

1. ชื่อเทคโนโลยี (Technology Title) :								
เทคโนโลยีการรีไซเคิลแบตเตอรี่รถยนต์ไฮบริดจ์								
2. ประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม (Industrial Sector) :								
	อุตสาหกรรมแร่		อุตสาหกรรมโลหการ	X	อุตสาหกรรมรีไซเคิล			
3. ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Levels) :								
ระดับต่ำ								ระดับสูง
TRL1	TRL2	TRL3	TRL4	TRL5	TRL6	TRL7	TRL8	TRL9
Basic principle observed and reported	Technology concept and/or application formulated	Concepts demonstrated analytically or experimentally	Key elements demonstrated in laboratory environment	Key elements demonstrated in simulated environment	Representative of the deliverable demonstrated in relevant environments	Final development version of the deliverable demonstrated in operational environment	Actual deliverable qualified through test and demonstration	Operational use of deliverable technology หรือผลิตภัณฑ์ถูกนำไปใช้งานจริงโดยลูกค้า
องค์ความรู้และทฤษฎีพื้นฐาน			ต้นแบบห้องปฏิบัติการ		ต้นแบบภาคสนาม		ต้นแบบภาคสนามที่ผ่านมาตรฐาน	
4. รายละเอียดโดยสังเขป (Details Description) :								
แนวคิด :	<p>แบตเตอรี่ที่ใช้ในการเก็บพลังงานสำหรับขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่สามารถนำกลับมาประจุไฟใหม่ได้ (Secondary battery or rechargeable battery) และส่วนใหญ่เป็นแบตเตอรี่ที่มีลิเทียม (Lithium, Li) เป็นองค์ประกอบหรือที่เรียกว่า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion battery) ทั้งนี้ จากความต้องการใช้ลิเทียมในการผลิตเป็นแบตเตอรี่ที่เพิ่มสูงมากขึ้น อาจทำให้ปริมาณการผลิตลิเทียมต่อปีไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน ดังนั้นการนำเอาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วนำกลับมารีไซเคิลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง และเป็นแหล่งแร่ลิเทียมที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งนอกเหนือจากที่พบในธรรมชาติ อีกทั้งยังมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในระดับที่สูงกว่าแหล่งแร่ที่พบในธรรมชาติอีกด้วย โดยเฉพาะโลหะประเภทอื่นที่มีราคาแพง เช่น นิกเกิล และโคบอลต์ ที่มีในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน</p> <p>จากรายงานของ IMP Process Metallurgy and Metal Recycling, RWTH Aachen, Germany มีการคาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2015 จะมีการผลิตแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle, EV) เป็นจำนวนกว่า 1.3 ล้านยูนิต และมากกว่า 80% ของแบตเตอรี่เหล่านี้เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งในปี ค.ศ. 2022 แบตเตอรี่เหล่านี้กว่าครึ่งล้านยูนิตจะหมดอายุการใช้งานทำให้มูลค่าทางการตลาดของการรีไซเคิลแบตเตอรี่เหล่านี้กลับมาใช้ผลิตเป็นแบตเตอรี่ใหม่มีมูลค่าสูงถึง 2,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ โดยในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานสำหรับรถยนต์ไฟฟ้านี้มีองค์ประกอบของธาตุที่มีมูลค่าและมีราคาสูงอยู่ด้วย เช่น ลิเทียม โคบอลต์ นิกเกิล แมงกานีส ทองแดง อะลูมิเนียม เป็นต้น</p> <p>และจากข้อมูลพบว่าการนำเอาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วมารีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นแบตเตอรี่ใหม่ยังมีปริมาณค่อนข้างน้อยเพียงแค่ 3% (208 ตัน) ของปริมาณลิเทียมที่ทำการผลิตทั้งหมดต่อปีในปี ค.ศ. 2011 ซึ่งทางสหภาพยุโรป และ</p>							

ประเทศในภูมิภาคอื่นๆ ทั่วโลกได้มีการออกกฎระเบียบและกำหนดให้มีการเพิ่มปริมาณการรีไซเคิลแบตเตอรี่เพื่อมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ให้เพิ่มมากขึ้น (L.T. Peiro และคณะ, 2013) อีกทั้งการเพิ่มสูงขึ้นของจำนวนของแบตเตอรี่ใช้งานแล้วที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจากการประมาณการ ซึ่งขยะแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วเหล่านี้ยังอาจส่งผลกระทบต่อการบินของโลหะในแหล่งดินและแหล่งน้ำซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการสกัดนำเอาโลหะเหล่านี้ที่มีอยู่ในขยะแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วและมีปริมาณมากกลับมาใช้งานใหม่เป็นวัตถุดิบในการผลิตจึงมีคุณประโยชน์และก่อให้เกิดความคุ้มค่าอย่างยิ่งในทางเศรษฐศาสตร์

ลักษณะและองค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น :

