

ทิศทางและแนวโน้มการพัฒนาและวิจัยลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

Trend to Develop and Research Lithium Ion Battery for Electric Vehicles

กฤษฎา ปัญญาวุธโร

ห้องปฏิบัติการเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Email address: konlayutt.p@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

รถยนต์พลังงานไฟฟ้าได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน และมีการคาดการณ์ว่าจะมาแทนที่รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยการสันดาปภายในในอนาคต เนื่องจากการขาดแคลนพลังงานน้ำมันและเรื่องของสิ่งแวดล้อม แหล่งพลังงานหลักสำหรับรถยนต์ชนิดนี้ในช่วงเริ่มต้นส่วนใหญ่มาจากลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาและวิจัยลิเทียมไอออนแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์พลังงานไฟฟ้าที่น่าสนใจในบทความนี้ สะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มและทิศทางการพัฒนาและวิจัยเพื่อตอบปัญหาต่างๆ ที่เป็นอุปสรรค อาทิเช่น การเพิ่มความหนาแน่นพลังงาน การเพิ่มจำนวนการอัดและคายประจุ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอิเล็กโทรด การคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้บริโภคขณะใช้งาน และรวมไปถึงเรื่องราคาที่จะต้องมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้สามารถแข่งขันและผู้บริโภคสามารถเข้าถึงได้

คำสำคัญ : ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่, รถยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า, แบตเตอรี่

Abstract

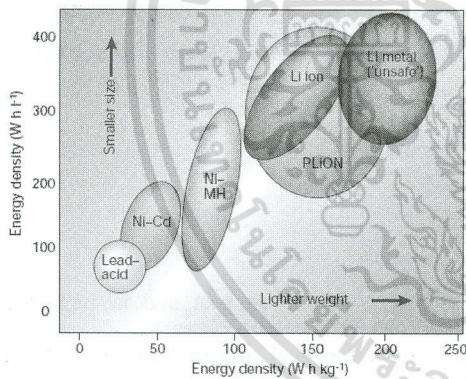
Electric Vehicles (EV) have been more interested in nowadays than in the past, and are expected to replace the internal combustion engine in the near future, since the depletion of fossil fuel and the environmental aspects. Initially, the energy sources of EV stem mainly from lithium ion battery. Consequently, lithium ion battery properly worked for the EV needs to be investigated and the tendencies of which topics require to develop and research are presented in this article. The improvement of power density and longevity (charge/discharge cycles) were discussed by introducing novel materials and changing molecule/atom structures of electrodes. Moreover, the means of safety was determined during battery operation. And the green lithium battery was also examined particularly its ability to recycle. Finally, lithium ion battery cost was considered for competition in the market and for accessibility of the customers.

Keywords : Lithium ion battery, Electric Vehicles, Battery

1. บทนำ

รถยนต์ในปัจจุบันใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และมีแนวโน้มที่จะมีราคาแพงขึ้น นอกจากนี้การบริโภคน้ำมันยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ อันเนื่องมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้บรรยากาศของโลกเปลี่ยนแปลงไป เกิดปัญหาอุทกภัยที่รุนแรงมากขึ้น

รถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า กำลังได้รับความนิยมมากขึ้น เพราะการตระหนักในเรื่องสิ่งแวดล้อม และการป้องกันความเสี่ยงในเรื่องของพลังงานน้ำมัน ทำให้มีรถยนต์ไฮบริดออกขายในท้องตลาด อย่างไรก็ตามบริษัทรถยนต์เหล่านี้พยายามอย่างหนักในการที่จะทำให้รถยนต์สามารถขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียว ที่เรียกว่า ปลั๊กอินไฮบริด แต่อุปสรรคหลักอย่างหนึ่งก็คือ เทคโนโลยีในการพัฒนาแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ที่เรียกว่า แบตเตอรี่ทุติยภูมิ

