

การออกแบบเครื่องคัดแยกด้วยไฟฟ้าสำหรับการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

DESIGN OF ELECTRICAL SEPARATION MACHINE FOR LITHIUM-ION
BATTERY RECYCLING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF ELECTRICAL SEPARATION MACHINE FOR LITHIUM-ION
BATTERY RECYCLING

PIPATKORN ANMAK

PAKKHAPOL SIRIKARNTAYUPRAKIT

PARKPOOM NAMWONGTAKUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL
ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2564
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบเครื่องคัดแยกด้วยไฟฟ้าสำหรับการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
Design of Electrical Separation Machine for Lithium-ion Battery Recycling

ผู้จัดทำ

1. นาย พิพัฒน์กร อันมาก 61010749
2. นาย ภัคพล สิริกานตยูปกฤต 61010785
3. นาย ภาคภูมิ นามวงศ์ตระกูล 61010804



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

(ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์)

การออกแบบเครื่องคัดแยกด้วยไฟฟ้าสำหรับการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

นาย พิพัฒน์กร อ้นมาก 61010749

นาย ภัคพล สิริگانตยุปกฤต 61010785

นายภาคภูมิ งามวงศ์ตระกูล 61010804

ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

เครื่องต้นแบบคัดแยกด้วยใช้วิธีการ Electrical Separation สำหรับโครงงานนี้ถูกออกแบบเพื่อศึกษาการทำงานของกระบวนการคัดแยก Black mass โดยการสร้างเครื่องคัดแยกต้นแบบขนาดเล็กและราคาถูกให้ได้ประสิทธิภาพที่ยอมรับได้โดยสามารถแยกวัสดุนำไฟฟ้าและไม่นำไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้านั้นเป็นเทคโนโลยีที่หลายๆประเทศกำลังจับตามองเพราะเป็นยานพาหนะทางเลือกในอนาคต และเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดปัญหาโลกร้อน แต่ในอนาคตอันใกล้อาจเกิดปัญหาที่ตามมาคือปัญหาจากขยะจากแบตเตอรี่ที่เหลือใช้ซึ่งเป็นปัญหาที่ตามมาเพราะแบตเตอรี่ส่วนใหญ่ที่ไม่ใช้จะนำไปเผาทำลายหรือฝังดินซึ่งเป็นปัญหาในการเกิดมลพิษและก๊าซเรือนกระจก ถ้าประเทศไทยมีการปรับตัวในการนำรถยนต์ไฟฟ้ามาใช้เป็นจำนวนมากอย่างแพร่หลาย และในอีก10ปี ข้างหน้าอาจทำให้ประเทศไทยมีขยะจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่หมดอายุการใช้งานเป็นจำนวนมาก เราจึงได้ศึกษาเกี่ยวกับแบตเตอรี่ และเพื่อหาแนวทางวิธีการรีไซเคิลแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งาน เพื่อนำแร่ธาตุสำคัญที่เป็นส่วนประกอบในแบตเตอรี่ กลับมาใช้สร้างแบตเตอรี่ใหม่ การทำเครื่องต้นแบบเป็นเรื่องสำคัญต่อกระบวนการถัดไปในกระบวนการแยกมวลสีดำและการผลิตเครื่องต้นแบบที่มีราคาประหยัด ผู้จัดทำจึงมีความสนใจในการจัดทำเครื่องต้นแบบขึ้นมาเพื่อทดสอบทฤษฎีและขีดจำกัดความสามารถของการแยกblack massด้วยปรากฏการณ์โคโรนา (Corona Electrode) และสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุมาประยุกต์ใช้ ทางคณะผู้จัดทำจึงได้นำหลักการของการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา มาใช้ในการแยกแร่ธาตุที่สำคัญๆ พร้อมทั้งเป็นต้นแบบเพื่อต่อยอดในอนาคต โดยวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับวัสดุที่นำมาคัดแยกที่ใช้ในกระบวนการคัดแยกองค์ประกอบแร่ธาตุในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพื่อออกแบบโครงสร้างของตัวเครื่องต้นแบบในการคัดแยกให้เหมาะสมกับการคัดแยกวัสดุโดยใช้ Ion Bombardment สำหรับใช้ในกระบวนการคัดแยกองค์ประกอบแร่ธาตุสำคัญในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และยังศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการคัดแยกสารด้วย corona electrode 1 และ 3 เซ็ม

Design of Electrical Separation Machine for Lithium-ion Battery Recycling

Pipatkorn Anmak 61010749

Pakkhapol Sirikarntayupakit 61010785

Parkpoom Namwongtakun 61010804

Asst.Prof.Dr.Chinda Charoenphonphanich Advisor Year 2021

Abstract

The prototype sorting machine with the use of the electrical separation method. This thesis was designed to study the operation of the black mass sorting process by constructing a small and inexpensive prototype sorter to achieve acceptable performance by separating conductive and non-conductive materials. Electric vehicles are a technology that many countries use as a future substitute to help reduce global warming, but in the near future, there may be more problem from leftover battery waste, which is a problem because most batteries that are not used are incinerated or buried in the ground, which is a problem for pollution and greenhouse gases. If Thailand has adapted to the widespread adoption of electric vehicles and the next 10 years, it may cause Thailand to have a lot of waste from electric vehicle batteries that have expired, so we are learning battery li-ion and how to recycle batteries for the battery that has expired to separate black mass that component of battery reuse to build the new battery. Prototyping is essential to the next process in black mass separation and low cost-effective prototyping. The authors are interested in creating a prototype to test the theory and limitations of the black mass separation capability with the phenomenon of corona (Corona Electrode) and the electrical conductivity properties of the material applied. The authors have therefore adopted the principle of the corona phenomenon. It used to separate important minerals as well as being a model for future developments. The objective of the thesis was to study the relationship of conductivity to the sorted materials used in the mineral composition separation process in lithium-ion batteries. To design the structure of the screening prototype to be suitable for the material sorting using Ion Bombardment for use in the separation of key mineral constituents in lithium-ion batteries. It also studied the separation efficiency with 1 and 3 needle-type corona electrodes.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.จินดา เจริญพร พาณิชย์ อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโทฉบับนี้ คณะผู้จัดทำปริญญาโทรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาโท สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริญญาโทเล่มนี้ ทำให้ปริญญาโทมีความสมบูรณ์

ขอกราบของพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่งซึ่งได้เลี้ยงดูพร้อมทั้งให้โอกาสทางการศึกษา อย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจอย่างเสมอมาแม้จะพบเจออุปสรรคมากมายแค่ไหนก็ตาม และในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบไม่ได้

ขอขอบพระคุณพี่ปริญญาโทภาควิชาไฟฟ้า และ เพื่อนๆภาควิชาไฟฟ้า ที่คอยช่วยเหลือในการใช้ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสผู้จัดทำปริญญาโทเข้ามารับการศึกษและทำการทดลองที่ภาควิชาแห่งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาโทฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการอำนวยพรความสุขสวัสดิ์จึงมีแก่ทุกท่าน

นาย พิพัฒน์กร	อันมาก	61010749
นาย ภัคพล	สิริกานตยูปกฤต	61010785
นายภาคภูมิ	งามวงศ์ตระกูล	61010804

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐาน	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	4
2.1.1 มวลสีดำ (Black mass)	6
2.2 กระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	6
2.3 ELECTRICAL SEPARATION	7
2.3.1 Ion Bombardment	9
2.3.2 Conductive Induction	14
2.3.3 Electric and mechanical forces exerted on the conductive	17
2.4 โรลเลอร์	19
2.4.1 ทฤษฎีของอิเล็กตรอนอิสระ สมมติฐานของแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ	19
บทที่ 3 อุปกรณ์และการออกแบบการทดลอง	21
3.1 ระบบการทำงานของ เครื่อง ELECTRICAL SEPARATOR	21
3.1.1 DC Transformer	22
3.1.2 โรลเลอร์	22

3.1.3 หัว CORONA Electrode	22
3.2 การออกแบบตัวเครื่อง	24
3.2.1 ออกแบบโครงสร้างของเครื่องต้นแบบ	24
3.2.2 การออกแบบโรลเลอร์	30
3.3 ชุดมอเตอร์	33
3.4 วงจรการต่อเครื่อง	37
3.5 อุปกรณ์จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	38
3.5.1 ชุดควบคุม DC High Voltage Generator	38
3.5.2 หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสตรง 600 กิโลวัตต์	39
3.5.3 สายตัวต้านทานน้ำ หรือ Deioniz water Resistors	39
3.5.4 Sphere gap	40
3.5.5 แผ่นทองแดง	41
3.5.6 หลุมกราวด์ หรือ หลุมสายดิน	41
3.5.7 R-C Voltage Divider	42
3.5.8 ความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการไฟฟ้า	42
3.6 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	44
3.7 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายสนามไฟฟ้า	46
3.8 ความสัมพันธ์ของโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์เข็มและพื้นที่หน้าตัดของโรลเลอร์	47
บทที่ 4 ขั้นตอนและผลการทดลอง	49
4.1 ผลการออกแบบเครื่อง Electrical separation	49
4.2 ขั้นตอนการทดลอง	49
4.2.1 เตรียมห้องปฏิบัติการไฟฟ้า	49
4.2.2 การทดลองเครื่อง Electrical Separation	51
4.3 ผลการทดลอง	53
4.3.1 การทดลองโคโรนาหัวเข็มแบบ 1 เข็ม ที่ 15 กิโลโวลต์	55
4.3.2 การทดลองโคโรนาหัวเข็มแบบ 3 เข็ม ที่ 15 กิโลโวลต์	60
4.4 เปรียบเทียบผลของลักษณะหัวโคโรนา	66
4.4.1 หัวโคโรนาแบบ 1 เข็ม	66

4.4.2 หัวโคโรน่าแบบ 3 เซ็ม	67
4.5 การหาอัตราป้อนวัสดุของตัวเครื่อง	68
4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	71
5.1 สรุปผลการทดลอง	71
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาโครงการ	72
เอกสารอ้างอิง	74



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 Flow chart แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	3
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบทั่วไปของระบบแบตเตอรี่ และแบ่งสัดส่วนของแบตเตอรี่ตามข้อมูล	5
รูปที่ 2.2 เส้นทางของความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	7
รูปที่ 2.3 จัดอันดับขั้นตอนเตรียมความพร้อมก่อนเข้ากระบวนการแยกแบบไฟฟ้าสถิต	8
รูปที่ 2.4 ไดอแกรมของเครื่องแยก HTR	10
รูปที่ 2.5 แสดงถึงแรงตรึงของอนุภาคที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำในเครื่องแยก HTR	10
รูปที่ 2.6 ไดอแกรมของเครื่องแยก CoronaStat separator	13
รูปที่ 2.7 แสดงผลของอิเล็กโทรดเหนี่ยวนำใน CoronaStat separator	14
รูปที่ 2.8 แสดงการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.9 (a) Plate และ (b) Screen electrostatic separators	16
รูปที่ 2.10 Diagram of UltraStat separator	16
รูปที่ 2.11 แรงทางไฟฟ้ากระทำต่อ เม็ดที่ได้จากการบดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	18
รูปที่ 3.1 แสดงไดอแกรมของส่วนประกอบเครื่อง Electrostatic Electrode	21
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหัวโคโรนาอิเล็กโทรดประเภทต่างๆ (a)แบบลวด (b)แบบเข็ม (c)แบบใบมีด	22
รูปที่ 3.3 ต้นแบบหัวโคโรนาแบบหัวเข็ม 1 เข็ม	23
รูปที่ 3.4 ต้นแบบหัวโคโรนาแบบหัวเข็ม 3 เข็ม	24
รูปที่ 3.5 แสดงภาพโมเดลของเครื่องจาก SOLIDWORKS	25
รูปที่ 3.6 การออกแบบโครงสร้างรับน้ำหนักของฐาน	25
รูปที่ 3.7 การออกแบบของโรลเลอร์เพื่อใช้เป็นตัวนำอิเล็กโทรด	26
รูปที่ 3.8 การออกแบบชิ้นส่วนรับน้ำหนักของโรลเลอร์และเพลลา	26
รูปที่ 3.9 การออกแบบขาตั้งของหัวโคโรนาอิเล็กโทรด	27
รูปที่ 3.10 การออกแบบ C camp ของถาดลำเลียงวัสดุ	27
รูปที่ 3.11 แผ่นสแตนเลส ไม้สำหรับเชื่อมต่อสายดิน	28
รูปที่ 3.12 เช็คแผ่นสแตนเลส ไม้สำหรับเชื่อมต่อสายดิน	28
รูปที่ 3.13 ถาดลำเลียงวัสดุ	29
รูปที่ 3.14 การออกแบบถาดลำเลียงวัสดุ	29