แบตเตอรี่ที่สามารถนำมาประจุไฟใช้งานใหม่ได้ส่วนใหญ่จะมีการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium ion, Li-ion) และลิเทียมโพลีเมอร์ (Lithium polymer, Li-poly) ซึ่งใช้สำหรับเป็นแบตเตอรี่ในคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ กล้อง และรถยนต์ไฟฟ้า โดยจะใช้กราฟไฟต์ (Graphite) เป็นแอโนด และใช้สารประกอบเกลือของลิเทียมซึ่งละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ และจะใช้ลิเทียมเมทัลออกไซด์ (Lithium metal oxide, LiMeO₂) เป็นแคโทด

โดยลิเทียมแคโทดที่ใช้ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนส่วนใหญ่เป็นลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium cobalt oxide, LiCoO₂) 75%, ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium manganese oxide, LiMn₂O₄) 8%, ลิเทียมเฟอโรฟอสเฟส (Lithium ferrophosphate, LiFePO₄) 2% และใช้ลิเทียมเฮกซะฟลูออโรฟอสเฟต (Lithium hexafluorophosphate, LiPF₆), ลิเทียมเปอร์คลอเรต (Lithiumperchlorate, LiClO₄) และลิเทียมเตตระฟลูออโรโบรเอท (Lithium tetrafluoroborate, LiBF₄) เป็นอิเล็กโทรไลต์ ส่วนใน แบตเตอรี่ลิเทียมโพลีเมอร์ จะใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นโพลีเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide, PEG) และโพลีอะครีโลไนไตรล์ (Polyacrylonitrile, PAN) แทนสารประกอบเกลือของลิเทียม

ปริมาณของธาตุต่างๆ ที่มีในองค์ประกอบทางเคมีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีการใช้งานในปัจจุบันแสดงในตาราง

ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆ ที่มีในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
(Veloso et al., 2005; Silva and Afonso, 2008)

Element	Composition (%)
Al	4.6-24
Co	12-20
Cu	5-10
Fe	4.7-25
Li	1.5-5.5
Mn	10-15
Ni	12-15

ลักษณะและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ :

องค์ประกอบทางเคมีของผลผลิตที่ได้จากการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้กระบวนการทางโลหวิทยาความร้อน (T. Georgi-Maschler และคณะ, 2012)

การทดลองรีไซเคิลเพื่อทำการสกัดเอาโลหะโคบอลต์ออกมาจากแคโทดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยกระบวนการสกัดด้วยความร้อน (Pyrometallurgical process) นั้นทำให้ได้โลหะผสมของโคบอลต์ (Cobalt alloy) ตะกรัน และก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตาราง

Element (In mass%)	Co	Ca	Cu	Fe	Li	Mn	Ni	Si	C
Metal	55.3	-	1.1	22.9	-	1.4	2.1	15.7	-
Slag	1.1	38.3	-	1.3	1.4	-	-	15.6	7.3
Flue dust	19.4	22.3	0.7	-	20.1	-	-	-	13.2

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมของโคบอลต์ที่ได้จากการรีไซเคิลดังแสดงในตารางข้างบน จะเห็นว่าเป็นส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตซูเปอร์อัลลอยที่มีโคบอลต์เป็นธาตุผสมหลัก (Cobalt-base superalloys) สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใบพัดเทอร์โบ แสดงให้เห็นว่าด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้สามารถที่จะทำการผลิตวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นซูเปอร์อัลลอยที่มีโคบอลต์เป็นธาตุผสมหลัก (Cobalt-base superalloys) ที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมจากการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้

องค์ประกอบทางเคมีของผลผลิตโลหะที่ได้จากการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้กระบวนการทางโลหวิทยาสารละลาย

องค์ประกอบทางเคมีของผงทองแดงที่เกิดจากการตกตะกอน (Cemented Cu-powder)

Element	Al	Co	Cu	Fe	Li	Mn	Ni
Composition (%)	0.017	0.05	90	0.013	0.17	0.1	0.03

องค์ประกอบทางเคมีของผงโคบอลต์ นิกเกิล และแมงกานีสที่เกิดจากการตกตะกอนของแข็ง (Co, Ni and Mn Precipitates)

Element	Co	Ni	Mn	Fe	Li	Al	Cu
Composition (%)	5.47	21.1	26.1	<0.05	0.5	0.16	<0.05

องค์ประกอบทางเคมีของลิเทียมคาร์บอเนต (Li₂CO₃) ที่เกิดจากการตกตะกอนของแข็ง (Precipitated Li₂CO₃ powder)

Element	Li ₂ CO ₃	Al	Co	Cu	Ni	Mn	Na
Composition (%)	95.1	0.02	1.36	<0.01	0.04	<0.01	3.39

ชนิดของเทคโนโลยี :

กระบวนการที่ใช้ในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วในปัจจุบันประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักๆ คือ กระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้ความร้อน (Pyrometallurgical process) และกระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้สารละลาย (Hydrometallurgical process) ซึ่งจะเห็นได้จากตารางแสดงภาพรวมเกี่ยวกับการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วในประเทศต่างๆ รวมถึงกระบวนการที่ใช้ในการรีไซเคิล และผลผลิตที่ได้จากการรีไซเคิล