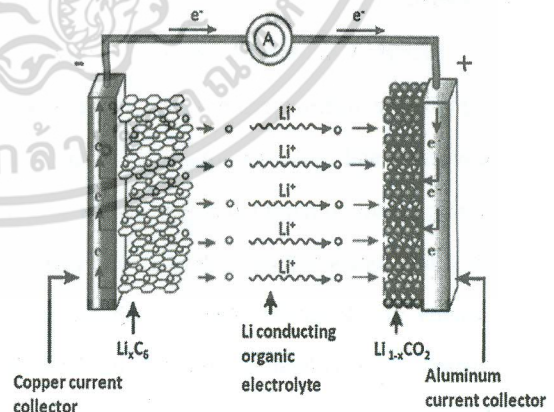


รูปที่ 1 เปรียบเทียบความหนาแน่นพลังงาน โดยมวลและปริมาตรของแบตเตอรี่ทุติยภูมิแต่ละชนิด [1]

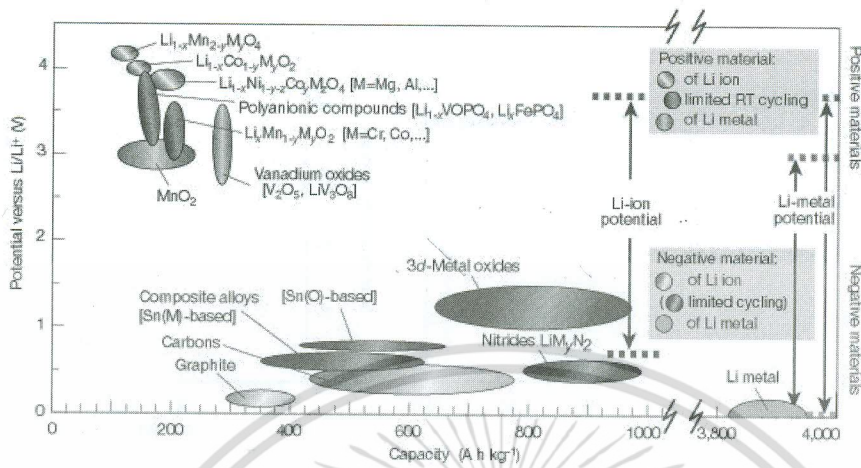
ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ [2] ถือเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิซึ่งสามารถนำกลับมาให้พลังงานได้ใหม่เมื่อนำแบตเตอรี่ไปอัดประจุ (Charging) อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่มีใช้อยู่หลากหลายชนิด เช่น แบตเตอรี่แบบตะกั่ว แบตเตอรี่แบบนิเกิล และนิเกิลเมทอลไฮดรอกไซด์ แต่ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ ได้รับความนิยมมากกว่า เพราะว่ามีค่าความหนาแน่นพลังงาน โดยมวลและโดยปริมาตรมากที่สุด ดัง

แสดงในรูปที่ 1 นั้นหมายความว่ายิ่งความหนาแน่นพลังงานโดยปริมาตรยิ่งมาก ทำให้แบตเตอรี่นั้นมียานขนาดเล็ก ในทำนองเดียวกันถ้าความหนาแน่นพลังงานโดยมวลมากก็จะทำให้แบตเตอรี่มีน้ำหนักเบาเท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นสิ่งที่รถยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าต้องการ

ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ดังรูปที่ 2 ทำงานได้ด้วยการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันที่ขั้วลบ (Anode) ทำให้เกิดอิเล็กตรอน และเคลื่อนที่ออกไปยังวงจรไฟฟ้าภายนอก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ขั้วลบลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ไปยังขั้วบวก (Cathode) แล้วเกิดปฏิกิริยรีดักชัน โดยรวมกับอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามา ทำให้เกิดปฏิกิริยา Redox กระบวนการนี้เรียกว่า การคายประจุ (Discharge) ซึ่งทำให้เราได้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ จนกระทั่งประจุของลิเทียมไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อีก ต่อไปแล้ว ทำให้ความต่างศักย์ลดลงและความสามารถในการให้อิเล็กตรอนก็ลดลงจึงต้องมีการอัดประจุ (Charge) แบตเตอรี่เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ตรงกันข้ามเพื่อให้ลิเทียมไอออน เคลื่อนที่จากขั้วบวกมาอยู่ที่ขั้วลบอีกครั้ง



รูปที่ 2 แสดงการคายประจุ (Discharge) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [3]



รูปที่ 3 แนวโน้มการพัฒนาและวิจัยวัสดุเพื่อให้ได้ความจุพลังงานที่มากขึ้นของลิเทียมแบตเตอรี่ ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ [1]