รูปที่ 3.15	ถาดลำเลียงวัสดุ จากตัวเครื่องจริง	29
รูปที่ 3.16	มอเตอร์สั่นที่ติดตั้งกับถาดพีทวัสดุ	30
รูปที่ 3.17	การออกแบบโรลเลอร์	30
รูปที่ 3.18	มอเตอร์และชุดคอนโทรล	34
รูปที่ 3.19	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	35
รูปที่ 3.20	สวิทซ์িং เพาเวอร์ ซัพพลาย	35
รูปที่ 3.21	สายไฟเพาเวอร์ซัพพลาย	36
รูปที่ 3.22	โมดูลควบคุมความเร็วมอเตอร์	36
รูปที่ 3.23	สวิตช์โยก 4 ขา	37
รูปที่ 3.24	แสดงไดอแกรมทางวงจรไฟฟ้าของเครื่อง Electrostatic separator	37
รูปที่ 3.25	ชุดควบคุม DC High Voltage Generator	38
รูปที่ 3.26	หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสตรง	39
รูปที่ 3.27	สายตัวต้านทานน้ำ	39
รูปที่ 3.28	Sphere gap	40
รูปที่ 3.29	แผ่นทองแดง	41
รูปที่ 3.30	หลุมกราวด์	41
รูปที่ 3.31	R-C Voltage Divider	42
รูปที่ 3.32	high voltage	43
รูปที่ 3.33	ไม้ค้ายประจุ	43
รูปที่ 3.34	ฉนวนหุ้มสายไฟ	44
รูปที่ 3.35	(a) เม็ดทองแดง และ (b) สายทองแดง	45
รูปที่ 3.36	เม็ดทองเหลือง	45
รูปที่ 3.37	การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า,โคโรนาอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 เซ็ม ที่ 15 กิโลโวลต์	46
รูปที่ 3.38	การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า,โคโรนาอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 เซ็ม ที่ 15 กิโลโวลต์	47
รูปที่ 3.39	รูปแสดงระยะของโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเซ็ม	48
รูปที่ 4.1	เครื่องต้นแบบ Electrical Separation	49
รูปที่ 4.2	แสดงพื้นที่และการติดตั้งการทดลองในภาพรวม	50
รูปที่ 4.3	แสดงการเตรียมการทดลองและบริเวณรั้วศักย์ไฟฟ้าสูง	50

รูปที่ 4.4	ตัวเครื่องพร้อมแผงคอนโทรล	51
รูปที่ 4.5	แสดงการบรรจุเนื้อวัสดุบนภาคลำเสียง	52
รูปที่ 4.6	แสดงภาคตัดแยกวัสดุตามคุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้า A, B, C และ D	53
รูปที่ 4.7	แสดงผลการทดลองที่ 0 กิโลโวลต์ ของฉนวนหุ้มสายไฟ	54
รูปที่ 4.8	แสดงผลการทดลองที่ 0 กิโลโวลต์ ของเม็ดทองแดง	54
รูปที่ 4.9	แสดงผลการทดลองที่ 0 กิโลโวลต์ ของสายไฟทองแดง	54
รูปที่ 4.10	แสดงผลการทดลองที่ 0 กิโลโวลต์ ของทองเหลือง	54
รูปที่ 4.11	แสดงเครื่อง Electrical separation แบบ 1 เข็ม	55
รูปที่ 4.12	แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ	55
รูปที่ 4.13	แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ เม็ดทองแดง	56
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุชนิดเดียว	57
รูปที่ 4.15	แสดงผลการทดลองของวัสดุเนื้อผสมสองชนิด	57
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุผสมสองชนิด	58
รูปที่ 4.17	แสดงผลการทดลองของวัสดุเนื้อผสมสามชนิด	59
รูปที่ 4.18	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุผสมสามชนิด	59
รูปที่ 4.19	แสดงเครื่อง Electrical separation แบบ 3 เข็ม	60
รูปที่ 4.20	แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ	60
รูปที่ 4.21	แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ สายไฟทองแดง	61
รูปที่ 4.22	แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ เม็ดทองแดง	61
รูปที่ 4.23	แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ เม็ดทองเหลือง	61
รูปที่ 4.24	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุชนิดเดียว	62
รูปที่ 4.25	แสดงผลการทดลองของวัสดุเนื้อผสมสองชนิด	63
รูปที่ 4.26	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุผสมสองชนิด	64
รูปที่ 4.27	แสดงผลการทดลองของวัสดุเนื้อผสมสามชนิด	64
รูปที่ 4.28	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุผสมสามชนิด	65
รูปที่ 4.29	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกกระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเข็มแบบ 1 และ 3 เข็ม	66
รูปที่ 4.30	แสดงลักษณะผลของสนามไฟฟ้า Simulation และหัวโคโรน่า 1 เข็มในการทดลอง (b)	67
รูปที่ 4.31	แสดงลักษณะผลของสนามไฟฟ้า Simulation และหัวโคโรน่า 3 เข็มในการทดลอง (b)	67

รูปที่ 4.32 เกิดการช็อตไฟฟ้ากัน ระหว่างตัวโรลเลอร์กับโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์ทรดแบบ1เข็ม	69
รูปที่ 4.33 เกิดการช็อตไฟฟ้ากัน ระหว่างตัวโรลเลอร์บริเวณคียบโรลเลอร์ กับ โคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์ทรด	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะของแบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออน ที่ใช้ในแบตเตอรี่	4
ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของโลหะจำเพาะและแกรไฟต์ ในโมดูลแบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออน ทั่วไป แบบ NCM	5
ตารางที่ 3.1 ค่าการนำไฟฟ้าแร่ธาตุในตัวที่นำมาทดลอง	44
ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 เซ็ม กับเนื้อวัสดุชนิดเดียว	56
ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 เซ็ม กับวัสดุเนื้อผสมสองชนิด	57
ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 เซ็ม กับวัสดุเนื้อผสมสามชนิด	59
ตารางที่ 4.4 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 เซ็ม กับเนื้อวัสดุชนิดเดียว	62
ตารางที่ 4.5 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 เซ็ม กับวัสดุเนื้อผสมสองชนิด	63
ตารางที่ 4.6 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 เซ็ม กับวัสดุเนื้อผสมสามชนิด	65
ตารางที่ 4.7 แสดงการทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุ	68

การก่อกำเนิดปรากฏการณ์โคโรนา (Corona Electrode) ทางคณะผู้จัดทำจึงได้นำหลักการของการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา มาใช้ในการแยกแร่ธาตุที่สำคัญๆ พร้อมทั้งเป็นต้นแบบเพื่อต่อยอดในอนาคตอันใกล้ที่ประเทศเริ่มแพร่หลายทางด้านรถไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับวัสดุที่นำมาตัดแยกที่ใช้ในกระบวนการตัดแยกองค์ประกอบแร่ธาตุในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
2. เพื่อออกแบบโครงสร้างของตัวเครื่องต้นแบบในการตัดแยกให้เหมาะสมกับการตัดแยกวัสดุโดยใช้ Ion Bombardment
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตัดแยกของหัวโคโรนาแบบเข็มทั้งแบบ 1 เข็มและแบบ 3 เข็ม

1.3 สมมติฐาน

1. เครื่องต้นแบบที่สามารถแยกเอา แร่ธาตุที่สำคัญจำเป็นต่อการผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนใหม่ ออกมาได้ซึ่งจะมีแร่ธาตุที่นำไฟฟ้า และไม่นำไฟฟ้า
2. ลักษณะของหัวเข็มโคโรนามีผลต่อความเครียดของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการแยกวัสดุ
3. หัวโคโรนาอิเล็กโทรดแบบหัวเข็มแบบ 3 เข็ม จะทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้ามีการกระจายตัวที่ต่ำกว่า หัวโคโรนาอิเล็กโทรดแบบหัวเข็มแบบ 1 เข็ม