ตารางสรุปข้อมูลการรีไซเคิลลิเทียมแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้ว (L.T. Peiro และคณะ, 2013)

Company	Type of batteries	Recycling process	End products
Toxco Inc. (Canada)	Primary	Cryogenic	Li ₂ CO ₃ , Co, Al
	Secondary	Cryogenic	
Batreco (Switzerland)	Primary	Pyrometallurgical	Fe-Mn, Zn, Hg
	Secondary	Pyrometallurgical	
		Hydrometallurgical	
Recupyl SAS (Singapore; France; Spain and UK)	Primary	Hydrometallurgical	Metal oxide and Lithium salt
	Secondary	Hydrometallurgical	
Umicore (Belgium)	Secondary	Pyrometallurgical	Co and Ni-oxides
SNAM (France)	Secondary	Pyrometallurgical	Co and Ni-oxides

กระบวนการสกัดด้วยการใช้สารละลาย (Hydrometallurgy) โดยทั่วไปแล้วจะยุ่งยากซับซ้อน และมีขั้นตอนมากกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการสกัดด้วยการใช้ความร้อน (Pyrometallurgy) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่า มีความยืดหยุ่นกว่า ยิ่งไปกว่านั้นคือประหยัดพลังงานมากกว่า และสามารถที่จะเลือกแยกสกัดชนิดของโลหะได้ดีกว่า ดังนั้นวิธีการนี้จึงมีการนำไปใช้ในการรีไซเคิลสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วมากกว่า ซึ่งจะมีความแตกต่างกันทั้งประเภทของแบตเตอรี่และองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในแบตเตอรี่ นอกจากนี้สารที่ใช้ในการชะละลายยังสามารถนำกลับมาบำบัดและใช้งานได้ใหม่อีก อีกทั้งกระบวนการยังปล่อยแก๊สออกมาในระดับที่ต่ำ ซึ่งถ้าหากมองในมุมมองของการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้วกระบวนการ Hydrometallurgy น่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการใช้รีไซเคิลขยะแบตเตอรี่เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

5. การรวบรวมองค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน (Literature Review)

ขั้นตอนการรีไซเคิลแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วจะมีขั้นตอนหลักๆ อยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมการขยะแบตเตอรี่ (Waste preparation) และขั้นตอนการสกัดเอาโลหะออกจากแบตเตอรี่ด้วยกรรมวิธีทางโลหะวิทยา (Metallurgical processing)

ในขั้นแรก ขั้นตอนของการเตรียมการขยะนั้น จะเริ่มจากการคัดกรองขยะซึ่งจะทำการแยกตามชนิดขององค์ประกอบทางเคมี ซึ่งอาจจะมีหลายขั้นเพื่อทำให้เกิดการคัดแยกที่มีประสิทธิภาพ อาจทำการคัดแยกด้วยแรงงานคนหรือใช้อุปกรณ์เครื่องมือช่วยในการแยก อย่างเช่น การแยกด้วยเครื่องมือกล (Mechanical separation), การแยกด้วยแม่เหล็ก (Magnetic separation), การแยกด้วยการใช้รังสีเอกซ์ในการจำแนก (X-ray images), การใช้เซนเซอร์ (Optical sensors) เพื่ออ่านบาร์โค้ดบนชิ้นส่วนขยะเหล่านั้น (Bernardes et al., 2004)