ดังนั้นเพื่อตอบสนองการนำไปใช้งานสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก ในการวิจัยค้นคว้าเพื่อให้ได้แบตเตอรี่ที่ดี โดยแนวทางการวิจัยจะเน้นไปที่ การเพิ่มความหนาแน่นพลังงาน จำนวนการคายและอัดประจุ ความปลอดภัย และ ราคา โดยมีรายละเอียดดังนี้

2. การเพิ่มความหนาแน่นพลังงาน

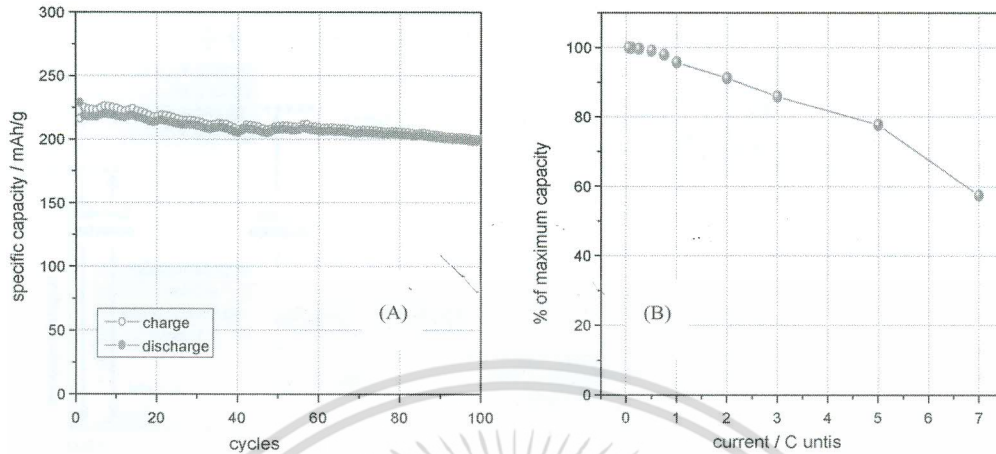
นั่นก็คือแบตเตอรี่สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้นานขึ้นต่อการอัดประจุหนึ่งครั้ง โดยการคิดค้นหาสารประกอบ ลิเทียมชนิดใหม่ๆ ที่มีลิเทียมเป็นองค์ประกอบที่มากที่สุดสำหรับขั้วบวก (Cathode) [4, 5] ในทำนองเดียวกัน ขั้วลบ (Anode) ก็ต้องรองรับปริมาณลิเทียมที่เพิ่มขึ้นได้ [6] ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการศึกษาวัสดุทั้งที่เป็นขั้วบวก (positive material) และลบ (negative material) ซึ่งลิเทียมที่ใช้จะมีแนวโน้มเป็นออกไซด์ของอัลลอย (โลหะอื่นผสมเข้ามา เช่น Cr, Co หรือ Mg เป็นต้น) จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าวัสดุขั้วลบให้ค่าความหนาแน่นพลังงานมากกว่าขั้วบวกอยู่มาก ดังนั้นนักวิจัยส่วนใหญ่ก็เลยหันมา

ให้ความสนใจวิจัยวัสดุสำหรับขั้วบวก ที่ยังเป็นอุปสรรคในการเพิ่มความจุพลังงานของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่

นอกจากการหาวัสดุชนิดใหม่แล้ว การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบอิเล็กโทรด ทั้งแบบ Layer และ Spinel oxide cathode [7, 8] ก็ช่วยทำให้ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ มีความสามารถในการเพิ่มความหนาแน่นพลังงานได้มากขึ้นอีกด้วย

3. จำนวนการ Charge/discharge ที่มากขึ้น

นั่นหมายถึงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะนานขึ้น ทำให้ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนบ่อย โดยเฉพาะถ้านำไปใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยตั้งไว้ที่ 10 – 15 ปี [2] โดยสาเหตุหลักของการเสื่อมของแบตเตอรี่มาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของทั้ง Cathode และ Anode ซึ่งจะค่อยๆเปลี่ยนไปเมื่อมีการเคลื่อนที่ของประจุลิเทียม เข้าและออกจากขั้วทั้งสองที่ความต่างศักย์ในช่วงใช้งาน ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา Redox ลดลง [9] ซึ่งต้องอาศัยการศึกษา Phase transformation ในขณะที่ทำการ charge/discharge เพื่อนำไปสู่การค้นคว้าหาสารประกอบที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เช่น สารประกอบ