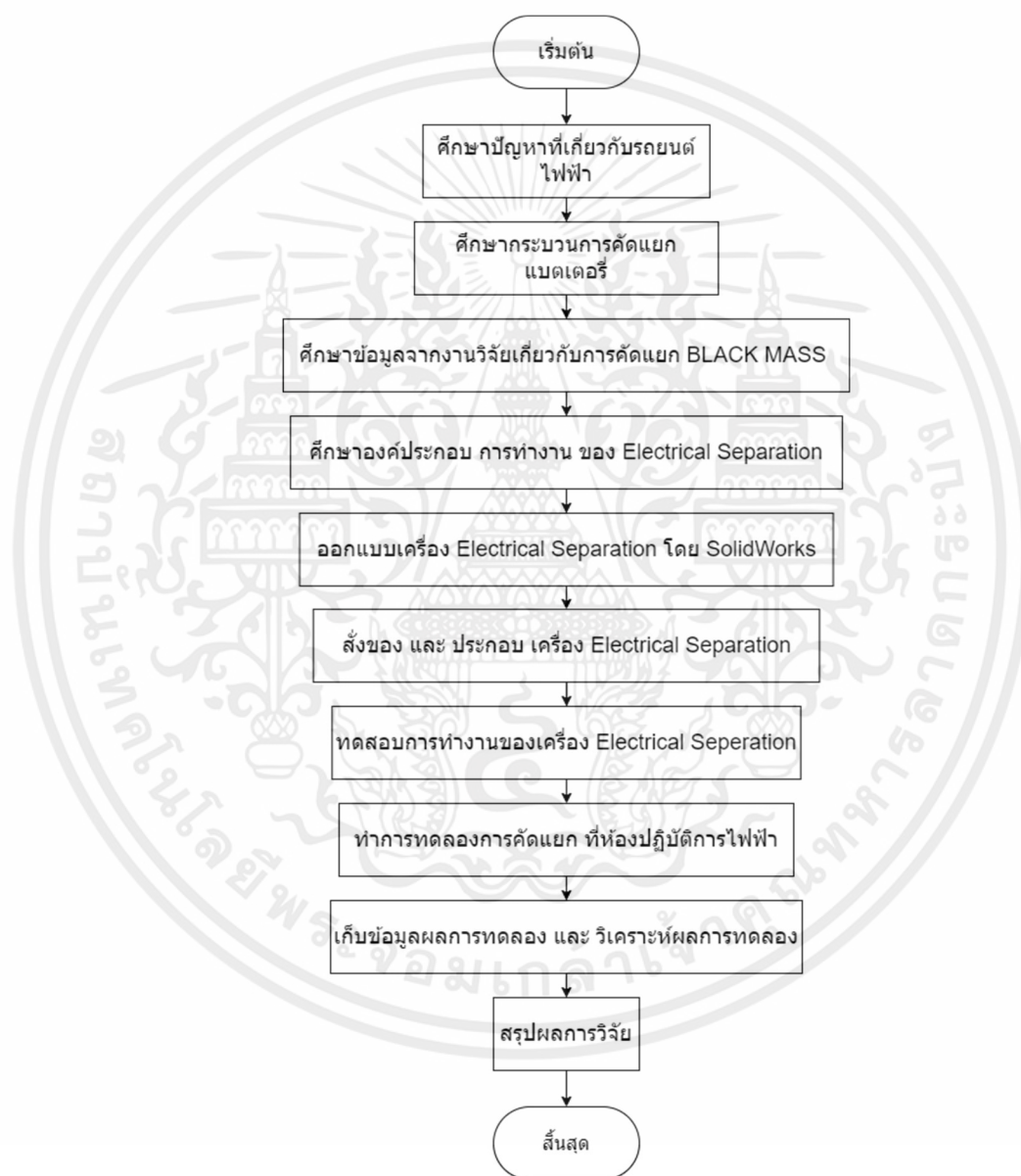
1.4 ขอบเขตการวิจัย

เครื่องต้นแบบสามารถจัดการแยก Black mass ออกมาจากแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน เพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลในขั้นตอนต่อไป ซึ่งทางผู้ทดลองได้ใช้วัสดุตัวอย่างในการทดลองแทนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเพื่อสะดวกต่อการหาของที่มีในท้องตลาดและราคาเหมาะสม และยังแสดงผลการทดสอบแยกแร่ธาตุนำไฟฟ้าได้ดี และ ไม่นำไฟฟ้าออกจากกันได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มต้นโดยการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน และ แร่ธาตุที่สำคัญต่อการนำมาผลิตแบตเตอรี่ใหม่ ศึกษาปรากฏการณ์โคโรนา เพื่อทำเครื่องต้นแบบก่อกำเนิดปรากฏการณ์โคโรนาเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแร่ธาตุทางไฟฟ้าง่ายต่อการตัดแยกโดยการใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต หรือ สร้างไอออน โดยทางคณะผู้จัดทำเลือกประเภทแบบหัวเข็มโคโรนาอิเล็กโทรดโดยจะทดลองทั้ง

แบบ 1 เซ็ม และ 3 เซ็ม และทำการออกแบบเครื่องต้นแบบ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยต่อการทำงานของเครื่องต้นแบบการแยกแร่ธาตุจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอ-ออน ที่นำไฟฟ้า และไม่นำไฟฟ้า ทำการประกอบเครื่องต้นแบบโดยนำส่วนประสำคัญต่างๆประกอบรวมกัน ตามแบบที่เคยร่างไว้ และ ทำการเลือกวัสดุมาทดลองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้า และจดบันทึกค่าต่างๆ พร้อมสรุปผลวิจัยและเสนอแนะการทดลองเพื่อต่อยอดในอนาคต ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 Flow chart แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

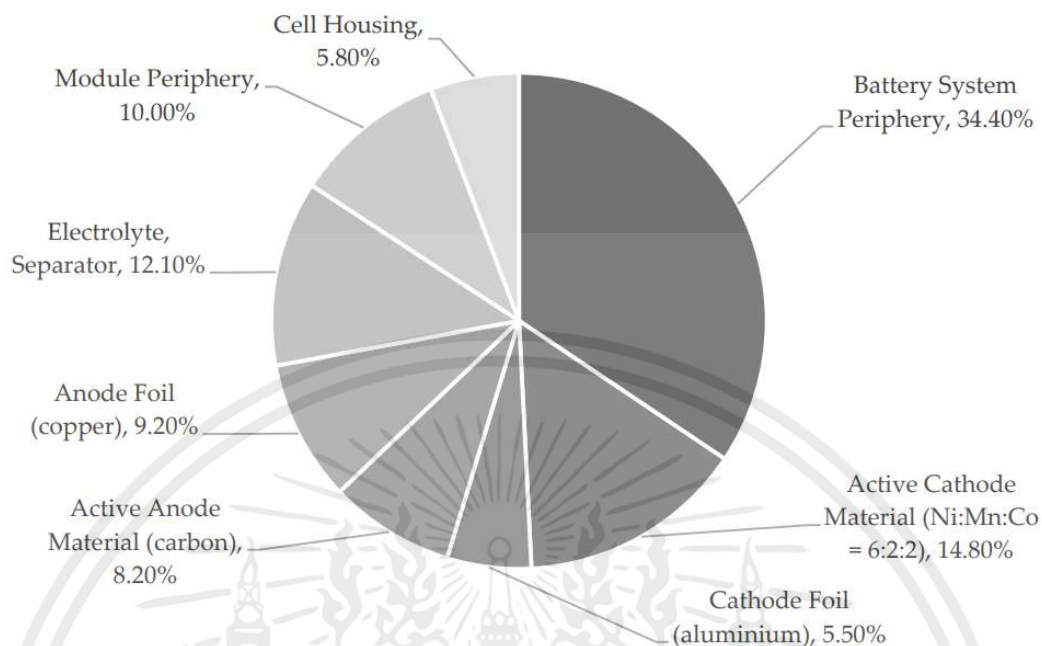
2.1 แบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออน

ถือเป็นเป็นเทคโนโลยีด้านแบตเตอรี่ ที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายตั้งแต่ได้มีการเริ่มใช้มา และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างมากมาย อย่างแรกที่แบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออน ได้นำไปประยุกต์ใช้ก็คือ แบตเตอรี่สำหรับโทรศัพท์ และโน้ตบุ๊กแล็ปท็อป ต่างๆ และยังตามด้วย อุปกรณ์ไฟฟ้า และรถยนต์ไฟฟ้า ต่างๆ ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออนได้เข้ามามีตลาดสำหรับตัวเก็บประจุ และในรถไฟฟาส่วนใหญ่ ตารางที่ 2.1 ลักษณะของแบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออน ที่ใช้ในแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า(BEV) , รถยนต์ไฮบริด (PHEV) , จักรยานไฟฟ้า(Pedelecs) และโทรศัพท์มือถือหรือสมาร์ทโฟน(Smartphone) [1], [2], [3], [4]

Characteristic	BEV	PHEV	Pedelecs	Smart Phone
Voltage U [V]	355 – 800	351	22.2 – 36	3.7
Capacity C [Ah]	60 – 117	26 – 34	8 – 10	0.7 – 1.2
Energy E [Wh]	21,000 -93,000	9,000 – 12,000	189 – 288	2.4 – 4.1
Mass m [kg]	235 – 680	80 – 135	1.3 – 4	0.021 – 0.038

แบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออน ต้องมีจัดการวางระบบ เซลล์ และ โมดูลของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะ ต้องการระบบจัดการอุณหภูมิ การออกแบบแบตเตอรี่จะแตกต่างกันไปในแต่ละบริษัท และยังแตกต่างกันไปตามขอบเขตของการใช้งานแบตเตอรี่ [1,5-7]

ถึงแม้ว่าการใช้งาน แบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย และ การออกแบบแตกต่างกันออกไปสำหรับตัว เซลล์ โมดูลแบตเตอรี่ และ ระบบ แต่องค์ประกอบต่างๆของ แบตเตอรี่ลิเธียมไอ-ออน ทางเคมียังมีความคล้ายกัน องค์ประกอบแร่ธาตุทั่วไปของระบบแบตเตอรี่แสดงไว้ใน รูปที่ 2.1 [8] และในตารางที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของโลหะที่สนใจ และกราฟสำหรับการรีไซเคิล โมดูลแบตเตอรี่



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบทั่วไปของระบบแบตเตอรี่ และแบ่งสัดส่วนของแบตเตอรี่ตามข้อมูล [8]

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของโลหะจำเพาะและแกรไฟต์ ในโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอ-ออน ทั่วไป แบบ NCM ($LiNi_xMn_yCo_zO_2$) [9]

Elemental	Fraction [%]	Origin
Al (<i>Aluminium</i>)	25.2	Cell and module case, cathode current collector
C (<i>Carbon</i>)	12.5	Anode active material
Co (<i>Cobalt</i>)	2.7	Cathode active material with Co (2.7%), Mn (2.7%), and Ni (8.2%)
Mn (<i>Manganese</i>)	2.7	
Ni (<i>Nickel</i>)	8.2	
Cu (<i>Copper</i>)	14.0	Cables, anode current collector
Li (<i>Lithium</i>)	1.5	Cathode active material, conducting salt

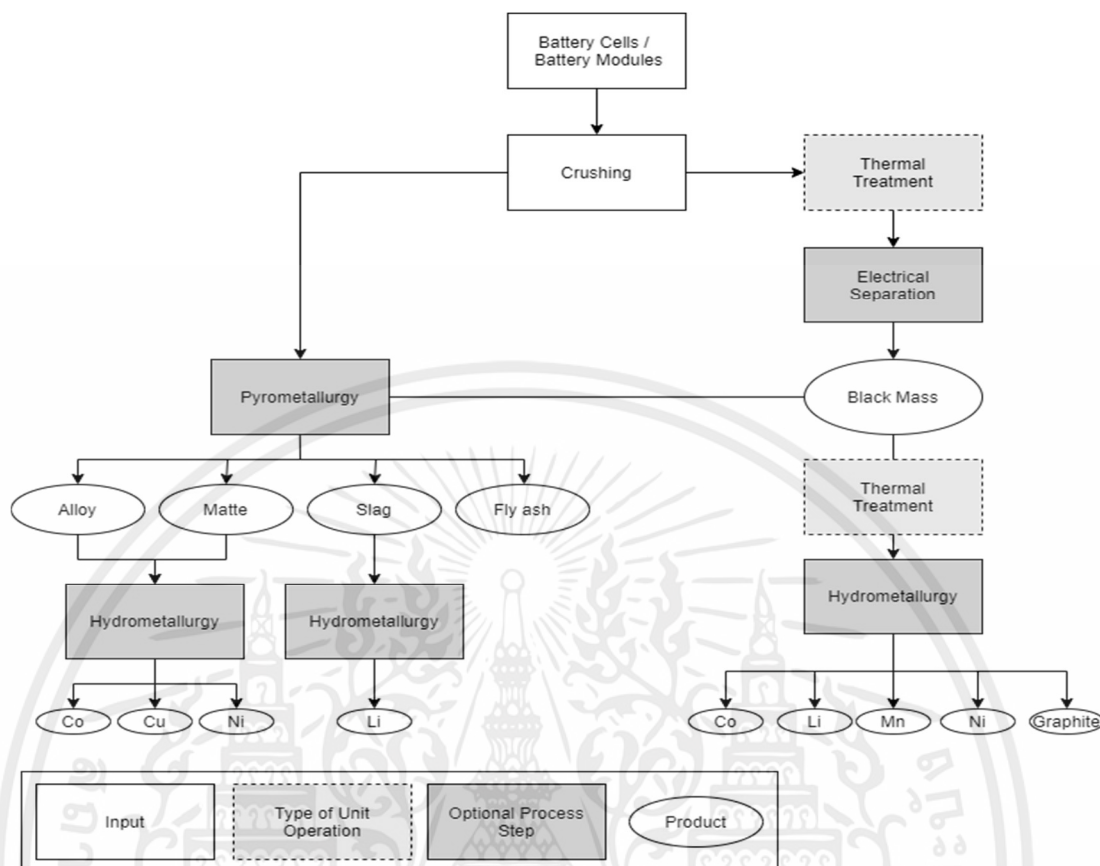
2.1.1 มวลสีดำ (Black mass)

