแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ถูกผลิตขึ้นมาใหม่ สามารถลดพลังงานที่ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ใหม่ และลดการเกิดสภาวะอุณหภูมิโลกเปลี่ยนแปลง (climate change) ได้ร้อยละ 69 และ 68 ตามลำดับ (Richa et al., 2017)

กรณีที่แบตเตอรี่ไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากเกิดอุบัติเหตุ ทำให้แบตเตอรี่เสียหายไม่สามารถใช้งานได้อีกจะถูกนำไปแยกส่วนเพื่อรีไซเคิล (Recycle) โดยวัตถุดิบที่ได้จากการ Recycle จะถูกนำไปผลิตเป็นแบตเตอรี่ใหม่ และส่วนที่ไม่สามารถ Recycle ได้ จะถูกนำไปฝังกลบตามกรรมวิธีกำจัดของเสียต่อไป

จากตาราง 2 แสดงการทดสอบทั่วไปเพื่อนำแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ประกอบไปด้วยการทดสอบ 3 ส่วน ได้แก่ การทดสอบทางกายภาพ ทางไฟฟ้าและทางกล ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่

2. กระบวนการ Recycle แบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วในยานยนต์ไฟฟ้า

วัตถุประสงค์เพื่อนำวัตถุดิบที่ยังมีคุณสมบัติพอที่จะสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแบตเตอรี่ใหม่ได้ ลดการเกิดของเสียให้มากที่สุด ลดการทิ้งของเสียมีพิษ และนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้พลังงานจากสิ่งแวดล้อมให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยวิธี Recycle แบตเตอรี่ มีลำดับขั้นตอนดังแสดงในภาพ 6

จากภาพ 6 การ Recycle แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า มีแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการปรับสภาพ การแยกส่วนประกอบ และการแยกสกัด โดยทางทฤษฎีแล้วจะสามารถนำวัสดุกลับมาใช้ได้ครบถ้วนแต่ในทางปฏิบัติหากนำส่วนประกอบทั้งหมดกลับมาใช้ใหม่จะต้องใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายสูง เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนกระบวนการ Recycle (เช่น ค่าแรง วัสดุ สาธารณูปโภค และค่าใช้จ่ายทั่วไป) hydrometallurgy เป็นกระบวนการที่ถูกที่สุด Hydrometallurgical แพงที่สุด ต้นทุนการ Recycle สำหรับกระบวนการทั้งหมดต่ำที่สุดในประเทศจีน เนื่องจากต้นทุนแรงงานและค่าใช้จ่ายทั่วไปลดลง กระบวนการ Recycle มีส่วนช่วย 75-90% ของต้นทุนการ Recycle โดยรวม (Dai et al., 2019)

ตาราง 1

การเปรียบเทียบประเภทแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้า

Specification	Lead Acid	Nickel Based	Lithium Based
Cost	Cheap	Expensive	Average
Maintainance Required	High	Low	Moderate
Estimated Life Time (Years)	Short	Longer	Long
Application	Solar Power Storage	Aircraft Applications, Emergency Lightening	Space Vehicles, Cell Phones, Laptops
Depth of Discharge (Approx)	20% for 500 Cycles	20% for 2500 cycles	20% for 300 Cycles
Charging Technique	Constant Current-Constant Voltage	Constant Current	Constant Current-Constant Voltage
Climate	Severe Effect	Moderate Effect	Great Sustainability

Note: From *Comparison of batteries used in electrical vehicles (a review)* by S. Muslimin, Z. Nawawi, B. Y. Suprapto and T. Dewi, 2022, Proceedings of the 5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021), pp 421–425.

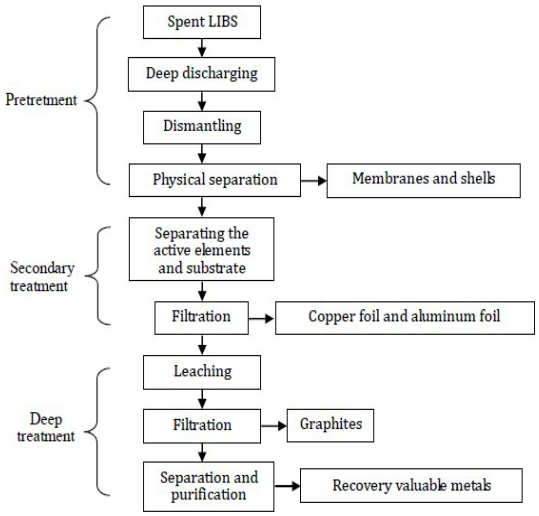
ตาราง 2

การทดสอบทั่วไปเพื่อนำแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่

หมวดหมู่การตรวจสอบ/ทดสอบ	ประเภทของการตรวจสอบ/การทดสอบ	อิทธิพลต่อความปลอดภัย	ผลกระทบต่อความเสี่ยง*
1.ทางกายภาพ	1.การบวมของโมดูลหรือเซลล์	1.ปานกลาง	1.ปานกลาง/ต่ำ
	2.การกัดกร่อนของขั้วต่อ	2.ปานกลาง/ต่ำ	2.ต่ำ
	3.ความสกปรกจากน้ำและฝุ่น	3.สูง	3.ปานกลาง
	4.สายเคเบิลและการเชื่อมต่อหลวม	4.ปานกลาง	4.ปานกลาง/ต่ำ
	5.วันที่ผลิตแสดงความสามารถใช้งานได้	5.ต่ำ	5.ไม่เกี่ยวข้อง/ต่ำ
2.ทางไฟฟ้าและทางกล	1.ความต้านทานภายใน	1.ต่ำ	1.สูง/ปานกลาง
	2.ความจุที่วัดได้	2.ต่ำ	2.สูง
	3.ความต้านทานของฉนวน	3.สูง	3.ปานกลาง
	4.ความสมดุลของศักย์ไฟฟ้า	4.ปานกลาง	4.ปานกลาง/ต่ำ
	5.ช่วงสถานะการชาร์จ (SOC) ตามคู่มือ	5.สูง	5.สูง
3.ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่หรือ Battery Management System (BMS)	1.กำลังการผลิตที่มีประโยชน์ที่เหลืออยู่	1.ต่ำ	1.สูง
	2.ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (DC)	2.ต่ำ	2.สูง/ปานกลาง
	3.สถานะสุขภาพ (SOH) ของแบตเตอรี่	3.ต่ำ	3.สูง

*ปัจจัยการประเมินสำหรับการใช้แบตเตอรี่ซ้ำ (สูงไปต่ำ=ผลกระทบต่อการใช้แบตเตอรี่ซ้ำ)

Note. Adapted from. *End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle* by Y. Kotak. et al., 2021, Energies, 14, pp 1–15



ภาพ 6 ขั้นตอนหลักสำหรับการ Recycle แบตเตอรี่ที่ใช้แล้วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

Note. From Study on recycling and reuse of waste battery of electric vehicle by Y. Du and H. Jiang, 2018, *Proceedings of the 2018 8th International Conference on Mechatronics, Computer and Education Informationization (MCEI 2018)*, pp. 296-299 Copyright by the Authors. Published by Atlantis Press

จากตาราง 3 แสดงการวิเคราะห์ส่วนประกอบของชุดแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าองค์ประกอบโดยน้ำหนักมีวัสดุทางวิศวกรรม เช่น ทองแดง เหล็ก อลูมิเนียม พลาสติกและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

จากตาราง 4 แสดงค่าเฉลี่ยสำหรับเซลล์แบตเตอรี่ พบว่า ค่าการสะสมพลังงานของแบตเตอรี่ชนิด NCA สามารถเก็บสะสมพลังงานได้ดีและมีน้ำหนักเบา