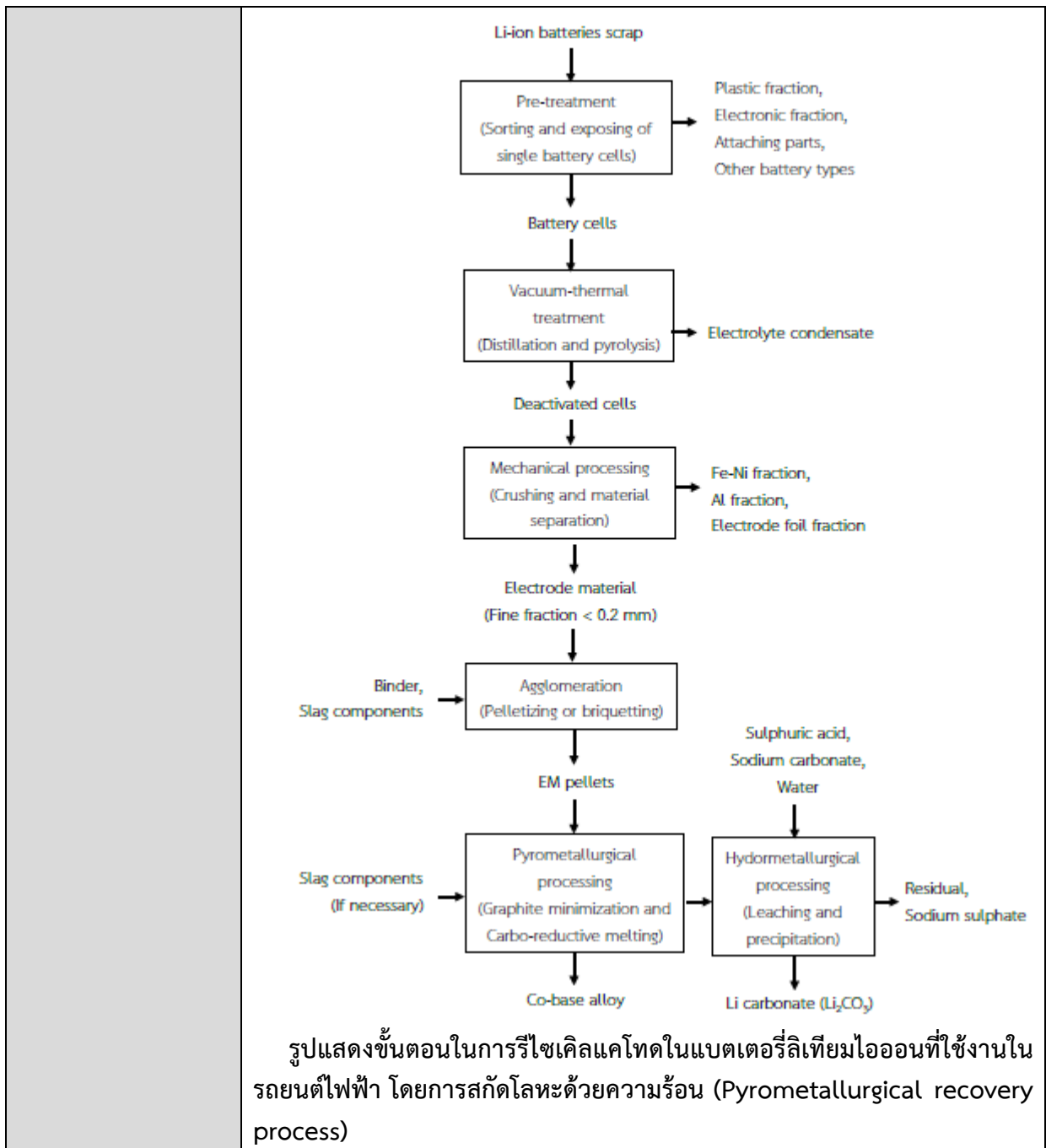
หลังจากคัดแยกแล้ว วัสดุที่จะทำการรีไซเคิลจะถูกส่งไปยังขั้นตอนการเตรียมการทางกายภาพ (Physical conditioning) ก่อนที่จะนำไปผ่านกรรมวิธีทางโลหะวิทยาต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้จะคล้ายกับกรรมวิธีในการแต่งแร่ต่างๆไป ได้แก่ การบด (Crushing), การแยกด้วยแม่เหล็ก (Magnetic separation), การแยกด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic separation) และการแยกโดยอาศัยความหนาแน่น (Dense medium separation, DMS) ในการบดจะเป็นการทำให้ชิ้นส่วนที่จะนำมารีไซเคิลแตกออก (Fragmentation) ก่อน วัตถุประสงค์เพื่อแยกเอาเปลือกที่ทำจากพอลิเมอร์หรือโลหะออกจากวัสดุที่อยู่ภายในซึ่งจะมีโลหะที่เราต้องการสกัดออกมาจากการรีไซเคิลบรรจุอยู่ภายใน จากนั้นนำเอาวัสดุที่อยู่ภายในไปบดให้มีขนาดเล็กละเอียดเพื่อที่จะทำแยกเอาวัสดุที่มี