รูปที่ 4 การศึกษาจำนวนการ Charge/discharge ของลิเทียม ไอออนแบตเตอรี่ ที่ใช้ $\text{TiO}_2/\text{PGE}/\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ (A) และความสามารถในการจุพลังงานเทียบกับอัตราการป้อนกระแสในขณะทำการอัดประจุ (B)

โลหะออกไซด์ 3d ซึ่งเป็นโลหะจำพวก ไททาเนียม (TiO_2) เป็นไอออน โดยแคโทด เป็น $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ บอนอิเล็กโทรไลต์ PVDF แบบเจล [10, 11] ดังแสดงในรูปที่ 4

นอกจากนี้การศึกษา Mathematic model เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมก็จะช่วย ในการหาวัสดุที่เหมาะสมได้ [12] นอกจากนี้อีกสาเหตุหนึ่งของการเสื่อมของแบตเตอรี่ชนิดนี้ก็คืออิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะมีการ Degradation ของพอลิเมอร์ (ในกรณีใช้พอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์) หรือการเสื่อมสภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

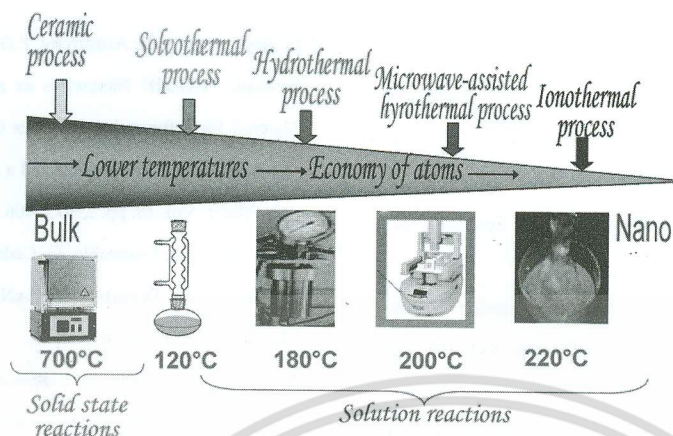
4. ความปลอดภัย

เราอาจจะเคยได้ยินข่าวการระเบิดหรือการลุกไหม้ของแบตเตอรี่ชนิดนี้ ในเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุค หรือในโทรศัพท์มือถือกันมาบ้างแล้ว อันเนื่องมาจาก ทั้งอิเล็กโทรดและ อิเล็กโทรไลต์ ประกอบไปด้วยลิเทียมอยู่จำนวนมาก พร้อมทั้งจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนอย่างรวดเร็ว (การระเบิด) ที่อุณหภูมิสูง หรือเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจน ดังนั้นจึงมีการเติม Chemical Additives ลงไปใน

อิเล็กโทรด และ อิเล็กโทรไลต์ เพื่อช่วยในการยับยั้งการลุกไหม้ อย่างไรก็ตามการเติมสารพวกนี้เข้าไป ทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง และราคาที่สูงขึ้น หรือการมีวงจรทางไฟฟ้าป้องกันการอัดประจุเกิน (Over Charge) และอุปกรณ์ป้องกันอุณหภูมิที่สูงขึ้นของแบตเตอรี่ เหล่านี้สามารถป้องกันการระเบิดและการลุกไหม้ได้

นอกจากนี้การพัฒนา Solid State Li-ion battery [13, 14] ก็เป็นอีกแนวทาง โดยการพัฒนาอิเล็กโทรดบนอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น Solid State หรือการหันมาพัฒนาอิเล็กโทรไลต์ที่ทำมาจากเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในรูปของแข็ง ทั้งสองแนวทางนี้ก็เป็นตัวอย่างในการที่เพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่

เมื่อไม่นานมานี้ลิเทียมแบตเตอรี่ ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้รับการพัฒนาขึ้นมา โดยอิเล็กโทรดทำมาจาก ออร์แกนิกลิเทียม ซึ่งสามารถนำไปรีไซเคิลได้ [15] และไม่ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการรีไซเคิลด้วย โดยใช้สาร dilithium rhodizonate ($\text{Li}_2\text{C}_6\text{O}_6$) โดยสามารถให้ค่าความจุพลังงานที่ 580 mAh/g [16]