จากตาราง 5 แสดงองค์ประกอบของเซลล์แบตเตอรี่แต่ละชนิดซึ่งวัตถุดิบที่สำคัญได้แก่ลิเธียม โดยในแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน มีราคาเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ 10,000 ดอลลาร์สำหรับปลั๊กอินไฮบริดมีลิเธียมมูลค่าไม่ถึง 100 ดอลลาร์ การขาดแคลนในการผลิตแบตเตอรี่ขนาดใหญ่หลายล้านก้อนสำหรับยานยนต์และการใช้งานแบบอยู่กับที่อาจทำให้ราคาสูงขึ้น ความกังวลเกี่ยวกับการขาดลิเธียม อาจมีการขาดแคลนวัสดุหายากหากยานยนต์ไฟฟ้าเข้ามาแทนที่รถยนต์ทั่วไป วัสดุชนิดหนึ่ง คือ แม่เหล็กถาวรสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรเป็นหนึ่งในมอเตอร์ที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด ประเทศจีนควบคุมตลาดโลหะหายากทั่วโลกประมาณร้อยละ 95 และคาดว่า จะใช้ทรัพยากรเหล่านี้ส่วนใหญ่เพื่อการผลิตของตนเอง การส่งออกวัสดุหายากได้รับการควบคุมอย่างเข้มงวด (Battery University, 2017)

จากภาพ 7 แสดงขั้นตอนการ Recycle แบตเตอรี่ไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนได้แก่

1) การเตรียมพร้อมก่อน Recycle (pre-processing) เป็นกระบวนการเริ่มต้นเพื่อความปลอดภัยสำหรับกระบวนการขั้นตอนอื่น การจัดการแบตเตอร์รี่ลิเทียมไอออน โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ ได้แก่ วิธีการแรกการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลงอย่างรวดเร็ว (cryogenic approach) ด้วยการแช่แบตเตอรี่ลงในอ่างไนโตรเจนเหลว โดยแบตเตอรี่จะถูกลดอุณหภูมิลงจนเหลืออุณหภูมิที่ -195 องศาเซลเซียส ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของแบตเตอรี่ลดลงเหลือเพียง 1/250,000 จึงอยู่ในสภาวะที่ไม่พร้อมจะทำปฏิกิริยา จากนั้นจึงจะเข้าสู่ขั้นตอนการบดแบตเตอรี่ให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ได้โดยไม่มีอันตราย วิธีการที่ 2 การคายประจุแบตเตอรี่ให้หมด (dismantling to cell level) โดยเริ่มจากการแยกส่วนแบตเตอรี่จนถึงระดับโมดูลหรือเซลล์แบตเตอรี่ จากนั้นคายประจุแบตเตอรี่โดยแช่โมดูลหรือเซลล์แบตเตอรี่ในสารละลายที่นำไฟฟ้า เช่น โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคาร์บอเนต กรดกำมะถัน กรดเกลือหรือกรดไนตริกจนกระทั่งโมดูลหรือเซลล์แบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้าจนหมด ก่อนที่จะผ่านกระบวนการ Recycle ในขั้นตอนต่อไป

2) ขั้นตอนการทำให้ชิ้นส่วนแบตเตอรี่แตกตัว (cell disruption) เพื่อให้ชิ้นส่วนของแบตเตอรี่แตกตัวออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ทำให้เห็นชิ้นส่วนภายในของแบตเตอรี่ด้วยวิธีการ บด อัด ฉีก หรือ วิธีทางกลอื่น ๆ ที่สามารถทำให้แบตเตอรี่เสียหายทางกายภาพได้ สำหรับกระบวนการ Cell disruption ของแบตเตอรี่รถยนต์ที่มีขนาดใหญ่ มีขั้นตอนที่ยุ่งยากและมีอันตรายกว่ามาก ดังนั้น กระบวนการนี้จะถูกกระทำในของเหลวที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับชิ้นส่วนต่าง ๆ และในบรรยากาศที่ถูกบรรจุด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซอาร์กอน หรือ ก๊าซฮีเลียม เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยา

3) ขั้นตอนการแยกวัตถุดิบออกจากขั้วแอโนด-แคโทด (dissolution)

ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดถูกทำให้ติดกับแผ่นโลหะ Collector โดยใช้วัสดุผสมกับสารเชื่อมผสานทาลงไปที่แผ่นโลหะ แล้วปล่อยให้สารเชื่อมผสานระเหย จนวัตถุดิบที่ใช้ในการทำขั้วติดกับแผ่นโลหะ ดังนั้น หากต้องการทำให้วัตถุดิบของขั้วแบตเตอรี่แยกออกมาจากแผ่นโลหะ สามารถทำได้โดยการแช่ขั้วอิเล็กโตดลงในสารละลาย N-Methy-2-Pyrrolidone--NMP ซึ่งสามารถทำให้วัตถุดิบและแผ่นโลหะแยกออกจากกันได้ แต่มีข้อเสียได้แก่ใช้เวลานานและ NMP เป็นสารมีพิษ

4) ขั้นตอนการแยกคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (physical separation) เมื่อชิ้นส่วนแบตเตอรี่ผ่านกระบวนการ Cell disruption แล้ว จะถูกคัดแยกด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ เพื่อนำวัตถุดิบกลับไปใช้งานต่อไป โดยกระบวนการคัดแยกโดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ในขั้นตอนนี้จะประกอบไปด้วยวิธีการเฉพาะด้านหลากหลายกระบวนการดังตาราง 6

ตาราง 3

วัสดุและส่วนประกอบของชุดแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

Materials/ components	Mass (kg)	Relative (%)
Battery cells	80.0	32.0
Steel (stainless steel, ...)	75.0	30.0
Plastics (PP, PA...)	26.0	10.4
Aluminum	21.0	8.4
Copper	7.0	2.8
Electronic components (BMS, fuses, ...)	2.3	0.92
Elastomers	3.6	1.44
Composite materials	35.1	14.04
Summed	250	100

Note. From *European Li-Ion battery advance manufacturing for electronic vehicles* by ELIBAMA project, 2011, retrieved from https://cordis.europa.eu/project/id/285385

ตาราง 4

แสดงค่าเฉลี่ยสำหรับเซลล์แบตเตอรี่แต่ละประเภท

Cell type	unit	NMC	NCA	LFP
Total mass	kg/Battery	141	100	118
Total mass	g/kg	1000	1000	1000
Energy content	kWh/t	86	96	71

Note. From *European Li-Ion battery advance manufacturing for electronic vehicles* by ELIBAMA project, 2011, retrieved from https://cordis.europa.eu/project/id/285385