	<p>อยู่หลายๆ ชนิดออกจากกัน หรือเพื่อที่จะทำการแยกโดยอาศัยสมบัติเฉพาะของวัสดุเหล่านั้นในขั้นต่อไป เช่น การแยกด้วยแม่เหล็ก ก็จะถูกใช้สำหรับการแยกเอาโลหะที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น เหล็ก นิกเกิล และโลหะผสมของโลหะเหล่านี้ออกจากวัสดุตัวอื่นที่ไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก (Non-magnetic material) หรือ การแยกด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อที่จะแยกเอาวัสดุที่นำไฟฟ้าออกจากวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น การแยกเอาโลหะออกจากวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ หรือวิธีการ DMS เพื่อที่จะแยกเอาวัสดุที่มีความหนาแน่นต่างกันออกจากกัน เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมการขยะนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณหรือสัดส่วนของโลหะที่ต้องการจากการรีไซเคิลที่มีในขยะเหล่านี้ให้มีสัดส่วนที่สูงขึ้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการถัดไปคือกรรมวิธีทางโลหะ และทำให้เกิดประสิทธิภาพต่อกระบวนการรีไซเคิลสูงที่สุด</p> <p>ในขั้นที่สอง ขั้นตอนของกรรมวิธีทางโลหะ ได้แก่ กระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้ความร้อน (Pyrometallurgy), กระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้สารละลาย (Hydrometallurgy) และ กระบวนการไฮบริด (Hybrid processes) ซึ่งมีการใช้ทั้งกระบวนการ Pyro- และ Hydrometallurgy ในการรีไซเคิล</p>
<p>กระบวนการทางโลหะวิทยาความร้อน (Pyrometallurgical process) :</p>	<p>กระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้ความร้อน (Pyrometallurgical process) วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้</p> <ul style="list-style-type: none"> - แคลเทคของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (ซึ่งมีโลหะนิกเกิลและโคบอลต์อยู่ในปริมาณสูง) - สารที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสำหรับใช้เป็นตัวรีดิวซ์ (Carbon reducing agent) - ตัวประสาน (Binder) เพื่อปั้นผงวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปก้อน (Pelletizing) - สารฟอรัมสแลก (Slag forming materials) <p>เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง</p> <ul style="list-style-type: none"> - เตาหลอมที่สามารถหลอมได้อุณหภูมิสูงและสามารถควบคุมบรรยากาศได้ - เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับบด - เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับคัดแยกชิ้นส่วนแบตเตอรี่ - อุปกรณ์เกี่ยวกับความปลอดภัย เช่น ถุงมือ แวนตา หน้ากาก <p>รายละเอียดกระบวนการและขั้นตอน</p> <p>ในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีการใช้งานแล้วโดยกระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้ความร้อน (Pyrometallurgy) จะใช้ความร้อนเพื่อสกัดเอาโคบอลต์และนิกเกิลซึ่งเป็นธาตุที่มีราคาแพงออกมา วิธีการนี้จะไม่สามารถสกัดเอาลิเทียมออกมาได้ โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วจะถูกนำไปหลอมเพื่อแยกสกัดเอาโคบอลต์และนิกเกิลออกมา จากนั้นนำไปทำให้บริสุทธิ์ (Refining) ต่อไป ซึ่งลิเทียมจะไปอยู่ในตะกรัน (Slag) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการให้ความร้อนร่วมกับอะลูมิเนียม ซิลิกอน และแคลเซียม ข้อมูลสำคัญอย่างหนึ่งในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วนั้น จัดว่าเป็นแหล่งแร่ที่สำคัญของโลหะโคบอลต์และนิกเกิลซึ่งมีมูลค่าสูงกว่ามูลค่าของลิเทียมที่สกัดได้จากการรีไซเคิลซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่ต่ำ (L.T. Peiro และคณะ, 2013)</p> <p>T. Georgi-Maschler และคณะ (2012) ได้ศึกษาการสกัดเอาโลหะออกมาจากแบตเตอรี่ลิเทียมที่ใช้งานแล้วโดยมุ่งเน้นที่จะพัฒนากระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้ความร้อน (Pyrometallurgical process) ซึ่งจะทำการหลอมชิ้นส่วนที่เป็นแคลเทคซึ่งถูกแยกออกมาจากส่วนประกอบอื่นๆ ซึ่งจะมีโคบอลต์และลิเทียมเป็นองค์ประกอบหลักด้วยการหลอมภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีคาร์บอนเป็นตัวรีดิวซ์</p>

(Carbo-reductive melting) ด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric arc furnace) ซึ่งผลผลิตที่ได้จากกระบวนการจะอยู่ในรูปของโลหะผสมโคบอลต์ (Cobalt alloy) ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่อยู่ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแสดงให้เห็นในตาราง ตารางแสดงปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่อยู่ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (T. Georgi-Maschler และคณะ, 2012)

Battery component	Product data sheets (in mass%)	Self-determined (in mass%)
Casing	~20-25	~25
Cathode material (LiCoO ₃)	~25-30	~25
Anode material (graphite)	~14-19	~17
Electrolyte	~10-15	~10
Copper electrode foil	~5-9	~8
Aluminium electrode foil	~5-7	~5
Separator	-	~4
Others	Balance	Balance

จะเห็นได้ว่าสัดส่วนของแคโทดซึ่งมีโคบอลต์และลิเทียมเป็นโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักนั้นคิดเป็นสัดส่วนในส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสูงที่สุด (25-30%) ดังนั้นจึงมีนัยสำคัญที่จะนำเอาส่วนนี้มาสกัดเอาโลหะที่มีมูลค่าสูงออกมา อีกทั้งยังเป็นการคัดแยกเอาวัสดุดิบที่จะนำมารีไซเคิลที่มีปริมาณความเข้มข้นที่สูงในตอนเริ่มต้นอีกด้วย โดยกระบวนการที่ใช้ในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนดังกล่าวมาข้างต้นนี้มีขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในรูปแบบ



รูปแสดงขั้นตอนในการรีไซเคิลแคโทดในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า โดยการสกัดโลหะด้วยความร้อน (Pyrometallurgical recovery process)

กระบวนการทางโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgical process) :

กระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้สารละลาย (Hydrometallurgical process) วัสดุขี้บและสารเคมีที่ใช้

- แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้ว
- กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- ผงเหล็ก
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- โซเดียมคาร์บอเนต

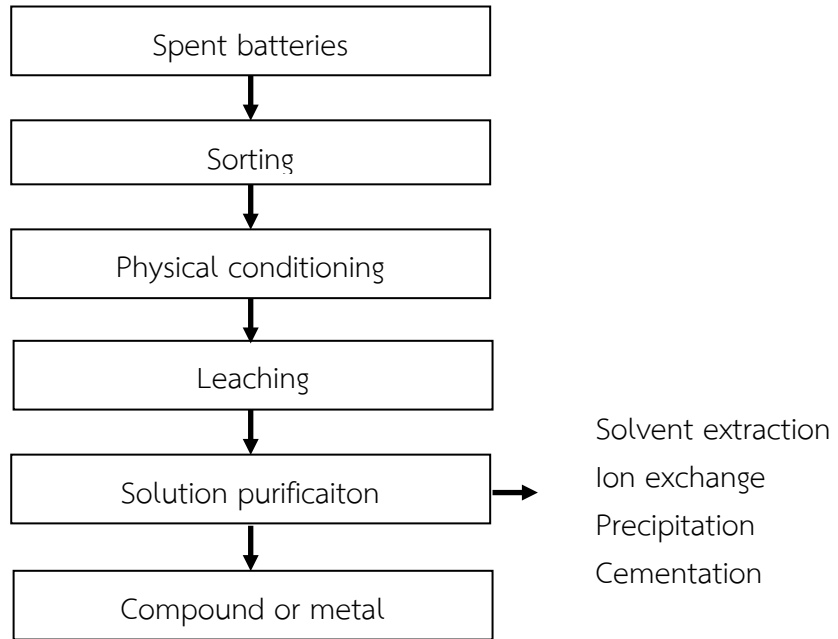
เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

- เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการคัดแยกชิ้นส่วนขยะ

- เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการบดขยี้ให้เป็นผงหรือชิ้นส่วนขนาดเล็ก
- อุปกรณ์เครื่องแก้วทดลองที่ใช้งานกับสารละลายกรดและด่าง
- อุปกรณ์ป้องกันเกี่ยวกับความปลอดภัย เช่น ถุงมือ หน้ากาก แวนตา

รายละเอียดกระบวนการและขั้นตอน

ขั้นตอนโดยทั่วไปในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ใช้งานแล้วโดยกระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้สารละลาย (Hydrometallurgical process) มีขั้นตอนหลักๆ ดังแสดงในรูป



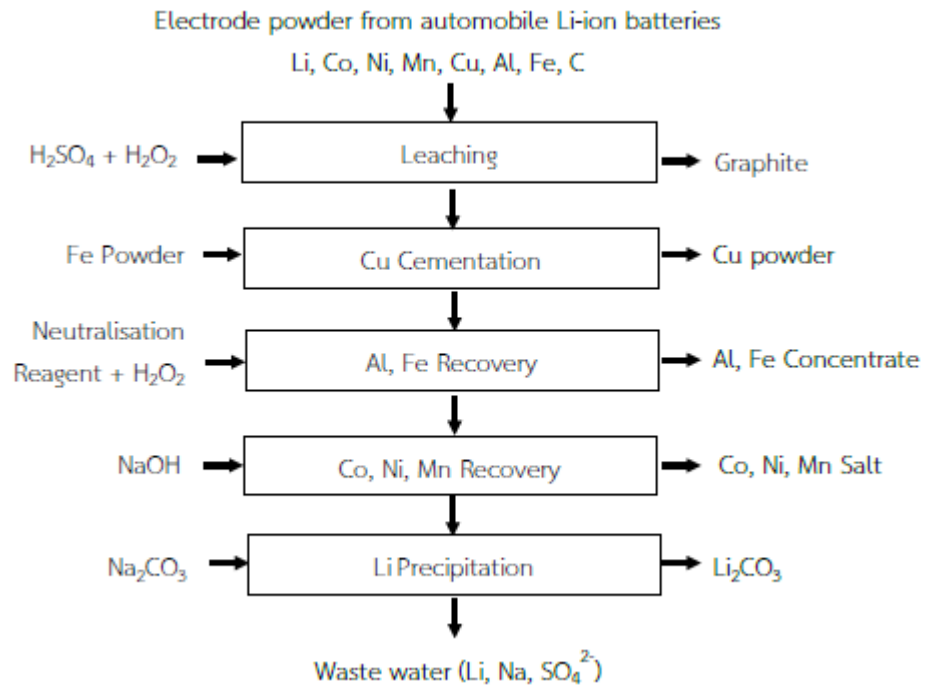
รูปแสดงขั้นตอนหลักๆ ในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ด้วยกระบวนการสกัดโลหะด้วยสารละลาย

โดยแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วจะผ่านขั้นตอนการเตรียมขยี้ ซึ่งจะมีการคัดแยกและเตรียมการทางกายภาพดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จากนั้นจะนำไปผ่านกรรมวิธีทางโลหะวิทยาซึ่งในกรณีนี้จะเป็นกระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้สารละลาย โดยผ่านขั้นตอนการชะละลายด้วยสารเคมี (Leaching step) ด้วยการใช้อะซิติก กรดซัลฟิวริกเพื่อละลายเอาโคบอลต์และลิเทียมออกมา (Ferreira et al., 2009) หรืออาจเป็นสารละลายกรดชนิดอื่น เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดไนตริก (HNO₃) ซึ่งอาจใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) เพื่อละลายเอาโลหะที่เราสนใจที่อยู่ในแบตเตอรี่ในรูปของแข็งให้ไปอยู่ในรูปของสารละลาย

ภายหลังจากการชะละลาย สารละลายที่ได้จะถูกนำไปทำให้บริสุทธิ์ (Purification) ซึ่งอาจจะใช้วิธีการที่ต่างกันได้หลายวิธี เช่น ซีเมนเตชัน (Cementation), การตกตะกอนของแข็ง (Precipitation), การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction), การสกัดด้วยการดูดซับ (Adsorption), การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นต้น (T. Rosenqvist, 1983) ซึ่งสุดท้ายแล้วโลหะชนิดต่างๆ จะถูกแยกจากสารละลายให้มาอยู่ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หรือโลหะออกไซด์ หรืออยู่ในรูปไฮดรอกไซด์และเกลือ ซึ่ง Ferreira และคณะ (2009) ได้มีการรวบรวมข้อมูลเพื่อรายงานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการสกัดโลหะจาก

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยการใช้สารละลาย ทั้งในขั้นตอนการชะละลาย (Leaching) และขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) ไว้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้สำหรับการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไว้อีกด้วย

จากรายงานของ IMP Process Metallurgy and Metal Recycling, RWTH Aachen, Germany ได้เสนอกระบวนการที่จะใช้ในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ไฮบริด โดยใช้ชื่อกระบวนการว่า IME-Accurec Hydro Process ดังแสดงในรูป



รูปแสดงกระบวนการในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า ด้วยการสกัดเอาโลหะโดยการชะละลาย (Hydrometallurgical process) – IME-Accurec Hydro

ในกระบวนการนี้ อิเล็กโทรดซึ่งอยู่ในรูปผงจากกระบวนการแยกส่วนและย่อยแบตเตอรี่ก่อนหน้านี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการสกัดเอาโลหะออกมาโดยใช้สารละลาย โดยเริ่มจากการชะละลาย (Leaching) เอาโลหะที่มีค่าและต้องการออกมาอยู่ในสารละลายกรดซึ่งจะใช้กรดซัลฟิวริกในการชะละลาย จากนั้นจะนำไปผ่านวิธีการแยกโลหะชนิดต่างๆ ออกมาทีละขั้น (Purification step) โดยจะแยกทองแดงออกมาก่อนด้วยวิธีการซีเมนเตชัน ด้วยการเติมผงของเหล็กลงไปแลกเปลี่ยนให้ทองแดงตกตะกอนออกมาอยู่ในรูปผง จากนั้นจะทำให้อะลูมิเนียมและเหล็กตกตะกอนของแข็งออกมา (Precipitation) ด้วยการปรับค่า pH ของสารละลาย ตามด้วยการทำให้โคบอลต์ นิกเกิล แมงกานีส ตกตะกอนของแข็งเป็นลำดับถัดมาด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสุดท้ายจะทำให้ลิเทียมตกผลึก (Crystallization) ออกมาอยู่ในรูปของลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3)

ข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้อง L.T. Peiro และคณะ (2013) ได้ระบุวิธีการในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการ Hydrometallurgy, Intermediate physical,

Direct physical, Pyrometallurgy โดยในแบตเตอรี่ชนิดนี้จะใช้ลิเทียมเมทัล ออกไซด์ (LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4) เป็นแคโทด และสารละลายอินทรีย์ที่มี LiClO_4 , LiBF_4 , LiPF_6 เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถที่จะทำการสกัดหรือแยกเอา ลิเทียมออกมาจากแคโทดได้