รูปที่ 5 แสดงกระบวนการผลิต LiFePO_4 จากระดับแมโครไปสู่ระดับนาโน โดยที่มีต้นทุนที่ถูกลง [17]

5. ราคา

ในปัจจุบันราคาของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ จะอยู่ในช่วง \$300 – \$800 US/kWh^{-1} [18] ซึ่งยังมีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดที่ \$50 – \$100 US/kWh^{-1} โดยราคานี้มาจากต้นทุนการผลิต และราคาของวัสดุที่นำมาผลิต ในแง่ของวัสดุ สารประกอบลิเทียมจากโลหะ ที่มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประเภท 3d เช่น Mn (LiMn_2O_4), Fe (LiFePO_4 , LiFeSiO_4) และ Ti (TiO_2 , $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) ได้รับการพัฒนาเพื่อที่จะลดต้นทุนวัสดุในการผลิตลิเทียมแบตเตอรี่ ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการผลิต LiFePO_4 ที่ได้รับการพัฒนาตั้งแต่กระบวนการทั่วไปในระดับแมโครที่ไม่สามารถระบุขนาดอนุภาคได้ ไปจนถึงกระบวนการผลิตในระดับนาโน ซึ่งจะมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 5

นอกจากนี้ราคาของ Li เองก็ยังมีราคาที่แพง โดยสกัดมาจากเกลือลิเทียม[19] ซึ่งมีมากในประเทศชิลีและโบลิเวีย ถ้าปริมาณการใช้มากขึ้นในอนาคต ราคา ก็จะแพงจากการมีทรัพยากรที่จำกัด ถึงแม้ว่าจะมีแหล่งลิเทียมจำนวนมากอยู่ในทะเล แต่ก็ต้องใช้การลงทุนที่มากในการสกัดลิเทียมจากน้ำทะเล ดังนั้นการหาสารทดแทนชนิดใหม่จึงได้รับความสนใจ โดยเฉพาะ Na [20] เช่น เซลล์ของ Na/S ในระบบเก็บพลังงานในระดับเมกะวัตต์ หรือ Na/NiCl₂ ในระบบ ZEBRA ของรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ทั้งสองระบบใช้ Na- β -alumina ceramic เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งใน

อนาคตแบตเตอรี่จากโซเดียมมีโอกาสเข้ามาแทนที่ลิเทียมได้ไม่ยาก เนื่องจากราคาที่ถูกลง แต่ก็ยังมีภารกิจและพัฒนามาก

6. บทสรุป

การวิจัยและพัฒนาลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ สำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า กำลังจะเปลี่ยนแปลงระบบการขนส่งในอนาคต โดยนักวิจัยได้ใช้ความรู้ความสามารถในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจนถึงระดับโมเลกุล และอะตอม เพื่อเข้าใจถึงสถานะที่จำเป็นในการพัฒนาวัสดุ เพื่อให้ได้วัสดุตามต้องการ และตอบสนองต่อความต้องการ ของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้ความปลอดภัยยังได้รับการดูแลทั้งในขณะใช้งานและการทำให้ลิเทียมแบตเตอรี่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมหลังจากการใช้งานแล้ว นอกเหนือจากนั้นราคาของแบตเตอรี่ต้องทำให้ผู้บริโภคสามารถเข้าถึงได้ และมีแหล่งทรัพยากรที่เพียงพอต่อความต้องการที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต

ดังนั้นจะเห็นว่า ยังมีช่องว่างอีกมากที่ให้เราได้ทำการศึกษาและวิจัยเพื่อที่จะได้พัฒนาลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ ในประเทศเรา เพื่อนำไปสู่อุตสาหกรรมการผลิต และการพัฒนาต่อยอดต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. Tarascon, M. Armand, "Issues and Challenges facing rechargeable lithium batteries," *Nature*, Vol. 414, pp. 359-367, 2001.
- [2] G. A. Nari, G. Pistoia, *Lithium Batteries*. Springer, New York, 2003.
- [3] B. Scrosati, J. Garche, "Lithium batteries: Status, Prospects and future," *J. Power Sources*, Vol. 195, pp. 2419, 2010.
- [4] Z. L. Gong, Y. X. Li, Y. Yang, "Synthesis and characterization of $\text{Li}_2\text{Mn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{SiO}_4$ as a cathode material for lithium ion batteries," *Electrochem. Solid-State Lett.*, Vol. 9, pp. 2778, 2006.
- [5] A. S. Arico, P. Bruce, B. Scrosati, J. M. Tarascon, W. Van Schalkwijk, "Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices," *Nat. Mater.*, Vol. 4, pp. 366, 2005.
- [6] T. Shodai, S. Okada, S. Tobishima, I. Yamabi, "Study of $\text{Li}_3\text{-xM}_x\text{N}$ (M=Co, Ni or Cu) system for use as anode in lithium rechargeable cell," *Solid State Ionics*, Vol. 86-88785, 1996.
- [7] R.J. Gummow, D. C. Liles, M. M. Thackeray, "A reinvestigation of the structures of lithium-cobalt-oxide with neutron-diffraction data," *Mat. Res. Bull.*, Vol. 28, pp. 1177, 1993.
- [8] Y. Shao-Horn, S. A. Hackney, C. S. Johnson, J. A. Kahaian, M. M. Thackeray, "Structural Features of Low-Temperature LiCoO_2 ," *J. Solid State Chem.*, Vol. 140, pp. 116, 1998.
- [9] Y. Shao-Horn, S. Levasseur, F. Weill, C. Delmas, "Probing Lithium and Vacancy Ordering in O_3 Layered Li_xCoO_2 ($x = 0.5$): An Electron Diffraction Study," *J. Electrochem Soc.*, Vol. 150, pp. A366, 2003.
- [10] S. P. Reale, B. Panero, B. Scrosati, "Sustainable High-Voltage Lithium Ion Polymer Batteries," *J. Electrochem Soc.*, Vol. 152, pp. A1949, 2005
- [11] G. Armstrong, A. R. Armstrong, P.G. Bruce, P. Reale, B. Scrosati, "TiO₂(B) Nanowires as an Improved Anode Material for Lithium-Ion Batteries Containing LiFePO_4 or $\text{LiNi}_0.5\text{Mn}_1.5\text{O}_4$ Cathodes and a Polymer Electrolyte," *Adv. Mater.*, Vol. 18, pp. 2597, 2006.
- [12] M. E. Arroyo de Dompablo, G. Cedar, "On the Origin of the Monoclinic Distortion in Li_xNiO_2 ," *Chemistry of Materials*, Vol. 15, pp. 63, 2003.
- [13] T. Minami, A. Hayashi, M. Tatsumisago, "Preparation of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ electrode material via solution process and their electrochemical properties in all solid state lithium batteries," *J. Electrochem Soc.*, Vol. 154, pp. A725-A729, 2007.
- [14] M. Mackawa, H. Matsuo, M. Takamura, Y. Ando, T. Noda, S. I. Karashiand, J. Orimo, "Halide-stabilized LiBH_4 a room temperature lithium fast ion conductor," *Am. Chem. Soc.*, Vol. 131, pp. 894-895, 2009.
- [15] M. Armand, J. M. Tarascon, "Building better batteries," *Nature*, Vol. 451, pp. 652, 2008.
- [16] M. Armand, S. Grugeon, H. Vezin, S. Laurelle, P. Ribiere, P. Poizot, J. M. Tarascon, "Conjugated dicarboxylate anodes for Li-ion batteries," *Nat. Mater.*, Vol. 8, pp. 120, 2009.
- [17] J. M. Tarascon, N. Recham, M. Armand, J. N. Chotard, P. Barpanda, W. Walker, L. Dupont, "Searching for better Li-based electrode materials via innovative low temperature inorganic synthesis," *Chem. Mater.*, Vol. 22, pp. 724-739, 2010.
- [18] J. M. Tarascon, "Key challenges in futures Li-battery research," *The Royal Society A*, Vol. 368, pp. 3227, 2010.
- [19] Research, M. I., 2006, The trouble with lithium. Implications of future PHEV production for lithium demand.
- [20] B. L. Ellis, W. R. M. Makahnouk, Y. Makimura, K. Toghill, L. F. Nazar, "A multifunctional 3.5 V iron-based phosphate cathode for rechargeable batteries," *Nat. Mater.*, Vol. 6, pp. 749, 2007.