ตาราง 5

แสดงองค์ประกอบของเซลล์แบตเตอรี่แต่ละประเภท

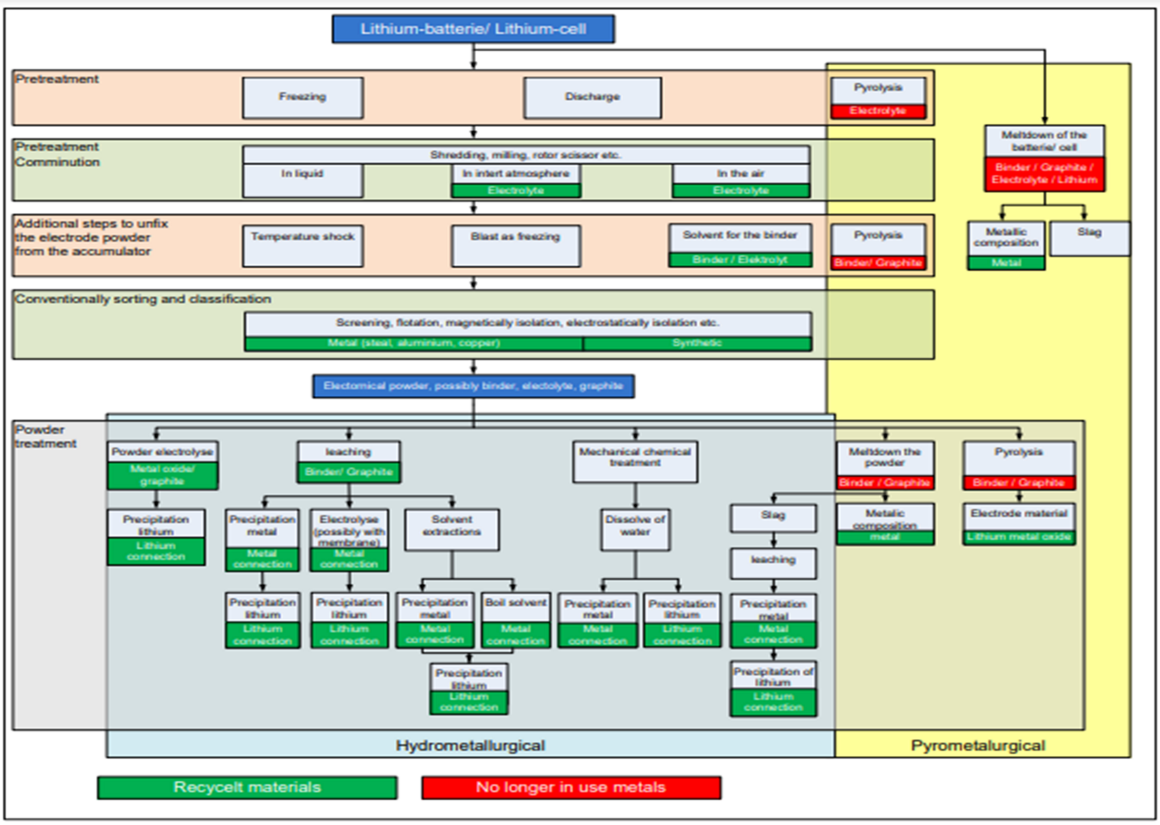
Cell Material	NMC (g/kg)	NCA (g/kg)	LFP (g/kg)
Cathode	191	175	173
-Lithium	14	13	7.6
-Cobalt	39	16	0
-Nickel	39	86	0
-Manganese	36	0	0
-Aluminum	0	2.5	0
-Iron	0	0	61
-Phosphorus	0	0	34
-Oxygen	63	58	70
Electrolyte	114	101	85
Separator	54	50	43
Anode-Carbon	140	131	111
Cathode foil - Al	39	40	34
Anode foil - Cu	66	70	60
Cell case - Al	21	20	17
Others	6	10	8.5
total	630	598	530

Note. From *European Li-Ion battery advance manufacturing for electronic vehicles* by ELIBAMA project, 2011, retrieved from https://cordis.europa.eu/project/id/285385

ตาราง 6

กระบวนการคัดแยกโดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

กรรมวิธี	หลักการ
Sieve Classification	การคัดแยกโดยอาศัยความแตกต่างของขนาดวัสดุและเป็นการแบ่งชิ้นเศษชิ้นส่วนโดยปริมาตร และเตรียมพร้อมสำหรับกระบวนการต่อไป
Airstream Classification	การคัดแยกชิ้นส่วนโดยอาศัยความแตกต่างด้านน้ำหนัก โดยชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะลอยขึ้นไปด้านบน และชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักมากจะตกลงมาอยู่ด้านล่าง
Magnetic separation	การคัดแยกชิ้นส่วนโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็ก คัดแยกชิ้นส่วนที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กได้
Electrostatic processes and separation by frictional charge	การคัดแยกโดยอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าสถิตของวัสดุ
Eddy current Process	การคัดแยกโดยใช้แม่เหล็กที่ใช้กระแสเอ็ดดี้เพื่อแยกโลหะที่ไม่ใช่เหล็กออกจากของเสียอินพุตหรือกระแสแร่ กระแสเอ็ดดี้ถูกใช้เพื่อแยกวัสดุทั้งสองออกจากกัน
Flotation Process	ใช้ของเหลวเพื่อช่วยคัดแยกชิ้นส่วนตามความหนาแน่น และน้ำหนัก



ภาพ 7 แสดงภาพรวมกระบวนการ Recycle แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

Note. From *European Li-Ion battery advance manufacturing for electronic vehicles* by ELIBAMA project, 2011, retrieved from https://cordis.europa.eu/project/id/285385

5) ขั้นตอนการแยกวัสดุอื่น ๆ ออกจากแบตเตอรี่ด้วยวิธีทางความร้อน (thermal treatment)

เป็นกระบวนการที่อาศัยความร้อนในการแยกวัสดุชนิดต่าง ๆ ออกจากเศษแบตเตอรี่ สามารถแบ่งอุณหภูมิที่ใช้ได้เป็น 2 ช่วง คือ

1. ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 380 องศาเซลเซียส จะสามารถทำให้วัตถุดิบที่ใช้ในการทำขั้วแอโนด และแคโทดแยกตัวออกจากแผ่นโลหะ Collector เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอน และสามารถทำให้สารระเหยที่เป็นพิษสลายตัวได้

2. ช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 380 องศาเซลเซียส สามารถเผาไหม้ พลาสติก และสารระเหยได้ สามารถเกิดกรรมวิธี Pyrolysis ได้ ถ้ามีการควบคุมบรรยากาศในการเผา

6) โลหะวิทยาแยกสกัด (extractive metallurgy) หลังจากผ่านกระบวนการข้างต้นแล้ว จะได้โลหะผสม (alloys) เป็นผลผลิตของกระบวนการดังกล่าว ซึ่งโลหะผสมนั้นสามารถนำมาแยกออกจากกันให้มีความบริสุทธิ์หรือแยกเป็นโลหะแต่ละชนิดได้ แต่อย่างไรก็ตามการแยกโลหะจากวัสดุอื่น ๆ นั้นสามารถทำได้โดยง่าย ซึ่งแตกต่างจากการแยกโลหะออกจากกันซึ่งทำได้ยากกว่า การแยกโลหะนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีการเปียก และวิธีการแห้ง ดังตาราง 7

จากภาพ 8 แสดงการเปรียบเทียบขั้นตอนการ recycle แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าจากบริษัทที่ดำเนินกิจการ recycle จำนวน 5 รายได้แก่ Akkuser (Finland) Duesenfeld (Germany) Recupyl (France) Retriev (USA) และ Umicore (Belgium) สามารถอธิบายกระบวนการต่าง ๆ โดยสรุปได้ดังนี้ (Harpe et.al., 2019)

1. กรรมวิธีกู้คืนแบบไพโรเมทัลโลจิคอล (Pyrometallurgical)

การใช้เตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงเพื่อลดส่วนประกอบออกไซด์ของโลหะให้เป็นโลหะผสมของ Co Cu Fe และ Ni เทคนิคนี้มีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ สามารถใช้ได้กับทั้งเซลล์หรือโมดูล โดยไม่ต้องมีขั้นตอนการสร้างฟิล์มก่อนผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรเมทัลโลจิคัล ได้แก่ เศษโลหะผสมตะกรันและก๊าซ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า<150 °C ประกอบด้วยสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากส่วนประกอบอิเล็กโทรไลต์และสารยึดเกาะ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นโพลีเมอร์จะสลายตัวและเผาไหม้ออกไป โลหะผสมสามารถแยกออกได้ผ่านกระบวนการไฮโดรเมทัลโลจิคัล โดยทั่วไปตะกรันจะประกอบด้วยโลหะอะลูมิเนียม แมงกานีส และลิเธียม การเผาไหม้ของอิเล็กโทรไลต์และพลาสติกยังช่วยคายความร้อนและลดการใช้พลังงานสำหรับกระบวนการนี้ กระบวนการไพโรเมทัลโลจิคัล โดยทั่วไปจะไม่พิจารณาถึงการแยกอิเล็กโทรไลต์และพลาสติก (ประมาณ 40–50 % ของน้ำหนักแบตเตอรี่) หรือส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น เกลือลิเธียม แม้จะมีข้อเสียเปรียบด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การผลิตก๊าซพิษ ซึ่งจะต้องมีการบำบัดเพื่อแก้ไขผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม กระบวนการนี้มีต้นทุนพลังงานที่สูง วัสดุที่ถูกสามารถกู้คืนได้ในจำนวนจำกัด แต่กระบวนการนี้ยังคงเป็นกระบวนการที่ใช้บ่อยสำหรับการสกัดโลหะทรานซิชันที่มีมูลค่าสูง เช่น โคบอลต์และนิกเกิล