คือสิ่งที่ได้มาจากการรีไซเคิลแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ประกอบไปด้วยโลหะชนิดๆต่างๆ ได้แก่ ลิเทียม แมงกานีส โคบอลต์ และนิกเกิล เมื่อแบตเตอรี่หมดอายุในการใช้งาน จะมีการเก็บรวบรวม และนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล จากนั้นการแยกเราจะได้ผลผลิตออกมาเป็น “มวลสีดำ” ซึ่งประกอบไปด้วยโลหะเหล่านี้ในปริมาณมาก และวัสดุเหล่านี้จะถูกสกัดออกมาและนำกลับมาใช้ใหม่ในการผลิตแบตเตอรี่

2.2 กระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

องค์ประกอบแร่ธาตุปัจจุบันของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และการพัฒนาในอนาคตที่เป็นไปได้ จากมุมมองของการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ความท้าทายหลักมาจากองค์ประกอบแร่ธาตุของวัสดุต่างในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่ซับซ้อนรวมถึงฮาโลเจนและสารประกอบอินทรีย์ตลอดจนปริมาณพลังงานสูงและในทางกลับกันจากข้อกำหนดเกี่ยวกับอัตราการรีไซเคิลที่สูง สุขภาพ, ความปลอดภัย, สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์ ส่งผลให้มีสายโซ่กระบวนการที่ค่อนข้างยาวและซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่รุ่นก่อนๆ มีการพัฒนากระบวนการรีไซเคิลที่แตกต่างกันหลายอย่าง ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นสองเส้นทางกระบวนการทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กระบวนการกลุ่มแรก จะเริ่มด้วยการบดโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน หลังจากนั้น โลหวิทยาความร้อนสูง(Pyrometallurgy) ต่อด้วย โลหวิทยาการละลาย(Hydrometallurgy) และกลุ่มที่สองประกอบด้วย การเริ่มบดโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จากนั้นบำบัดทางความร้อน(Thermal Treatment) ตามด้วย การแยกแบบไฟฟ้า(Electrical Separation) ก่อนกระบวนการโลหวิทยาการละลาย(Hydrometallurgy)

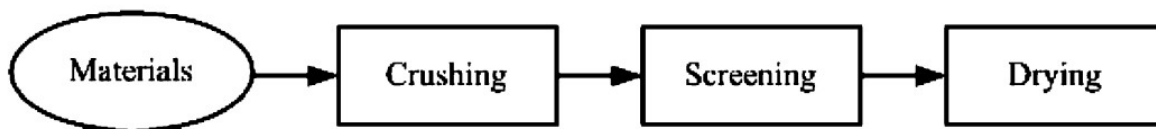
ในกระบวนการกลุ่มที่สองเส้นทางฝั่งขวาของรูปที่ 2.2 จะได้รับการบำบัดด้วยกระบวนการต่างๆ หลายครั้ง หลังจากขั้นตอนการบำบัดด้วยความร้อนแล้วจะเข้าสู่กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าโดยผลิตภัณฑ์ทั่วไปของกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้า ได้แก่ สารเข้มข้นจากโลหะและอโลหะ ซึ่งรวมถึงสารเข้มข้น Al และ Cu ตลอดจนเศษส่วนที่มีวัสดุอิเล็กทรอนิกส์แบบแอคทีฟ ซึ่งเรียกว่ามวลสีดำ(Black Mass) มวลสีดำถูกบดและเข้าสู่กระบวนการโลหวิทยาความร้อนสูง(Pyrometallurgy) หรือบำบัดโดยตรงในกระบวนการโลหวิทยาการละลาย(Hydrometallurgy) ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบกระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยรวม มวลสีดำต้องการการบำบัดด้วยความร้อนก่อนการทำไฮโดรเมทัลโลยีเพื่อขจัดส่วนประกอบอินทรีย์และเพื่อให้เนื้อหาโลหะเข้มข้น ในกระบวนการไฮโดรโลหะวิทยา Co, Li, Mn, Ni และหากจำเป็นเราสามารถกู้คือกราไฟต์ได้ด้วย



รูปที่ 2.2 เส้นทางของความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน[19]

2.3 ELECTRICAL SEPARATION

การแยกแบบไฟฟ้าเราสามารถใช้ประโยชน์ได้จากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าระหว่างแร่ธาตุต่างๆ ในธาตุสารประกอบในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากแร่ธาตุต่างภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แสดงความแตกต่างในการนำไฟฟ้า และก่อนการเข้ากระบวนการแยกแบบไฟฟ้า จึงต้องเตรียมความพร้อมก่อน คัดแยกแร่ธาตุโดย การบด คัดแยก และการทำให้แห้งทั้งหมดที่แสดงในรูปที่ 2.3 เปลี่ยนโมดูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ให้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเป็นเนื้อเดียวกัน แร่ธาตุ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ประกอบด้วยโลหะได้แก่ อลูมิเนียม, คาร์บอน, ลิเทียม, นิกเกิล, แมงกานีส, ทองแดง และ โคบอลต์ เป็นต้น เนื่องจากมีความแข็งและความเหนียวที่สูง เครื่องบดทั่วไปจึงไม่สามารถบดออกมาอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.3 จัดอันดับขั้นตอนเตรียมความพร้อมก่อนเข้ากระบวนการแยกแบบไฟฟ้าสถิต

เพื่อใช้ประโยชน์จากแรงอิเล็กโตรโฟเรติก (The Electrophoretic Force) จำเป็นต้องมีขั้นตอนการเตรียมความพร้อมก่อนการแยกในเครื่องแยกไฟฟ้าทั้งหมด การพัฒนาแบบคัดเลือกของประจุบนอนุภาคแร่ธาตุจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของการนำไฟฟ้าระหว่างแร่ธาตุ เนื่องจากการนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นผิวของอะตอมแร่ธาตุนั้นๆ [11] การแยกทางไฟฟ้าอาจถือได้ว่าเป็นการแยกตามพื้นผิวของแร่ธาตุ คล้ายกับการลอยตัว แต่แตกต่างและตรงข้ามกับการแยกแม่เหล็กและแรงโน้มถ่วงซึ่งอาศัยความแตกต่างในสมบัติจำนวนมาก (ความไวแม่เหล็ก, ความถ่วงจำเพาะ) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติวิธีการค่อนข้างจำกัดเนื่องด้วยความต้องการกระบวนการที่เป็นไปตามเงื่อนไข (โดยเฉพาะอย่างยิ่งการป้อนแบบสมบูรณ) และประโยชน์สูงสุดคือในการคัดแยกแร่บางชนิดที่พบในทรายหนักจากแหล่งชายหาดหรือลำธาร [11] การแยกทางไฟฟ้ายังได้รับผลกระทบจากข้อเสียที่คล้ายกันกับการแยกด้วยแม่เหล็กแบบแห้ง ซึ่งอนุภาคมีขนาดเล็กมากสำหรับวัสดุที่แยกอย่างละเอียด สำหรับการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดป้อนไปยังตัวแยกไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงอยู่ในขั้นแรกในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กซึ่งจะลดปริมาณงานลงถ้าขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็ก ($< 75 \mu\text{m}$)

มีแรงที่แตกต่างกันสองอย่างที่อาจพิจารณาได้ในบริบทของการแยกทางไฟฟ้า แรงอิเล็กโตรโฟเรติก (The Electrophoretic Force) คือแรงที่อนุภาคมีประจุภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก (The Dielectrophoretic Force) คือแรงที่อนุภาคเป็นกลางในของไหลเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ไม่เป็นระเบียบ แรงไดอิเล็กโตรโฟเรติกค่อนข้างคล้ายแม่เหล็กที่อาศัยการโพลาริซของอนุภาคเป็นกลางเป็นไดโพลไฟฟ้าและประยุกต์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ การใช้ไดอิเล็กโตรโฟเรซิสโดยเจตนาแทบไม่มีอยู่ในกระบวนการผลิตแร่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากแรงอิเล็กโตรโฟเรติกนั้นแข็งแกร่งกว่ามาก [12]

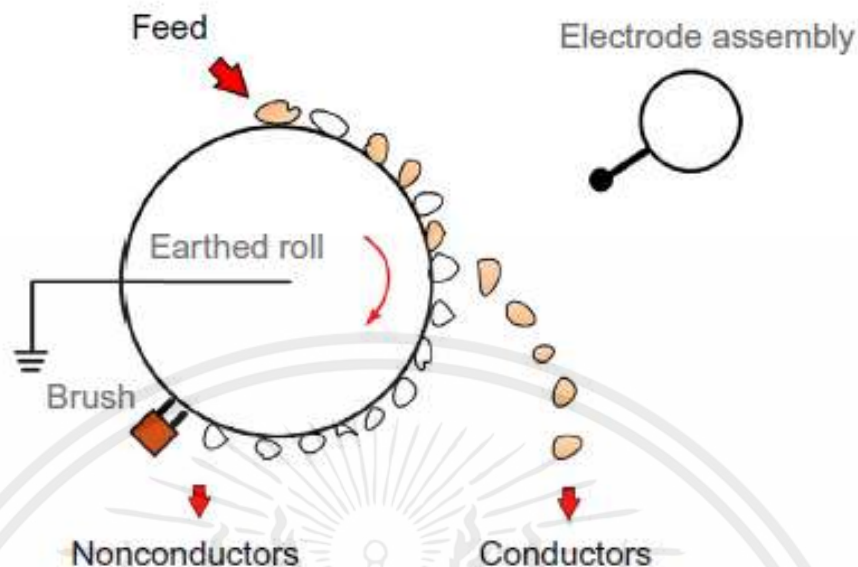
กลไกหลักสามประการซึ่งแร่ธาตุถูกชาร์จ: การชาร์จโคโรนา (Ion bombardment), การนำไฟฟ้าการเหนี่ยวนำและการชาร์จแบบเสียดทาน (tribocharging or contact electrification) แต่ละกลไกทั้งสามนี้มีประเภทตัวคั่นที่สอดคล้องกันมีรายละเอียดซึ่งอธิบายไว้ในส่วนต่อไป นี้ เพื่อที่จะได้เข้าใจ

วิธีการแยกทางไฟฟ้า ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ต้องการ ข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้อง แนวความคิดเช่นเดียวกับการแปรรูปแร่พร้อมคำอธิบายโดยละเอียดของเครื่องแยกตามอุตสาหกรรมหลายตัวสามารถพบได้ในบทความที่มีเนื้อหาครอบคลุมโดย [13] , [14]