โดยกระบวนการสกัดโลหะด้วยการใช้สารละลาย (Hydrometallurgy) เป็นวิธี หลักที่ใช้ในการรีไซเคิลลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO_2) จากแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนที่มีการใช้งานแล้ว ด้วยการชะละลายแคโทดที่เป็น LiCoO_2 ด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไนตริก (HNO_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะถูกใช้ร่วมด้วยเพื่อทำให้โลหะโคบอลต์ละลายลงไปในสารละลายซึ่งจะ สามารถทำการสกัดออกมาในขั้นตอนต่อไปด้วยวิธีการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) เช่น การสกัดด้วยไฟฟ้า (Electrolysis), การตกตะกอนของแข็ง (Precipitation) หรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) นอกจากนี้กระบวนการสกัด โลหะด้วยการใช้สารละลาย ยังสามารถที่จะใช้ในการสกัดเอาลิเทียมออกมาจาก ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (LiMn_2O_4) ได้เช่นกัน ด้วยกระบวนการนี้แคโทดที่มี สารประกอบลิเทียมอยู่จะถูกนำไปผ่านถึงที่มีสารเมทิลไพโรลิดอน (N-methylpyrrolidone) เพื่อทำการแยกเอาโลหะอะลูมิเนียมออกมาก่อน จากนั้นจะ นำไปเผาไล่ความชื้นและก๊าซออกไป แล้วนำไปบด และชะละลายด้วยสารละลายกรด ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผสมอยู่ด้วย แล้วทำการสกัดลิเทียมออกมาด้วยการทำให้ บริสุทธิ์ด้วยวิธีการตกตะกอนของแข็งได้ผลผลิตออกมาในรูปของ Li_2CO_3 แล้วค่อย นำไปเผากับแมงกานีสออกไซด์ (Mn_2O_3) เพื่อผลิตเป็นลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (LiMn_2O_4) เพื่อนำกลับมาใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ต่อไป

ในกรณีของการรีไซเคิลด้วยกระบวนการ Intermediate physical processes นั้น แบตเตอรี่ที่ใช้แล้วจะถูกย่อยหลังจากนั้นจะทำการแยกเอาชิ้นส่วนต่างๆ ออกจาก กัน เช่น โลหะ กระจก พลาสติก และส่วนที่อยู่ข้างในแบตเตอรี่ จากนั้นนำส่วนที่อยู่ ข้างในไปผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เพื่อผลิตเป็น ลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) ซึ่งลิเทียมจะถูกสกัดให้มาอยู่ในรูปของลิเทียม คาร์บอเนตเพื่อที่จะสามารถทำปฏิกิริยากับแมงกานีสออกไซด์ที่ยังไม่ถูกใช้งาน (Virgin Mn_2O_3) ทำให้ได้เป็นลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (LiMn_2O_4)

สำหรับกระบวนการ Direct physical processing นั้น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่ใช้งานแล้วจะถูกถอดแยกออกจากกันจนถึงระดับเซลล์ของแบตเตอรี่ จากนั้นอิเล็กโทรไลต์จะถูกแยกออกมาจากเซลล์แบตเตอรี่ด้วยวิธีการซูเปอร์คริติกไดออกไซด์คาร์บอนไดออกไซด์ (Supercritical carbon dioxide, CO_2) ตัวเซลล์แบตเตอรี่จะถูกนำไปย่อยให้มีขนาดเล็กลงแล้วแยกส่วนต่างๆ ออกจากกันด้วยวิธีการแยกโดยใช้ ความแตกต่างของสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical conductivity), ความหนาแน่น (Density) หรือด้วยวิธีการอื่นๆ ที่สามารถแยกเอาโลหะที่มีสมบัติต่างกันออกจากกัน ได้ ลิเทียมที่สกัดออกมาด้วยกระบวนการนี้จะอยู่ในรูปของลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO_2)

6. การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) :	
วัสดุ/อุปกรณ์ /สารเคมี :	-
ขั้นตอนการทดลอง :	-
ผลการทดลอง :	-
7. การทดลองในระดับโรงงานต้นแบบ (Pilot Scale) :	
วัสดุ/อุปกรณ์ /สารเคมี :	-
ขั้นตอนการทดลอง :	-
ผลการทดลอง :	-
8. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility Study) :	
NPV :	-
B/C :	-
IRR :	-
9. กฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง :	
<p>ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายที่ว่าด้วยการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะ ดังนั้นการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์และแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วจึงอยู่ภายใต้พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 และพระราชบัญญัติการสาธารณสุข (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 ที่ให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว</p>	
10. เอกสารอ้างอิง (References) :	
<ul style="list-style-type: none"> - D.C.R. Espinosa and M.B. Mansur, Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook, Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 365-384. - L.T. Peiro, G.V. Mendez and R.U. Ayres, Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook, JOM, Vol. 65, No. 8, 2013. - H. Wang, D. Friedmann, M. Vest and B. Friedrich, Innovative recycling of Li-based electric vehicle batteries, IME Process Metallurgy and Metals Recycling, RWTH Aachen University, Germany. - H. Wang, M. Vest and B. Friedrich, Hydrometallurgical processing of Li-ion battery scrap from electric vehicles, IME Process Metallurgy and Metals Recycling, RWTH Aachen University, Germany. - T. Georgi-Maschler, B. Friedrich, R. Weyhe, H. Heegn and M. Rutz, Development of a recycling process for Li-ion batteries, Journal of Power Sources, Vol. 207, 2012, pp. 173-182. 	