2. การแยกวัสดุทางกายภาพ (physical materials separation)

กระบวนการแยกทางกายภาพ กระบวนการเหล่านี้ประกอบด้วยตะแกรง ตัวกรอง แม่เหล็ก โต๊ะเขย่า และตัวกลางหนัก ซึ่งใช้ในการแยกส่วนผสมของสารละลายที่มีลิเธียม พลาสติกและกระดาษความหนาแน่นต่ำ ปลอกแม่เหล็ก อิเล็กโทรดเคลือบ และผงอิเล็กโทรด โดยทั่วไปผลลัพธ์ที่ได้คือเศษส่วนละเอียดของวัสดุ พลาสติก วัสดุเคส และฟอยล์โลหะในเศษส่วนหยาบ เศษส่วนหยาบสามารถผ่านกระบวนการแยกด้วยแม่เหล็กเพื่อกำจัดวัสดุแม่เหล็ก เช่น โครงเหล็ก และกระบวนการแยกความหนาแน่น เพื่อแยกพลาสติกออกจากฟอยล์ สารเคลือบอิเล็กโทรด (ออกไซด์ของโลหะและคาร์บอน)

3. การถมโลหะด้วยไฮโดรเมทัลโลจิคัล (Hydrometallurgical metals reclamation)

การใช้สารละลายในน้ำเพื่อชะโลหะที่ต้องการออกจากวัสดุแคโทด สารละลายที่ถูกชะออกไปได้รับการบำบัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เมื่อทำการสกัดตัวทำละลายแล้ว โลหะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ผ่านปฏิกิริยาการตกตะกอน ซึ่งควบคุมโดยการปรับค่า pH ของสารละลาย โดยปกติโคบอลต์จะถูกสกัดออกมาในรูปแบบซัลเฟต ออกซาเลต ไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตจากนั้นลิเธียมสามารถสกัดได้ผ่านปฏิกิริยาการตกตะกอนซึ่งก่อตัวเป็น Li_2CO_3 หรือ Li3PO480, 81 วิธีการ Recycle ทางเลือกอีกวิธีหนึ่งจะใช้กลไกทางเคมีโดยที่วัสดุอิเล็กโทรดบดผสมด้วยสารประกอบคลอรีนหรือสารก่อให้เกิดสารเชิงซ้อนเพื่อผลิตเกลือโคบอลต์ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งสามารถแยกออกจากเศษส่วนที่ไม่ละลายน้ำได้โดยการล้างด้วยน้ำ

4. การรีไซเคิลโดยตรง (direct recycling)

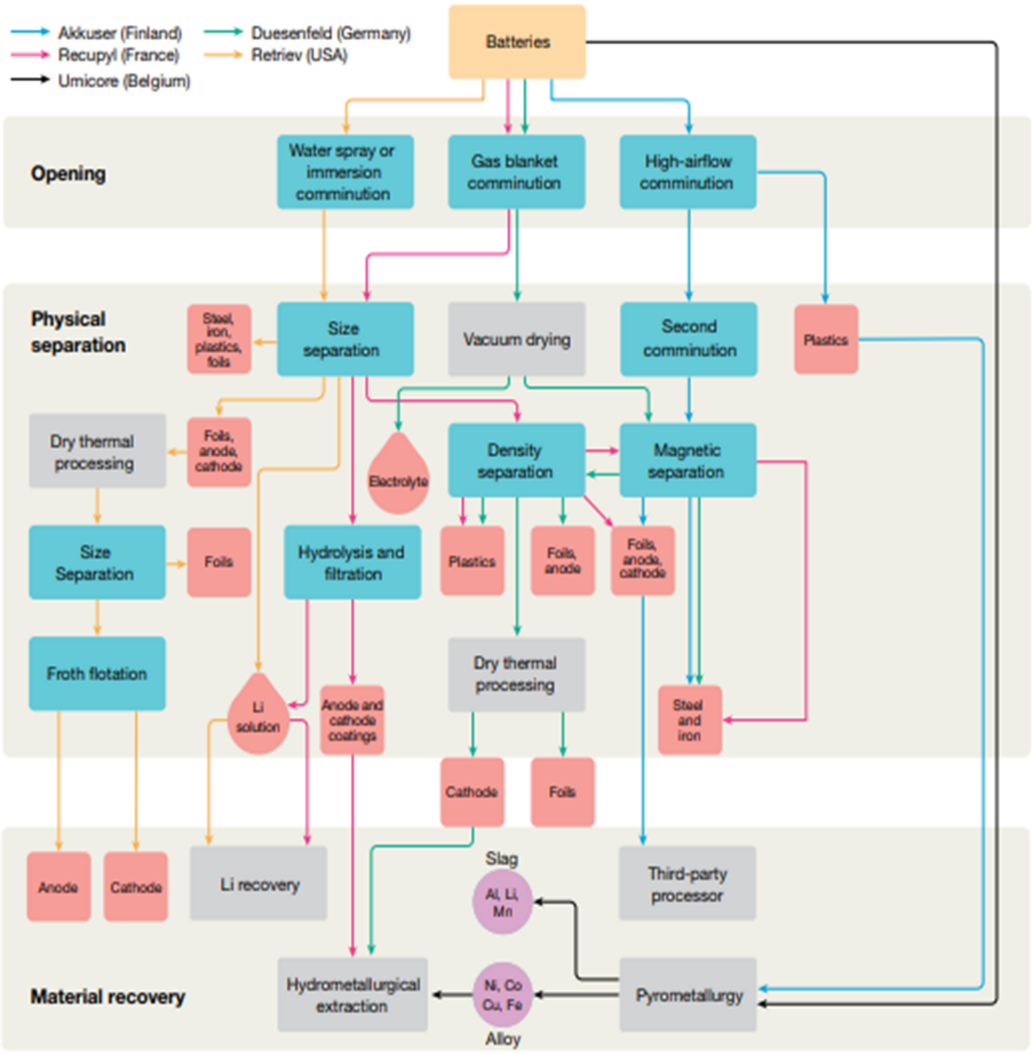
การแยกวัสดุแคโทดหรือแอโนดออกจากอิเล็กโทรดเพื่อปรับสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ในแบตเตอรี่ลิเธียมที่นำกลับมาผลิตใหม่เรียกว่าการรีไซเคิลโดยตรง ตามหลักการวัสดุแคโทดโลหะออกไซด์ผสมสามารถรวมกลับเข้าไปในอิเล็กโทรดแคโทดใหม่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของผลึกของวัสดุออกฤทธิ์เพียงเล็กน้อย โดยทั่วไป จะต้องเติมปริมาณลิเธียมเพื่อชดเชยการสูญเสียเนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุระหว่างการใช้แบตเตอรี่ และเนื่องจากวัสดุอาจไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่จากแบตเตอรี่ในสถานะคายประจุจนหมดโดยที่แคโทดถูกลิไทด์จนหมด แถบแคโทดที่ได้หลังจากการรื้อแบตเตอรี่ที่ใช้แล้ว ถูกแช่ใน NMP ก่อนที่จะทำการโซนิเคชัน ผงถูกสร้างขึ้นใหม่ผ่านการสังเคราะห์โซลิดสเตตอย่างง่ายด้วยการเติม Li2CO_3 ให้ความร้อนด้วยสารละลายที่มี LiOH/Li_2SO_4 ก่อนการหลอม