2.3.1 Ion Bombardment

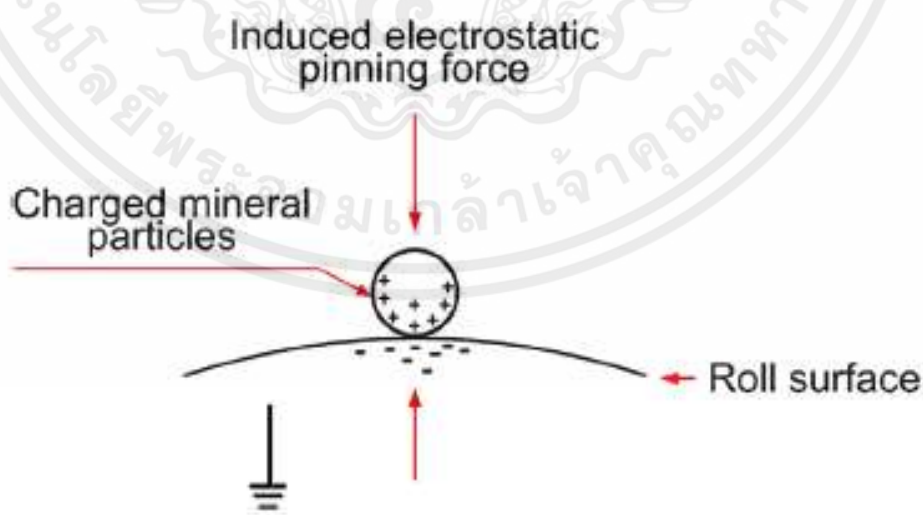
การชาร์จด้วยการทิ้งระเบิดด้วยไอออน จะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ไฟฟ้าแรงสูงระหว่างอิเล็กโทรดสองขั้ว เพื่อให้อากาศที่อยู่ใกล้รอบๆอิเล็กโทรดแตกตัวเป็นไอออนและ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนา และเกิดการปลดปล่อยโคโรนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการไหลอย่างต่อเนื่องของไอออนของอากาศส่งผลให้อุณหภูมิที่ผ่านการปล่อยโคโรนาจะ ระเบิดด้วยการไหลของไอออนและพัฒนาไปเป็นประจุ กระบวนการชาร์จใช้ประจุที่คล้ายกันถูกนำมาใช้ในเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการกำจัดอนุภาค ละเอียดออกจากกระแสอากาศที่ไหล ในการใช้งานการแยกแร่ธาตุ ค่าการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันของ อนุภาคแร่ธาตุที่มีประจุจะส่งผลให้อัตราการสลายประจุแตกต่างกันและจะแตกต่างกันตามคุณสมบัติการ นำไฟฟ้าตามแรงที่อนุภาคสัมผัส

เครื่องแยกทั่วไปที่อาศัยการชาร์จโคโรนาคือ High-tension roll (HTR) (รูปที่ 2.4) ในการป้อน ซึ่งเป็นส่วนผสมของแร่ที่แตกต่างกันความไวต่อการชาร์จที่พื้นผิวถูกป้อนเข้าสู่การหมุน โดยโรลเลอร์ทำ จากเหล็กอ่อนหรือสื่อนำอื่นๆ ซึ่งมีการต่อสายดินผ่านตลับลูกปืนรองรับการประกอบอิเล็กโทรด ประกอบด้วยท่อทองเหลืองอยู่ด้านหน้าซึ่งรองรับความยาวของลวดขนาดเล็กซึ่งครอบคลุมความยาวผ่าน โรลเลอร์ที่สมบูรณ์และมาพร้อมกับการจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงที่ประมาณไม่เกิน 50 kV โดยปกติเป็นขั้วลบ อิเล็กโทรดทั้งสองนี้ทำงานร่วมกันเพื่อสร้างการคายประจุไฟฟ้าแรงสูงที่มีความหนาแน่นสูง ลวด ละเอียดมีแนวโน้มที่จะคายประจุได้อย่างง่ายดายในขณะที่อิเล็กโทรดขนาดใหญ่มักจะมีสนามระยะสั้น หนาแน่นไม่มีการคายประจุ การสร้างรูปแบบการปลดปล่อยที่แข็งแกร่งที่อาจ “ฉายแสง” ไปในทิศทางที่ แน่นอนและจดจ่ออยู่ที่ส่วนโค้งที่แคบมาก แรงดันไฟฟ้าที่ให้มาควรเป็นเช่นนั้น ไอออนไนซ์ของอากาศ เกิดขึ้น อาร์ค (Arc) ระหว่างอิเล็กโทรดและต้องหลีกเลี่ยงการม้วนเนื่องจากสิ่งนี้จะทำลายไอออนไนซ์



รูปที่ 2.4 ไดอแกรมของเครื่องแยก HTR [17]

เมื่อเกิดการแตกตัวเป็นไอออนอนุภาคแร่จะได้รับการปล่อยไอออนแบบสเปรย์ซึ่งทำให้อนุภาคทั้งหมดในสนามโคโรนามีประจุที่พื้นผิวในขณะที่โรเตอร์ HTR หมุนและอนุภาคถูกเคลื่อนย้ายออกนอกเขตโคโรนา อนุภาคนำไฟฟ้าอ่อนๆรักษาพื้นผิวที่สูง ประจุทำให้ถูกดึงดูดและตรึงอยู่กับโรเตอร์นี้มักจะเรียกว่าการปักหมุดโดยแรงจลนภาพดังรูปที่ 2.5 และอาจอธิบายได้โดยอนุภาคแร่ที่มีประจุทำให้เกิดประจุตรงข้ามเชื่อมต่อกับโรเตอร์ [11] อนุภาคที่ถูกตรึงจะถูกปล่อยออกจากพื้นผิวโรเตอร์ทั้งผ่านการสลายตัวในที่สุดของประจุที่พื้นผิวหรือทางกลไกโดยใช้แปรง



รูปที่ 2.5 แสดงถึงแรงตรึงของอนุภาคที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำในเครื่องแยก HTR [17]

อนุภาคที่มีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูงจะสูญเสียพื้นผิวประจุเมื่อประจุจะสลายไปอย่างรวดเร็วลงสู่พื้นดินผ่านโรเตอร์พร้อมกับแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานแล้วสามารถโยนอนุภาคเหล่านี้จากโรเตอร์และค่อนข้างห่างจากอนุภาคที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่ยังคงตรึงไว้เพื่อให้สองขั้วของอนุภาคสามารถแยกเก็บได้ผ่านการใช้ตัวแยก การแยกสามารถปรับให้เหมาะสมโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของอิเล็กโทรดและโรเตอร์ อย่างไรก็ตามการทำนายวิถีของอนุภาคจากตัวแยก HTR มีความท้าทายอย่างที่ [15] ได้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคอย่าเร่งความเร็วของโรเตอร์ในทันทีเนื่องจากจะเกิดการไถลบนพื้นผิวโรเตอร์

การใช้เครื่องแยก HTR ในอุตสาหกรรมหลักอยู่ในการแปรรูปทรายแร่หนัก [11] การใช้งานอื่นๆ ได้แก่ การทำความสะอาดถ่านหิน [16] และการรีไซเคิลโลหะจากขยะพลาสติก [22] ตารางที่ 2.3 แสดงแร่ธาตุทั่วไปซึ่งเป็นวัสดุที่ติดหรือถูกโยนออกจากโรเตอร์ระหว่างการแยก HTR

ตารางที่ 2.3 ค่าการนำไฟฟ้าและพฤติกรรมทั่วไปของแร่ธาตุในตัวแยกแรงดันสูง [17]

แร่ธาตุที่ไม่นำไฟฟ้า (ตรึงกับ โรลเลอร์)	แร่ธาตุที่นำไฟฟ้า (กระเด็นออกจาก โรลเลอร์)
Apatite	Cassiterite
Barite	Chromite
Calcite	Diamond
Coal	Feldspar
Corundum	Galena
Garnet	Gold
Gypsum	Hematite
Kyanite	Ilmenite
Monazite	Limonite
Quartz	Magnetite
Scheelite	Pyrite
Sillimonite	Rutile
Spinel	Sphalerite
Tourmaline	Stibnite
Zircon	Tantalite
	Wolframite

สามารถสร้างได้ทั้งการปกคลุมและการยกขึ้นโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์”สถิต” ตัวที่สามตามหลังโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่พอที่จะกีดขวางการปล่อยโคโรนา อนุภาคนำไฟฟ้าถูกโยนออกจากโรเตอร์ และยังจะถูกดึงดูดไปยังอิเล็กทรอนิกส์สถิต และกระบวนการรวมกันทำให้เกิดความกว้างขวางมากและการแยกอนุภาคนำไฟฟ้า (ยกขึ้นจากพื้นผิวโรเตอร์) และอนุภาคที่ไม่นำไฟฟ้าอย่างชัดเจน(ตรึงไว้กับพื้นผิวโรเตอร์)

เครื่องแยกแรงสูงทำงานบนฟิวดที่มีขนาดอนุภาค 60-500 ไมครอน ขนาดของอนุภาคมีผลต่อพฤติกรรมของการแยกเช่น ประจุที่พื้นผิวบนอนุภาคมีความหยาบมีความสัมพันธ์กับมวลต่ำกว่าอนุภาคละเอียด ดังนั้นอนุภาคที่หยาบจะถูกโยนออกจากโรเตอร์ได้ง่ายขึ้นจากพื้นผิวโรเตอร์และเศษตัวนำ (อนุภาคที่ถูกโยนจากโรเตอร์) มักจะมีสัดส่วนหยาบเล็กน้อยไม่นำไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันยิ่งอนุภาคละเอียดยิ่งมากพวกมันได้รับอิทธิพลจากประจุที่พื้นผิวและสิ่งที่ไม่นำไฟฟ้าเศษส่วนมักมีตัวนำไฟฟ้าที่ดีอยู่บ้าง อนุภาคอาจมีการปนกันด้วยในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเหวี่ยง แรงบนอนุภาคและแรงแรงจลนภาพที่กระทำเพื่อตรึงอนุภาคที่มีประจุไปยังพื้นผิวที่ต่อลงดิน แรงเหวี่ยง แรงแปรผันตามมวลอนุภาค ในขณะที่แรงจลนภาพแปรผันกับพื้นที่ผิว (เนื่องจากมีประจุสะสมอยู่บนอนุภาคพื้นผิว) ดังนั้นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะมีส่วนสำคัญอย่างมากในขนาดของอนุภาคหยาบ [11], [18]

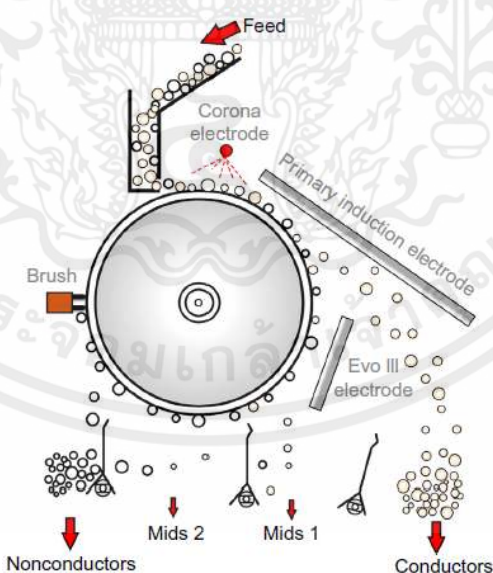
ปัจจัยบางอย่างของเครื่องแยกที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องแยก HTR ประกอบด้วย : รูปทรงของชุดอิเล็กทรอนิกส์แรงดันและขั้วของอิเล็กทรอนิกส์, ความเร็วของโรเตอร์, เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์และตำแหน่งของตัวแยก เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ที่ใหญ่ขึ้นช่วยเพิ่มการคืนตัวในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ที่เล็กกว่าจะช่วยเพิ่มเกรดของวัสดุตัวนำ การพึ่งพาอาศัยที่คล้ายกันนี้สำหรับความหนาแน่นของอนุภาค ความเร็วของโรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวโรเตอร์เพื่อให้เลือกการแยกสารสูงสุดที่อนุภาคความหนาแน่นต่ำ เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ขนาดเล็ก ความเร็วของโรเตอร์สูงและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน[18.1] ผลกระทบของโรเตอร์ความเร็วในการแยกมีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับการนำไฟฟ้าของอนุภาคที่กำหนด การกระทำเพื่อเพิ่มความเร็วของโรเตอร์จะลดเวลาที่ใช้สำหรับการสลายตัวของประจุ ด้วยวิธีนี้ความเร็วของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มโอกาสที่อนุภาคนำไฟฟ้าจะปนกับอนุภาคที่ไม่นำไฟฟ้าในขณะที่ความเร็วโรเตอร์จะเพิ่มแรงเหวี่ยงบนอนุภาคที่ไม่นำไฟฟ้าจนมีแนวโน้มที่อนุภาคนำไฟฟ้าจะผลักรังที่ไม่ถูกต้อง กล่าวอีกนัยหนึ่งการเพิ่มความเร็วของโรเตอร์พร้อมกันจะเพิ่มขนาดอนุภาคขั้นต่ำซึ่งจำเป็นสำหรับอนุภาคนำไฟฟ้าที่จะโยนออกจากโรเตอร์ในขณะที่ลดขนาดอนุภาคที่ไม่นำไฟฟ้าสูงสุดจะติดอยู่กับโรเตอร์