จากภาพ 9 แสดงผลการจากการวิจัยของสำนักงานสำรวจทางธรณีวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา (USGS) พบว่าประเทศชิลีและออสเตรเลียมีปริมาณของลิเธียมสำรองและการผลิตมากที่สุด โดยปริมาณลิเธียมที่ขุดได้เกือบ 20 ล้านตันถูกคาดการณ์ว่าจะใช้ในทุกภาคอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี 2010 ถึง 2100 โดยมีส่วนแบ่งไปใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนในยานยนต์ไฟฟ้า 12.8 ล้านตัน

ตาราง 7

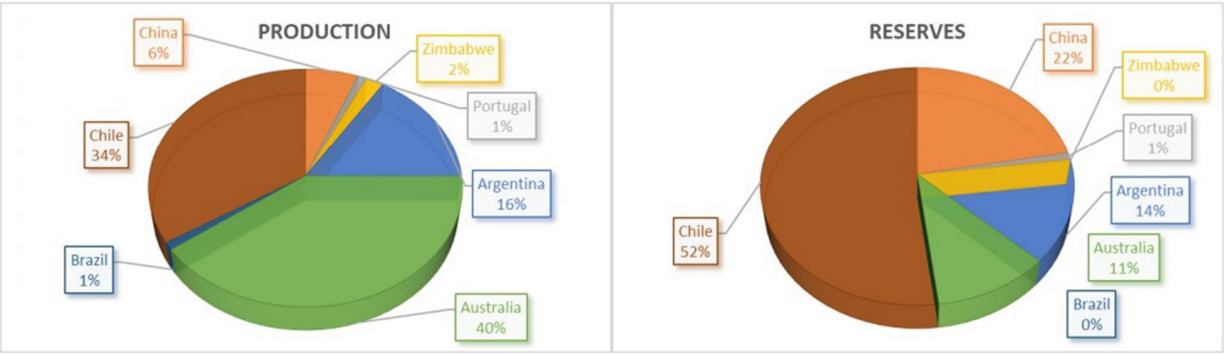
กระบวนการโลหะวิทยาแยกสกัด

วิธีการแยกสกัด	หลักการ
วิธีเปียก (wet processes หรือ hydrometallurgy)	ใช้สารละลาย ละลายวัตถุดิบที่ต้องการออกมาหลังจากนั้น นำวัตถุดิบออกจากการละลาย ด้วยวิธีการ Electrolysis Cementation Pressure precipitation หรือ Crystallisation
วิธีแห้ง (dry Processes หรือ pyrometallurgy)	ใช้ความร้อนเพื่อทำให้เกิด การเปลี่ยนรูปของโลหะเพื่อกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและเฟสของโลหะ และการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมี สามารถทำให้แบตเตอรี่หลอมละลาย ได้ชิ้นส่วนโลหะ สแลก และก๊าซ เป็นผลผลิต แต่ไม่สามารถแยกโลหะแต่ละชนิดออกจากโลหะอัลลอยได้



ภาพ 8 แสดงการเปรียบเทียบขั้นตอนการ recycle แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าจากบริษัทที่ดำเนินกิจการ recycle

Note. From *Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles*, by G. Harpe. et. al., 2019, Nature, 575(7), pp. 75–86 Copyright 2019 by Springer Nature Limited



ภาพ 9 ประเทศผู้ทำการผลิตและแหล่งสะสมลิเธียมทั่วโลก

Note. From *Vehicle Battery Recycling* by S. S. Alam, 2021, retrieved from https://www.researchgate.net/publication/355477797

3. การวิเคราะห์วงจรชีวิต (Life-Cycle Analysis–LCA)

การวิเคราะห์วงจรชีวิตของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นการเปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพกับยานยนต์เผาไหม้ภายใน เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากก๊าซไอเสียนักวิทยาศาสตร์ในสาขาสิ่งแวดล้อมจึงเริ่มเปรียบเทียบประสิทธิภาพยานยนต์เผาไหม้ภายในโดยใช้ LCA เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์แบ่งเป็น (1) ขั้นตอนการสกัดวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (2) ขั้นตอนการผลิตจะคำนวณผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างผลิตภัณฑ์ (3) ขั้นตอนการคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ในขณะใช้งาน สุดท้าย (4) ขั้นตอนการกู้คืนและการ Recycle เมื่อพิจารณาตามขั้นตอนข้างต้นจะสามารถเปรียบเทียบระยะการใช้งานและระยะหมดอายุการใช้งานระหว่างยานยนต์ไฟฟ้าและยานยนต์เผาไหม้ภายในที่แตกต่างกันได้

แนวทางการบริหารจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในต่างประเทศ

ภูมิหลังในการจัดการแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วในยานยนต์ไฟฟ้า

ใน ปี 2558 สหภาพยุโรปสามารถกู้คืนวัสดุที่เป็นประโยชน์จากยานยนต์หมดอายุถึง 95% โดยน้ำหนักตามคำสั่ง Union End-of-Life เพียง 5% โดยน้ำหนักเท่านั้นที่จะถูกฝังกลบ อย่างไรก็ตาม การบริหารจัดการยังคงเป็นปัญหาเนื่องจากการเก็บรวบรวมจากประเทศอื่น ๆ ในเครือสหภาพยุโรป

ในประเทศจีนยังได้วางนโยบายยานยนต์หมดอายุไว้ตั้งแต่ปี 2544 แต่ยังคงเผชิญกับอุปสรรคในการดำเนินการเช่นเดียวกับประเทศในยุโรป

สำหรับประเทศญี่ปุ่นเป็นผู้บุกเบิกในการจัดตั้งนโยบายเกี่ยวกับยานยนต์หมดอายุการ Recycle และพัฒนากฎหมายและกฎระเบียบเพื่อเอาชนะความท้าทายทางเทคนิค กฎหมาย Recycle เจ้าของรถจะต้องชำระเงินบางส่วน ณ เวลาที่ซื้อรถยนต์ เพื่อแบ่งค่าใช้จ่ายระหว่างเจ้าของและธุรกิจ Recycle

เกาหลีใต้ใช้กฎหมายที่เรียกว่า RoHS/ELV/WEEE Act ปี 2007 ซึ่งกล่าวถึงการประกอบและยานพาหนะ Recycle ขณะเดียวกันในสหรัฐอเมริกาด้านสิ่งแวดล้อมกฎหมายคุ้มครองเป็นแนวทางในการ Recycle ยานยนต์หมดอายุบางมลรัฐแต่ยังไม่มีในส่วนของรัฐบาลกลาง โดยกฎหมายให้เป็นความรับผิดชอบของผู้ผลิตเพิ่มเติม (Alam, 2021)

1. การบริหารจัดการกับแบตเตอรี่ใช้แล้วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในทวีปยุโรป

สหภาพยุโรปมีการตั้งข้อกำหนดสำหรับการบริหารจัดการยานพาหนะที่หมดอายุการใช้งานแล้วหรือ End-of-life vehicles--ELV directive ถูกกำหนดขึ้นเพื่อบริหารจัดการ ELV โดยรวมไม่มีข้อกำหนด หรือวิธีการปฏิบัติเฉพาะสำหรับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของ ELV หรือ แบตเตอรี่ที่ใช้ได้มาจาก ELV ข้อกำหนดส่วนใหญ่เป็นข้อกำหนดเชิงปริมาณของกระบวนการเก็บ และกระบวนการ Reuse และ Recycle แต่ไม่มีการกำหนดขั้นตอน และปริมาณของแบตเตอรี่ในแต่ละกระบวนการที่แน่นอน ซึ่งในปัจจุบัน