ในขณะที่การแยก HTR ใช้ประโยชน์จากความแตกต่างเป็นหลักในการนำไฟฟ้าระหว่างอนุภาคอย่างเท่าเทียมกัน เกณฑ์สำคัญสำหรับการดำเนินงานที่ประสบความสำเร็จคือการมีอยู่ของอนุภาคนำไฟฟ้าอย่างน้อยหนึ่งอย่าง (บนพื้นฐานที่แน่นอน) ชนิดของอนุภาคในการแยกที่มีความแตกต่างอย่างมาก

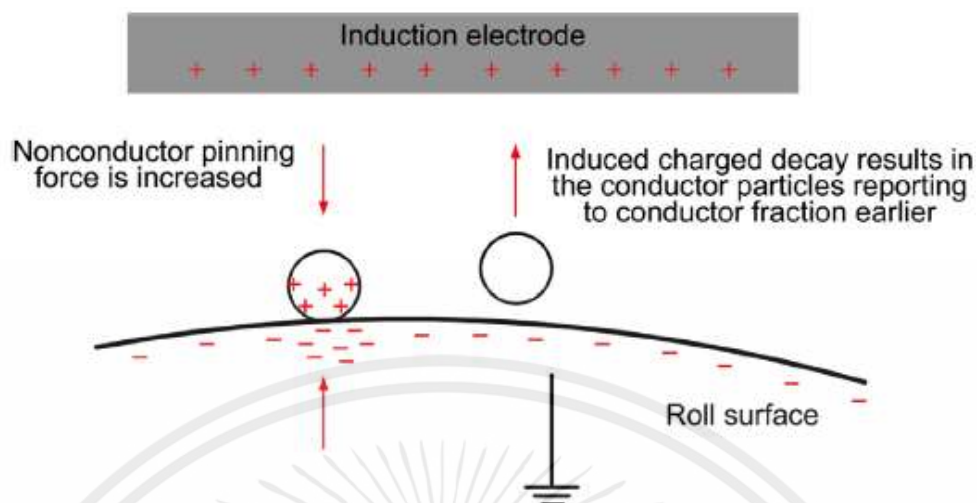
ในการนำ(ขึ้นอยู่กับลำดับความสำคัญ) จะไม่ส่งผลให้การแยกตัวที่ชัดเจนหากอนุภาคทั้งสองเป็นตัวนำที่ต่ำ ในทางกลับกันสามารถแยกอนุภาคนำไฟฟ้าแรงสูงสองชนิดออกได้โดยมีค่าการนำไฟฟ้าต่างกันเพียงเล็กน้อย

เครื่องแยก HTR เป็นหนึ่งในแกนนำของอุตสาหกรรมเหมืองแร่มานานหลายทศวรรษ มีพัฒนาการน้อยมากของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นในสมัยนั้นโดยทั่วไปแล้วการแยกแบบ single pass ที่ไม่ดีนั้นได้รับการยอมรับและเอาชนะได้โดยใช้เครื่องหลายเครื่องและหลากหลายไซเคิลสตรีม อย่างไรก็ตามในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมานวัตกรรมใหม่เริ่มมีให้เห็นแล้วทั้งแบบใหม่และแบบผู้ผลิตที่จัดตั้งขึ้น Roche Mining (MT) มีพัฒนาเครื่องแยก Carara HTR ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กโทรดสัณฐานแบบแผ่นหุ้มฉนวนเพิ่มเติมเพื่อช่วยเบี่ยงเบนเส้นทางของอนุภาคนำไฟฟ้าที่โยนออกจาก [20] Outokumpu Technology พัฒนาตัวแยก eForce HTR ซึ่งรวมถึงอิเล็กโทรดเพิ่มเติมเช่นเดียวกับไฟฟ้าสถิตตัวแยกประเภทฟีด [21]

OreKinetics ได้เปิดตัว CoronaStat เครื่องใหม่ดังรูป 2.6 ซึ่งเป็นการปรับปรุงที่สำคัญในการออกแบบ HTR ที่มีอยู่อย่างต่อเนื่องจากการใช้งานเพิ่มเติมอิเล็กโทรดแบบสัณฐานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแยกอิเล็กโทรดสัณฐานไม่เหมือนเครื่องจักรที่มีอยู่เปิดเผยทำให้เครื่องปลอดภัยยิ่งขึ้นในการใช้งาน การปรับปรุงที่สำคัญในการออกแบบ CoronaStat เมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิมตัวแยก HTR คือการมีอิเล็กโทรดเหนียวนำซึ่งเพิ่มแรงปกคลุมพร้อมกันกับอนุภาคที่ไม่นำไฟฟ้าและเพิ่มอัตราการสลายประจุของอนุภาคนำไฟฟ้างดรูปที่ 2.7 ผลลัพธ์นี้ในระยะห่างที่มากขึ้นระหว่างอนุภาคทั้งสองกับอากาศและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกได้



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมของเครื่องแยก CoronaStat separator [17]



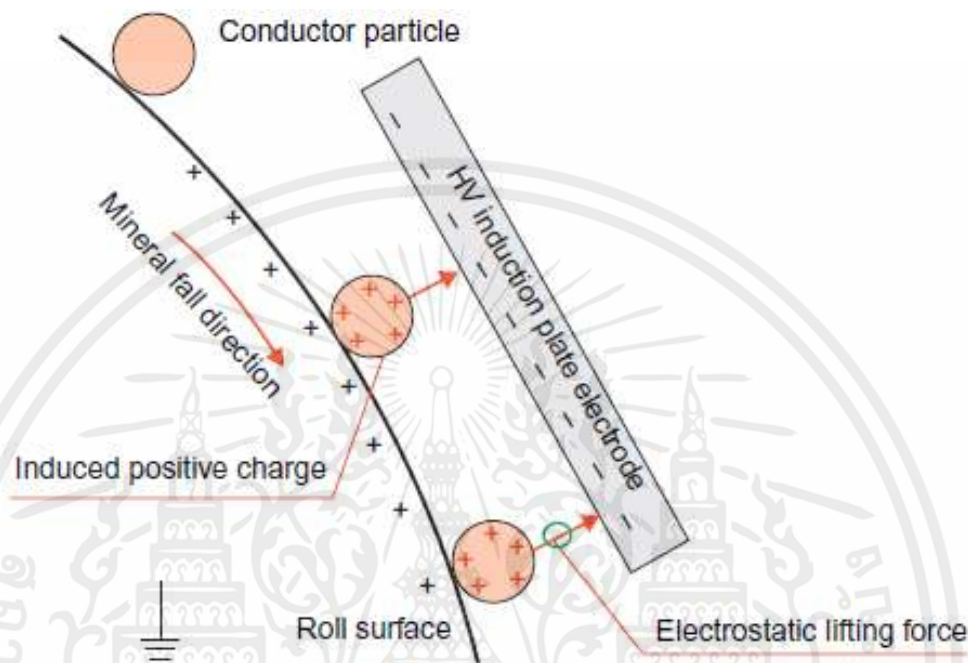
รูปที่ 2.7 แสดงผลของอิเล็กโทรดเหนี่ยวนำใน CoronaStat separator [17]

2.3.2 Conductive Induction

กลไกการชาร์จแบบที่สองที่ใช้ในการแยกทางไฟฟ้าซึ่งโพลาริเซชันของอนุภาคเกิดขึ้นเมื่อสัมผัสกับสนามไฟฟ้าคล้ายกับการสลายตัวของประจุในตัวแยก HTR ความสามารถของอนุภาคเพื่อตอบสนองต่อโพลาริเซชันที่เหนี่ยวนำนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการนำไฟฟ้า โพลาริเซชันส่งผลให้อนุภาคที่ไม่มีประจุพัฒนาตรงกันข้ามประจุเทียบกับอิเล็กโทรดที่สร้างสนามไฟฟ้าที่พื้นผิวใกล้กับอิเล็กโทรดมากที่สุดและที่สอดคล้องกันเหมือนประจุที่อิเล็กโทรดบนพื้นผิวอนุภาคไกลที่สุดจากอิเล็กโทรด อนุภาคนำไฟฟ้าสามารถกระจายตัวได้ประจุเหนี่ยวนำเหล่านี้ทั่วพื้นผิวอนุภาคในขณะที่อนุภาคที่ไม่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าไม่สามารถแจกจ่ายไปได้ แรงทางไฟฟ้าหนึ่งแรงบนอนุภาคโพลาริเซชันก็คือฟังก์ชันพหุนามชนิดหนึ่งซึ่งคือการโพลาริเซชันซึ่งก็ได้รับผลกระทบจากทั้งขนาดและรูปร่างของอนุภาค [14] เมื่ออนุภาคโพลาริเซชันสัมผัสกับพื้นผิวที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าอาจนำประจุหนึ่งชั่วขณะสู่พื้นผิว ทั้งไว้แค่ประจุสุทธิบนอนุภาคในสถานการณ์เช่นนี้คืออนุภาคไม่นำไฟฟ้า (ไม่มีการชาร์จประจุ) จะพบว่าไม่มีแรงดึงดูดจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่อนุภาคนำไฟฟ้าจะถูกดึงดูดไปในทางตรงกันข้ามกับอิเล็กโทรดที่มีประจุ [13] การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าจึงสามารถคิดได้ว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่ประจุถูกเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่อนุภาคไม่มีประจุ โดยปล่อยให้อนุภาคที่ไม่นำไฟฟ้าไม่มีการชาร์จประจุ การแสดงกราฟิกของสื่อกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจแสดงได้ในรูปที่ 2.8

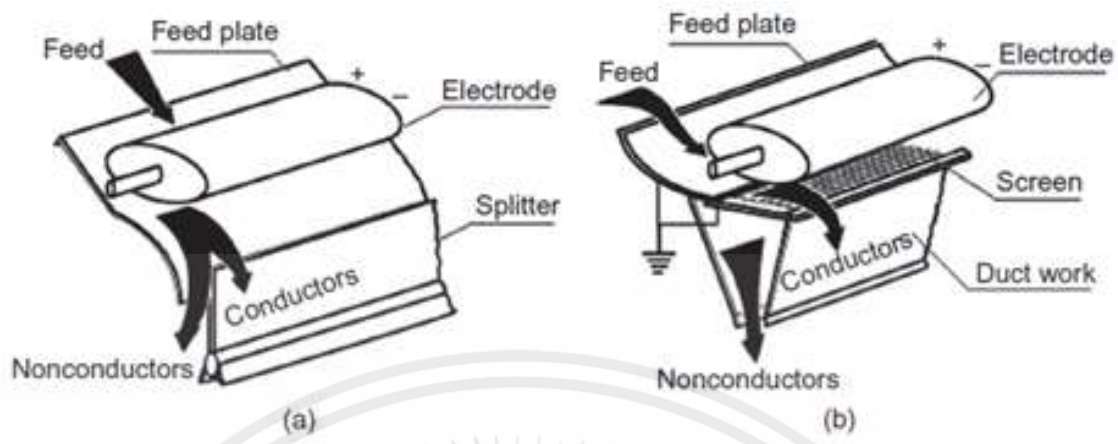
ตัวแยกที่ใช้ประโยชน์จากกลไกการชาร์จนี้คือมักใช้เพื่อแยกอนุภาคนำไฟฟ้าสูงจากอนุภาคนำไฟฟ้าอ่อนๆและใช้อิเล็กโทรดสถิตเพื่อ “ยก” อนุภาคนำไฟฟ้าที่มีประจุจากพื้นผิวที่ต่อลงดินในขณะที่อนุภาคที่ไม่นำไฟฟ้ายังคงอยู่ตรึงไว้กับพื้นผิวโรเตอร์ กระบวนการแยกดังกล่าวที่พบบ่อยที่สุดเป็นเครื่องแยกแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic plate, ESP) ในเครื่องแยก ESP วัสดุเป็นแรงโน้มถ่วงที่ป้อนผ่าน

ตัวเครื่องและแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุจะทำหน้าที่ต้านแรงของแรงโน้มถ่วง ตรงกันข้ามกับเครื่องแยกแบบ HTR อนุภาคหยาบจะมีแนวโน้มที่จะมีรายงานว่ามิเศษที่ไม่นำไฟฟ้าไปปนอยู่ ซึ่งเหตุผลของการคัดแยกชั้นตอนสุดท้ายของเครื่องแยกแบบ HTR จึงมักเป็นการใช้เครื่องแยกแบบไฟฟ้าสถิต



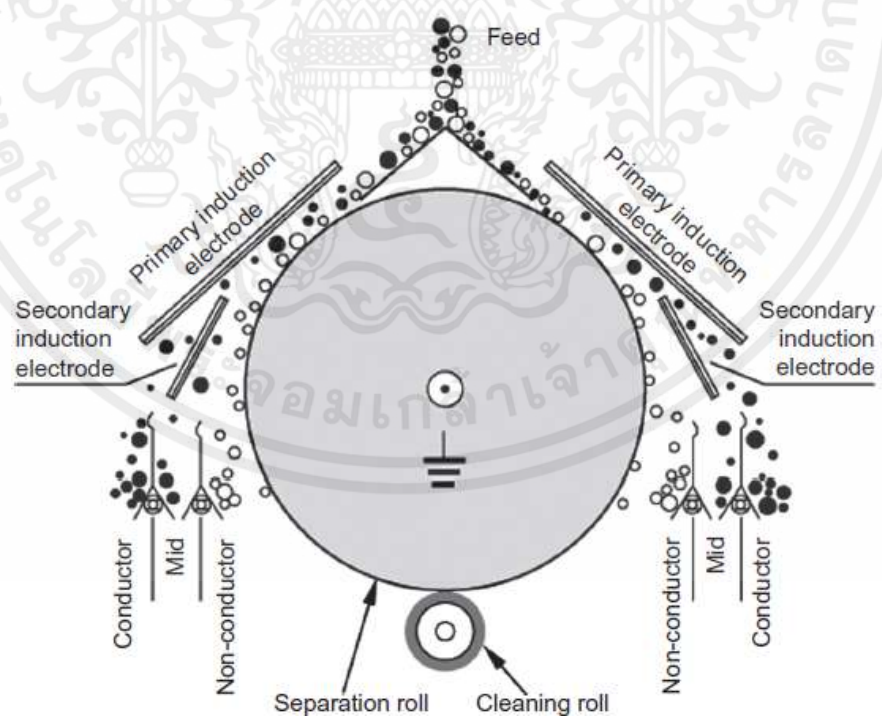
รูปที่ 2.8 แสดงการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

เครื่องแยกไฟฟ้าสถิตสมัยใหม่เป็นแบบ Plate หรือแบบ Screen (รูปที่ 2.9) แบบเดิมใช้คัดแยกสารไม่นำไฟฟ้าจำนวนเล็กน้อยจากตัวนำที่โดดเด่นดังรูปที่ 2.9(a) ในขณะที่เครื่องแยกแบบ Screen นำตัวนำจำนวนเล็กน้อยออกจากตัวนำที่ไม่นำไฟฟ้าเป็นหลักดังรูปที่ 2.9(b) หลักการทำงานเหมือนกันสำหรับเครื่องคัดแยกทั้งสองประเภท ฟีตอนุภาคตกลงไปในจานที่ลาดลงสู่สนามไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากแรงดันสูง อิเล็กโทรดรูปวงรีขนาดใหญ่อนุภาคละเอียดได้รับผลกระทบมากที่สุดจากแรงยกและอนุภาคนำไฟฟ้าที่ดีจึงเป็นที่นิยมยกไปที่อิเล็กโทรดในขณะที่สารไม่นำไฟฟ้าที่หยาบถูกปฏิเสธอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด พารามิเตอร์ของเครื่องที่ส่งผลต่อเครื่องแยก ESP ประกอบด้วย: รูปทรงอิเล็กโทรด, แรงดันอิเล็กโทรดและขั้ว ความโค้งของจานและตำแหน่งของตัวแยกประเภทอนุภาค [11] สำหรับทั้งเครื่องแยก HTR และ ESP ความชื้นของระบบจะตั้งให้อยู่ในระดับต่ำ เช่น ความชื้นส่วนเกินอาจทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของของไหลเปลี่ยนแปลงได้ตัวกลางของเครื่องแยก (อากาศ) รวมทั้งส่งผลกระทบต่อ การนำไฟฟ้าของพื้นผิวอนุภาคผ่านเอฟเฟกต์คูของโมเลกุลน้ำเองและไอออนที่แตกตัวในไอน้ำ [13.1]



รูปที่ 2.9 (a) Plate และ (b) Screen electrostatic separators

รูปที่ 2.9 (a) Plate และ (b) Screen electrostatic separators คล้ายกับ CoronaStat สำหรับการแยกแบบ HTR OreKinetice ยังได้พัฒนาตัวแยก ESP ที่ปรับปรุงแล้วเรียกว่าเครื่องแยก UltraStat (รูปที่ 2.10) หลักการปรับปรุงในเครื่องแยกนี้มีรูปทรงที่แตกต่างกันของอิเล็กโทรดและเส้นทางป้อนอนุภาค การมีอยู่ของอิเล็กโทรดเหนี่ยวนำรองเพื่อเพิ่มการยก แรงต่ออนุภาคนำไฟฟ้าที่มีประจุตลอดจนโรลเลอร์ทุติยภูมิทำความสะอาดพื้นผิวของโรลเลอร์ปฐมภูมิ



รูปที่ 2.10 Diagram of UltraStat separator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 Electric and mechanical forces exerted on the conductive

จากการที่ระเบิดด้วยไอออน (ion bombardment) อย่างเข้มข้นทำให้ส่วนประกอบแร่ธาตุจากการบดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่เป็นเม็ดที่มีขนาดเล็กจะได้รับประจุไฟฟ้าที่มีขั้วเดียวกับขั้วไฟฟ้าโคโรนา เม็ดที่นำไฟฟ้าที่สัมผัสกับโรลเลอร์ที่ติดตั้งกับสายดินจะสูญเสียประจุไฟฟ้าได้เร็วกว่าชนิดที่ไม่นำไฟฟ้ามาก ในเขตสนามไฟฟ้ากึ่งเครื่องแบบที่สร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดไฟฟ้าสถิตและโรลเลอร์ที่ติดตั้งกับสายดิน เม็ดที่นำไฟฟ้าได้มาจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต ประจุไฟฟ้าของขั้วตรงข้ามในส่วนที่เกี่ยวข้องกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง [24], [25] โดยการกระทำของแรงเหวี่ยงออกจากจุดศูนย์กลาง F_c (Centrifugal force) และแรงสนามไฟฟ้า F_e (Electric field force) แกรนูลที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าจะถูกดึงดูดโดยอิเล็กโทรดไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะเบี่ยงเบนไปทางด้านขวาของตัวสะสมดังรูปที่ 2.11 [26]

เนื่องจากมีความต้านทานสูง เม็ดที่ไม่นำไฟฟ้าจึงเก็บประจุไฟฟ้าที่ได้มาจากการที่ระเบิดด้วยไอออน และภายใต้อิทธิพลของแรงสนามไฟฟ้า F_e (Electric field force) และแรงจินตภาพไฟฟ้า F_i (Electric image force) จะยังคงตรึงไว้กับพื้นผิวมันวาวโรลเลอร์ และหมุนด้วยประจุไฟฟ้าโดยปัดออกด้วยแปรง ด้วยวิธีนี้เม็ดที่ไม่นำไฟฟ้าจะตกลงมาและถูกรวบรวมไว้ที่ด้านซ้ายของตัวสะสม [26]

แรงสนามไฟฟ้า F_e (Electric field force) , แรงโน้มถ่วง F_g (Gravitational force) , แรงจินตภาพไฟฟ้า F_i (Electric image force) และ แรงเหวี่ยงออกจากจุดศูนย์กลาง F_c (Centrifugal force) ถูกแสดงโดยสูตรต่อไปนี้:

$$F_e = q \cdot E \quad (1)$$

โดยที่ q คือประจุแบบเม็ด [C] และ E คือความแรงของสนามไฟฟ้าในพื้นที่ [V/m] ,

$$F_g = m \cdot g \quad (2)$$

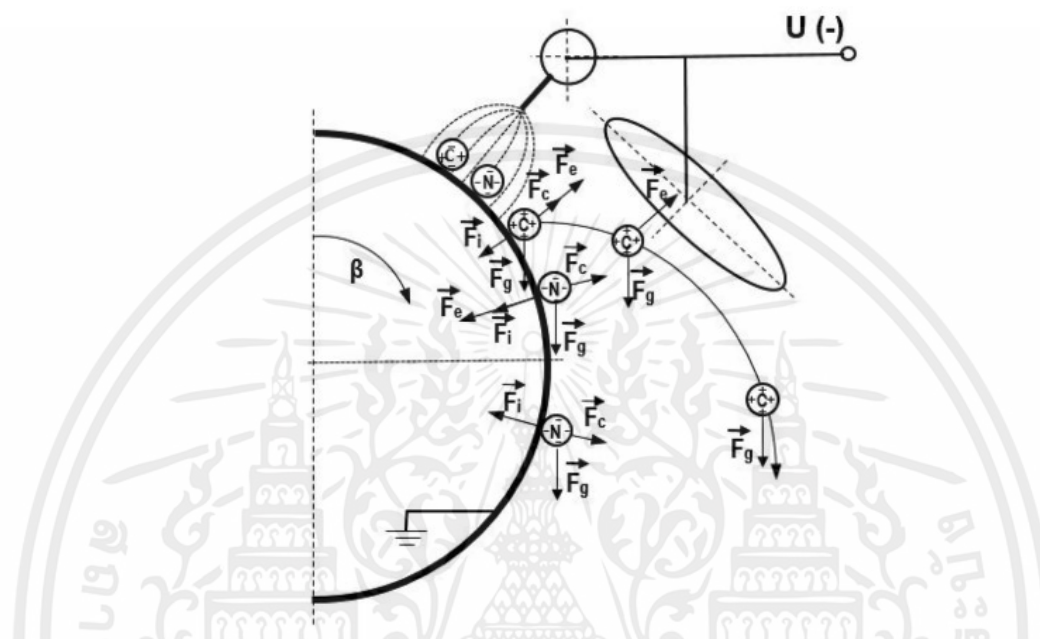
โดยที่ m คือมวลของเม็ดที่ได้จากการบดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [kg] และ g ความเร่งโน้มถ่วง [m/s^2] ,

$$F_i = q^2 / (4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot (2 \cdot r)^2) \quad (3)$$