ผู้ผลิตรถยนต์ในยุโรปได้มีการให้บริการติดตั้ง Energy Storage System สำหรับที่อยู่อาศัยเป็นการเตรียมตัวเพื่อรองรับแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานจากยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต โดยผู้ผลิตรถยนต์ที่เริ่มโครงการดังกล่าวใน ปัจจุบันได้แก่ Nissan และ Daimler ต่อมามีการตั้งข้อกำหนดในการเรียกคืนแบตเตอรี่ของสหภาพยุโรปส่งผลให้ผู้ผลิตรถยนต์ใช้โอกาสนี้ขยายธุรกิจโดยการจำหน่าย Stationary Battery เพิ่มเติม เนื่องจากมีแบตเตอรี่ที่เรียกคืนมาจากการใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าและในอนาคตถ้าหากมีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าอย่างแพร่หลายมากขึ้นจำนวนแบตเตอรี่ที่จะถูกเรียกคืนกลับมาสู่มือของผู้ผลิตมากขึ้นด้วยเช่นกัน

2. การบริหารจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา

แนวทางในการบริหารจัดการแบตเตอรี่ของประเทศสหรัฐอเมริกานั้น มีหน่วยงาน Environmental Protection Agency--EPA เป็นองค์กรที่มีหน้าที่รับผิดชอบทางด้านสิ่งแวดล้อมกำหนดให้แบตเตอรี่ที่ต้องถูกจัดการตามกฎ Universal Waste Rules ข้อกำหนดใน Universal Waste Rules จะถูกนำไปใช้ใน 4 กลุ่ม ได้แก่ ผู้รวบรวม Universal Waste ขนาดเล็ก ผู้รวบรวม Universal Waste ขนาดใหญ่ ผู้ขนส่ง Universal Wastes และผู้กำจัด Universal Waste ซึ่งแบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด และแบตเตอรี่ประเภทนิกเกิลแคดเมียมถูกกำหนดให้ผ่านการ Recycle ทุกครั้ง แต่อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไม่ได้อยู่ภายใต้กฎดังกล่าว และไม่ถูกเก็บรวบรวมโดยผู้ผลิตเพื่อจะนำไป Recycle ซึ่งในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีปริมาณมากจะถูกส่งนำไปกำจัดโดยวิธีเผาในที่สำหรับกำจัดของเสียอันตราย นอกจากนั้นรัฐแต่ละรัฐเองก็มีข้อกำหนดในการบริหารจัดการแบตเตอรี่ต่างกัน

3. การบริหารจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศญี่ปุ่น

ในประเทศญี่ปุ่นมีข้อกฎหมายเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ “Law for the Promotion of Efficient Utilization of Resource” ได้ผ่านการเห็นชอบจากรัฐสภาประเทศญี่ปุ่นมีผลบังคับใช้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้มั่นใจว่าทรัพยากรถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพ และสนับสนุนการใช้งานวัตถุดิบจากการ Recycle และ Reuse เพื่อลดการสร้างขยะอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งรวมไปถึงแบตเตอรี่ทุกชนิด และเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโดยกำหนดให้ทุกองค์การที่มีส่วนร่วมเกี่ยวกับขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยผู้บริโภคมีหน้าที่นำแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้วไปส่งมอบให้แก่ผู้รวบรวมซึ่งก็ คือ ผู้จำหน่ายแบตเตอรี่ โดยจะมีหน้าที่ รวบรวมส่งไปให้ผู้ผลิตแบตเตอรี่ซึ่งมีหน้าที่ในการ Recycle เป็นจุดสุดท้าย ในส่วนของยานยนต์ในประเทศญี่ปุ่นได้มีกฎหมายที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ End-of-Life Vehicle recycling law” โดยกฎหมายข้อนี้กำหนดบทบาทร่วมกันของเจ้าของรถยนต์ ธุรกิจรวบรวมยานยนต์ไฟฟ้า ผู้ผลิตรถยนต์ และผู้นำเข้ารถยนต์ เพื่อการ Recycle ขึ้นซึ่งแต่ละภาคส่วนมีส่วนรับผิดชอบดังต่อไปนี้

1. เจ้าของรถยนต์ (car owners) ทำหน้าที่ชำระค่าธรรมเนียม Recycle และส่งยานยนต์ไฟฟ้าไปสู่ผู้ประกอบ ธุรกิจรวบรวมยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งขึ้นทะเบียนกับผู้รับผิดชอบในพื้นที่นั้น ๆ

2. ผู้ประกอบธุรกิจรวบรวม ELV (ELV collecting businesses) ทำหน้าที่เก็บยานยนต์ไฟฟ้าจากเจ้าของรถยนต์ จากนั้นนำยานยนต์ไฟฟ้าไปส่งมอบต่อให้แก่ ผู้ประกอบธุรกิจรวบรวมสาร CFC และผู้ประกอบธุรกิจแยกส่วนรถยนต์

3. ผู้ประกอบธุรกิจรวบรวมสาร CFC (CFC collecting businesses) ทำหน้าที่แยกสาร CFC ออกจากยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานการ Recycle จากนั้นนำสาร CFC ส่งกลับไปให้แก่ ผู้ผลิตหรือนำเข้ารถยนต์ และส่งยานยนต์ไฟฟ้าต่อไปให้แก่ ผู้ประกอบธุรกิจแยกส่วนรถยนต์

4. ผู้ประกอบธุรกิจแยกส่วนรถยนต์ (auto dismantling businesses) ทำหน้าที่แยกส่วนยานยนต์ไฟฟ้าโดยกระทำตามมาตรฐานการ Recycle จากนั้น ส่งถุงลมนิรภัยกลับไปให้แก่ ผู้ผลิตหรือผู้นำเข้ารถยนต์ และส่งยานยนต์ไฟฟ้าต่อไปให้แก่ผู้ประกอบธุรกิจย่อยชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า

5. ผู้ประกอบธุรกิจย่อยชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า (shredding Businesses) ทำหน้าที่ย่อยยานยนต์ไฟฟ้าที่ได้รับมาให้เป็นเศษผงเพื่อนำไป Recycle ต่อจากนั้นส่งเศษผงของยานยนต์ไฟฟ้าให้แก่ ผู้ผลิตหรือนำเข้ารถยนต์

6. ผู้ผลิตหรือนำเข้ารถยนต์ (car manufacturers or importers) ทำหน้าที่รวบรวม และ Recycle สาร CFC ถุงลมนิรภัย และเศษผงจากการกำจัดของเสียจากการ recycle ยานยนต์ไฟฟ้า

4. แนวทางการบริหารจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศจีน

ประเทศจีนได้กำหนดนโยบายเกี่ยวกับการ Recycle แบตเตอรี่ “Policy on pollution prevention technique from waste batteries” โดยกำหนดให้อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ต้องรับผิดชอบในการรวบรวมแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว และต้องติดฉลากบนแบตเตอรี่ ในปี ค.ศ.2018 รัฐบาลจีนประกาศข้อกำหนดในการบริหารจัดการแบตเตอรี่ของรถยนต์ New Energy Vehicle ในประเทศ โดยในข้อกำหนดดังกล่าว มีมาตรการต่าง ๆ ดังนี้

1. ผู้ผลิตรถยนต์มีความรับผิดชอบในการบริหารจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้ว

2. ผู้ผลิตรถยนต์ต้องสร้างช่องทางในการ Recycle และช่องทางในการรวบรวม จัดเก็บ และขนส่งแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว

3. ผู้ผลิตรถยนต์ต้องสร้างศูนย์บริการเพื่อบำรุงรักษา ซ่อม และแลกเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้วโดยสะดวก

4. สนับสนุนให้มีการปฏิบัติที่ดีแก่ลูกค้าในการเรียกคืนแบตเตอรี่เพื่อ Recycle เช่น การให้เงินสนับสนุนหรือการรับซื้อคืนแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว

5. สนับสนุนให้ผู้ผลิตแบตเตอรี่มีการใช้มาตรฐานในการผลิต และออกแบบแบตเตอรี่ให้แยกส่วนได้ง่าย เพื่อช่วยในการ Recycle ด้วยระบบอัตโนมัติ

6. ผู้ผลิตแบตเตอรี่ต้องมีการจัดฝึกอบรมทางเทคนิคแก่ผู้ผลิตรถยนต์ในเรื่องการจัดเก็บ และการแยกส่วนแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว

5. แนวทางการบริหารจัดการแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

ในประเทศไทยการบริหารจัดการแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วจากรถยนต์ทั่วไปโดยจัดเป็นของเสียอันตราย สำหรับแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้ายังอยู่ในขั้นตอนของการร่างพระราชบัญญัติกองทุนส่งเสริมศักยภาพอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและการบริหารจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้ว สาระสำคัญของพระราชบัญญัติกำหนดให้จัดตั้งกองทุนขึ้นมาโดยมีฐานะเป็นนิติบุคคล วัตถุประสงค์ คือ

1. สนับสนุนและส่งเสริมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า

2. สนับสนุนและส่งเสริมการกำจัดและ Recycle แบตเตอรี่ที่ถูกวิธีและมีประสิทธิภาพ

3. พัฒนาและเพิ่มขีดความสามารถในการกำจัดและ Recycle แบตเตอรี่ที่ถูกวิธีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

4. สนับสนุนการลงทุนหรือช่วยเหลือผู้ประกอบการในระบบกำจัดหรือ Recycle แบตเตอรี่

5. สร้างความตระหนักถึงการกำจัดและ Recycle แบตเตอรี่อย่างมีระบบและถูกวิธี

6. ดำเนินการอื่นใดเกี่ยวกับการบริหารกองทุนเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์

ทั้งนี้ธุรกิจ Recycle แบตเตอรี่ในประเทศไทยมีข้อจำกัดอยู่ 4 ข้อ ดังนี้

1. กำไรจากการประกอบธุรกิจ Recycle แบตเตอรี่ต่ำ มีงานวิจัยบางงานให้ข้อสังเกตว่าการ Recycle แบตเตอรี่นั้นยังไม่เกิดกำไร แต่ธุรกิจเกิดขึ้นและอยู่ได้เนื่องจากนโยบายสนับสนุน และนโยบายการบริหารจัดการแบตเตอรี่ของรัฐบาลในแต่ละประเทศ

2. ยังไม่มีผู้ผลิตเซลล์แบตเตอรี่ ผลิตภัณฑ์บางชนิดที่ได้จากการ Recycle ต้องส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศที่มีโรงงานผลิตเซลล์แบตเตอรี่

3. ช่องว่างทางเทคโนโลยี การจะทำให้ประสิทธิภาพในการ Recycle สูงนั้น อาศัยเทคโนโลยีและองค์ความรู้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดของประเทศไทยในปัจจุบันที่ใช้กระบวนการหลอมโลหะ

4. กระบวนการ Recycle อาศัยพลังงาน และสารเคมีจำนวนมาก หากไม่มีการบริหารจัดการที่ดีอาจมีปัญหาด้านการบริหารจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันผู้ผลิตรถยนต์ในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้วิธีการส่งออกแบตเตอรี่ใช้แล้วไป Recycle ยังต่างประเทศ ซึ่งการนำเข้าหรือส่งออกของเสียไม่สามารถกระทำได้ในทันที เนื่องแบตเตอรี่ใช้แล้วเป็นวัตถุอันตรายดังนั้นการนำเข้าหรือส่งออกของเสียต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 และ/หรืออนุสัญญาบาเซล

บทสรุป

การเพิ่มขึ้นของหน่วยแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าและกำลังการผลิตในปีต่อ ๆ ไปจะก่อให้เกิดความท้าทายด้านสิ่งแวดล้อมที่จะต้องได้รับการจัดการทั้งการ Reuse และการ Recycle การระบุว่าแบตเตอรี่จะอยู่ในสถานะที่ใช้ซ้ำได้หรือ Recycle ได้ แบ่งเป็น (1) การระบุสถานภาพของ

แบตเตอรี่ในยานพาหนะที่ใช้เป็นประจำว่าใช้ได้หรือชำรุด และ (2) แบตเตอรี่มีสถานะผ่านการทดสอบมาแล้ว เช่น การตรวจสอบสภาพภายนอก การทดสอบระบบไฟฟ้า การทดสอบระบบกลไก ฯลฯ หากยานยนต์ไฟฟ้าเกิดอุบัติเหตุ และแบตเตอรี่รั่วอาจไม่ปลอดภัยในการนำกลับมาใช้ใหม่ การ Recycle อย่างปลอดภัยการขนย้ายแบตเตอรี่ดังกล่าวหากเป็นไปได้ ไม่เพียงแต่ถอดแบตเตอรี่ออกจากยานยนต์ไฟฟ้าเท่านั้น ส่วนประกอบต่าง ๆ ควรถูกรื้อในพื้นที่เฉพาะและใช้ยานพาหนะที่มีคุณลักษณะสำหรับการขนส่งแบตเตอรี่โดยเฉพาะตามข้อตกลงเกี่ยวกับกฎการขนส่งสินค้าอันตรายทางถนนระหว่างประเทศ (ADR) รวมถึงแบตเตอรี่ที่ถอดแยกชิ้นส่วนแล้วสามารถนำไป Recycle ได้ที่โรงงาน Recycle เท่านั้น ในทางกลับกัน หากแบตเตอรี่มาจากยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้งานปกติ ให้ทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อให้แน่ใจว่าแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานเหลืออยู่บ้างและยังทำงานได้ดีมีความปลอดภัย (Wöhrl, Geisbauer, Nebl, Lott & Schweiger, 2021)

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนถือเป็นขยะอันตราย หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม ไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดมลพิษ สร้างปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ส่งผลต่อสุขภาพของคนและสัตว์ แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนประกอบด้วยโลหะมีค่าจำนวนมาก (Co Ni Li Mn Al Cu Fe ฯลฯ) การนำโลหะมีค่าเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่เป็นการสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจที่ดีและตระหนักถึงการพัฒนาทรัพยากรที่ยั่งยืน (Du & Jiang, 2018)

ประเด็นที่ต้องศึกษาเพิ่มเติม ในปัจจุบันวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ใช้แล้วในยานยนต์ไฟฟ้าทั้งในระดับชาติและระดับโลก ประเทศกำลังพัฒนาบางประเทศมีโอกาสน้อยกว่าในการจัดการ Recycle การเลือกเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจึงยังไม่มีการวิจัยระบบจัดเก็บและจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเป็นแนวคิดที่กำลังเติบโตควรวิเคราะห์ในหลาย ๆ ด้านเพื่อ ผลประโยชน์ทั้งทางด้านเศรษฐกิจและด้านสิ่งแวดล้อม (Akram and Abdul-Kader, 2023)

นโยบายของบริษัท Recycle ทุกแห่งต้องมีความเข้มแข็งมีการนำไปใช้ในภูมิภาคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มเติมปรับปรุงและทำให้กระบวนการ Recycle เป็นแบบอัตโนมัติและมีต้นทุนต่ำมีความยืดหยุ่นสามารถนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยเฉพาะลิเธียมปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมเพียงไม่กี่แห่งที่เกี่ยวข้องกับการกู้คืนลิเธียม การ Recycle ช่วยการจัดการกับมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมลดการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติ (Alam, 2021)

สำหรับประเทศไทยมีนักลงทุนสนใจในธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพิ่มมากขึ้น ผู้ผลิตยานยนต์สันดาปภายในหลายค่ายเริ่มมีการปรับปรุงฐานการผลิตและการผลิตแบตเตอรี่เป็นการลงทุนด้านหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับนักลงทุน การส่งเสริมการลงทุนนั้นมีแผนการดำเนินการบริหารจัดการแบตเตอรี่เพื่อจัดการบริหารแบตเตอรี่ใช้แล้วที่จะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ผู้ผลิตเหล่านี้อาจจะยังไม่มีแผนการดำเนินการบริหารจัดการแบตเตอรี่ของตนเอง ดังนั้นนอกจากการบริหารจัดการแบตเตอรี่จากผู้ผลิตรถไฟฟ้าตลาดเฉพาะก็เป็นเรื่องสำคัญเช่นกัน อาจนำไปใช้งานได้ 2 ประเภท คือ เป็นแบตเตอรี่ มือสองสำหรับใช้งานในรถไฟฟ้า ใช้งานเป็น Energy Storage โดยความแตกต่างของการใช้งาน 2 ประเภทขึ้นอยู่กับสุขภาพของแบตเตอรี่ใช้แล้ว โดยเซลล์แบตเตอรี่ที่มีสุขภาพดียังสามารถใช้งานในรถไฟฟ้าได้ จะถูกประกอบเป็นแพ็คแบตเตอรี่ เซลล์แบตเตอรี่ที่มีสุขภาพรองลงมาจะถูกนำไปประกอบเป็น Energy Storage เพื่อใช้ในงานเป็นระบบกักเก็บพลังงานในระบบพลังงานหมุนเวียน เช่น ระบบแบตเตอรี่สำรองของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบพลังงานลม เป็นต้น สำหรับแบตเตอรี่ที่มีสุขภาพที่ไม่สามารถใช้งานได้แล้วจะถูกนำไป Recycle เพื่อนำวัตถุดิบมาใช้ผลิตเป็นเซลล์แบตเตอรี่ใหม่ โดยการ Recycle นั้นอาจจะยังไม่เหมาะกับประเทศไทย เนื่องจากเป็นธุรกิจที่อาจจะยังเกิดกำไรไม่สูงมากนัก และยังไม่มีการจัดตั้งอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แบตเตอรี่ และสำหรับประเทศไทยตลาดการใช้ยานยนต์ไฟฟ้ากำลังเติบโต ร่างพระราชบัญญัติกองทุนส่งเสริมศักยภาพอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและการบริหารจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วยังอยู่ในขั้นตอนการพิจารณาซึ่งภายใน 5–10 ปีหลังจากนี้นโยบายด้านการบริหารจัดการแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าใช้แล้วจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

References

Ai, N., & Borucki, K. (2018). *End-of-life electric vehicle batteries: U.S. projections and management strategies. EM: Air and waste management association's magazine for Environmental Managers.* Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/327023044_End-of-Life_Electric_Vehicle_Batteries_US_Projections_and_Management_Strategies

Akram, M. N., & Abdul-Kader, W. (2023). Sustainable development goals and end-of-life electric vehicle battery: Literature review. *Batteries, 9*(7), 353. https://doi.org/10.3390/batteries9070353

Alam, S. S. (2021). *Vehicle Battery Recycling*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/355477797.

Battery University. (2017). *Availability of Lithium*. Retrieved from http://batteryuniversity.com/learn/article/availability_of_lithium

Batteries Refurbishing & Reuse. (2014). *The European Commission under the "Nanosciences, nanotechnologies, materials & new production technologies" (NMP) Themeof the 7th Framework Programme for research and technological development*. Retrieved from https://ec.europa.eu/research/participants/portal4/doc/call/fp7/common/32042-11._2012_wp_cooperation_annexes_1-5_v.2_en.pdf

Chaiwannakup, T., Rungchaeng, K., & Suriyawanakul, P. (2023). Influencing factor analysis for development orientations of electric vehicle using FAHP and TOPSIS. *The 28 th National Convention on Civil Engineering* (pp. 1-8). Phuket: NCCE (in Thai)

Circuit Digest. (2023). *A detailed comparison of popular Li-ion Battery chemistries used in electric vehicles*. Retrieved from https://circuitdigest.com/article/a-detailed-comparision-of-popular-li-ion-battery-chemistries-used-in-evs

Dai, Q., Spangenberger, J., Ahmed, S., Gaines, L., Kelly, J. C., Wang, M., & Argonne National Laboratory. (2019). *Ever Batt: A closed-loop battery recycling cost and environmental impacts model*. Retrieved from https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/07/153050.pdf

Du, Y., & Jiang, H. (2018). Study on recycling and reuse of waste battery of electric vehicle. *Proceeding of Advances in Computer Science Research (ACSR), volume 83 8th International Conference on Mechatronics, Computer and Education Informationization (MCEI 2018)* (pp 296–299). China: Atlantis Press. doi: 10.2991/mcei-18.2018.59

ELIBAMA Project. (2011). *European Li-Ion battery advance manufacturing for electronic vehicles*. Retrieved from https://cordis.europa.eu/project/id/285385

Enerdata. (2022). *Oil products domestic consumption*. Retrieved from https://yearbook.enerdata.net/oil-products/world-oil-domestic-consumption-statistics.html

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature, 575*(7781), 75–86. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5

Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology, 17*(1), 53–64. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x

International Energy Agency. (2023). *Explore and download the full data behind the Global EV Outlook*. Retrieved from https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer

Kotak, Y., Fernández, C. M., Casals, L. C., Kotak, B. S., Koch, D., Geisbauer, C., Trilla, L., Gómez-Núñez, A., & Schweiger, H. (2021). End of electric vehicle batteries: Reuse vs. recycle. *Energies, 14*(8), 1–15. https://doi.org/10.3390/en14082217

Muller, P., Duboc, R., & Malefant, E. (2021). Recycling electric vehicle batteries: Ecological transformation and preserving resources. *Field Actions Science Reports, 23*, 73–81. https://journals.openedition.org/factsreports/6690

Muslimin, S., Nawawi, Z., Suprapto, B. Y., & Dewi, T. (2022). Comparison of batteries used in electrical vehicles (a review). *Proceedings of the 5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)* (pp. 421–425). Netherlands: Atlantis Press International B.V.

Policy Research Department, The National Science and Technology Development Agency. (2017). *Electric vehicle industry* (Research report). Bangkok: Policy Research Department, The National Science and Technology Development Agency (in Thai).

Rhodium Group LLC. (2020). *Preliminary 2020 global greenhouse gas emissions estimates*. Retrieved from https://rhg.com/research/preliminary-2020-global-greenhouse-gas-emissions-estimates/

Shu, X., Guo, Y., Yang, W., Wei, K., & Zhu, G. (2021). Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars. *Energy Reports, 7*, 2302-2315. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.038

Thailand Automotive Institute. (2018). *Used Battery Management Business Study Report* (Research report). Bangkok: Thailand Automotive Institute (in Thai).

Wöhrl, K., Geisbauer, C., Nebl, C., Lott, S., & Schweiger, H.-G. (2021). Crashed electric vehicle handling and recommendations—state of the art in Germany. *Energies, 14*, 1040. https://doi.org/10.3390/en14041040

Zhao, G., Wang, X., & Negnevitsky, M. (2022). Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management. *iScience, 25*(2), 103744. https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744