โดยที่ q คือประจุแบบเม็ด , ϵ_0 คือ Permittivity of free space [F/m] และ r คือรัศมีของเม็ดที่ได้จากการบดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [m] ,

$$F_c = m \cdot (v^2 / R) \quad (4)$$

โดยที่ m คือมวลของเม็ดที่ได้จากการบดแบดเตอร์ลีเทียมไอออน [kg] , v คือความเร็วของเม็ด [m/s] ซึ่งควรจะเคลื่อนที่พร้อมกันกับ ม้วนโรลเลอร์โดยมีรัศมี R [m] . [26]



รูปที่ 2.11 แรงทางไฟฟ้ากระทำต่อ เม็ดที่ได้จากการบดแบดเตอร์ลีเทียมไอออนที่นำไฟฟ้า (C) และ เม็ดที่ไม่นำไฟฟ้า (N) ในตัวแยกโคโรนาและไฟฟ้าสถิต [26]

โดยจากมุมการแยกตัวของเม็ดที่นำไฟฟ้าสามารถแสดงการเคลื่อนที่ได้ตามดังรูปที่ 2.11 และเราจะได้มุมการล่อยออกจากโรลเลอร์ดังสูตรต่อไปนี้

$$\cos \beta = (F_c + F_e - F_i) / F_g \quad (5)$$

และถ้าหากเม็ดที่ไม่นำไฟฟ้ายังคงตรึงอยู่กับโรลเลอร์.

$$F_e + F_g + F_i \cdot \cos \beta > F_c \quad (6)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (5) และ (6) แสดงให้เห็นในหลักฐานว่าแรงสนามไฟฟ้า F_e (สมการที่ 1) และแรงจินตภาพไฟฟ้า F_i (สมการที่ 3) เป็นแรงหลักที่ตรึงเม็ดที่ไม่นำไฟฟ้าเข้ากับพื้นผิวม้วนโรลเลอร์ที่หมุนอยู่ หากแรงเหล่านี้มีขนาดเล็กเกินไป เม็ดที่ไม่นำไฟฟ้าจะไม่ตรึงอยู่กับพื้นผิวม้วนและหลุดออก

จากแรงโน้มถ่วง F_g (สมการที่ 2) และโยนไปทางด้านขวาของกล่องรวบรวมเนื่องจากแรงเหวี่ยงออกจากจุดศูนย์กลาง F_C (สมการที่ 4) แรงสนามไฟฟ้าและแรงจินตภาพไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประจุของแต่ละเม็ดและความแรงของสนามไฟฟ้าซึ่งควบคุมโดยระดับไฟฟ้าแรงสูง U แรงหลักที่แยกเม็ดนำไฟฟ้าออกจากพื้นผิวม้วนคือแรงเหวี่ยงออกจากจุดศูนย์กลาง F_C ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของม้วนโรลเลอร์หมุน

2.4 โรลเลอร์

ในการป้อนแร่ผสมต่างๆเข้าไปในเครื่องแยกต้องคำนึงถึงความไวในการนำไฟฟ้าที่พื้นผิวสัมผัสของโรลเลอร์ ซึ่งโรลเลอร์ที่ใช้ในการคัดแยกนี้สามารถทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอน(Mild steel)หรือวัสดุตัวนำอื่นๆที่สามารถใช้งานได้ซึ่งจะเชื่อมสายดินเข้ากับแผ่นสแตนเลสบริเวณเพลลาของโรลเลอร์

วัสดุตัวนำ(CONDUCTING MATERIALS)

ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุขึ้นอยู่กับกรรมวิธีของอิเล็กตรอนอิสระ วัสดุซึ่งนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระเมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าไปยังยังขั้วตรงข้ามเรียกว่าวัสดุตัวนำ วัสดุตัวนำมีบทบาทสำคัญในงานด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยี วัสดุตัวนำเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี เช่น ทองแดง ทองเงิน อลูมิเนียม ทองเหลือง แกรไฟท์ เป็นต้น

2.4.1 ทฤษฎีของอิเล็กตรอนอิสระ สมมติฐานของแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ

โลหะมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในปริมาตรของโลหะเช่น โมเลกุลของก๊าซในภาชนะ อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ไปในทิศทางแบบสุ่มและชนกับไอออนบวกที่ตรึงอยู่ในโครงผลึกแร่ธาตุหรืออิเล็กตรอนอิสระอื่นๆ อิเล็กตรอนทั้งหมดมีความยืดหยุ่นและไม่มีการสูญเสียพลังงานความเร็วและการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นไปตาม Maxwell Boltzmann อิเล็กตรอนอิสระกำลังเคลื่อนที่ในสนามศักย์ที่สม่ำเสมออย่างสมบูรณ์เนื่องจากไอออนคงที่ในโครงผลึกแร่ธาตุ

ในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่แบบสุ่มของอิเล็กตรอนอิสระจะมีโอกาสเท่าเทียมกันทั้งหมด เพื่อให้ทิศทางของเวกเตอร์ความหนาแน่นกระแสเป็นศูนย์ เมื่อสนามไฟฟ้าภายนอกถูกนำไปใช้กับปลายโลหะอิเล็กตรอนจะลอยตัวอย่างช้าๆ ด้วยความเร็วเฉลี่ยที่เรียกว่าความเร็วดริฟท์ (Drift velocity) ในทิศทางตรงกันข้ามกับสิ่งนั้นของสนามไฟฟ้า ความเร็วดริฟท์นี้ถูกช้อนทับด้วยความเร็วแบบสุ่ม ความเร็วดริฟท์นี้มีหน้าที่ในการไหลของกระแสไฟฟ้าในโลหะ Drift velocity – ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า, Mild Steel - เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)หรือ(Mild steel) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มี

ปริมาณคาร์บอนต่ำ ซึ่งสามารถเรียกอีกอย่างว่าเหล็กคาร์บอนต่ำ ช่วงของคาร์บอนจะแตกต่างกันตามแหล่งที่มาแต่ปริมาณคาร์บอนที่มักพบในเหล็กอ่อนจะอยู่ที่ 0.05% ถึง 0.25% โดยน้ำหนัก ในขณะที่เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนสูงกว่ามักจะถูกอธิบายว่ามีปริมาณคาร์บอนอยู่ที่ 0.30% ถึง 2.0% โดยน้ำหนัก ซึ่งหากเติมคาร์บอนมากกว่านั้นจะจัดเป็นเหล็กหล่อ

เหล็กอ่อน(Mild steel)ไม่เหมือนกับเหล็กกล้าผสม(Alloy steel) ดังนั้นจึงไม่มีธาตุอื่นนอกเหนือจากเหล็กจำนวนมาก ซึ่งจะไม่พบโครเมียม โมลิบดีนัม หรือส่วนผสมอื่นๆในปริมาณมหาศาลในเหล็กอ่อนเนื่องจากองค์ประกอบคาร์บอนและโลหะผสมค่อนข้างต่ำ จึงมีคุณสมบัติหลายอย่างที่แตกต่างกันจากเหล็กกล้าคาร์บอนสูงและเหล็กกล้าผสม

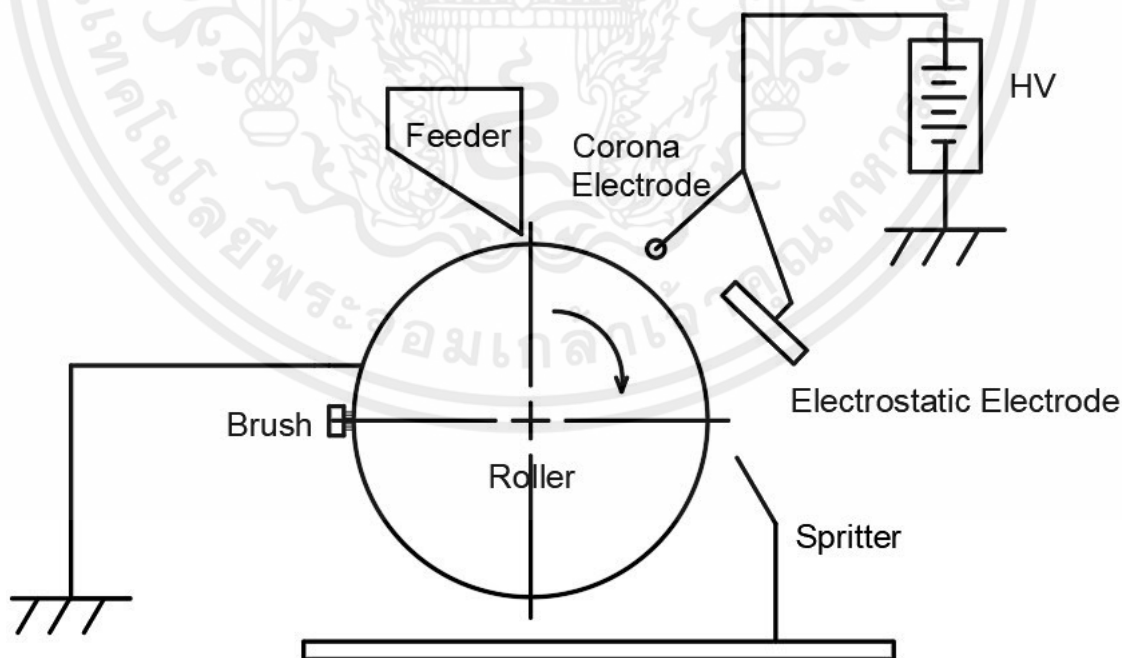
คาร์บอนที่น้อยกว่าหมายความว่าเหล็กอ่อนโดยทั่วไปจะมีความเหนียวแปรรูปได้และสามารถเชื่อมได้มากกว่าคาร์บอนสูงและเหล็กอื่นๆ อย่างไรก็ตามแทบเป็นไปไม่ได้เลยที่จะทำการชุบแข็งและเสริมความแข็งแรงด้วยการให้ความร้อนและการชุบแข็งในปริมาณคาร์บอนต่ำยังหมายความว่ามีความคาร์บอนและองค์ประกอบผสมอื่นๆเพียงเล็กน้อยเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวในโครงสร้างผลึกซึ่งโดยทั่วไปส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนสูงและโลหะผสมสูง เหล็กอ่อนยังมีธาตุเหล็กและเฟอร์ไรต์ในปริมาณมาก ซึ่งสามารถทำให้เป็นแม่เหล็กได้

บทที่ 3

อุปกรณ์และการออกแบบการทดลอง

3.1 ระบบการทำงานของ เครื่อง ELECTRICAL SEPARATOR

หลักการการทำงานของเครื่อง Electrical separator โดยการป้อนผงอนุภาค ลงไปผ่าน ถาดลำเลียงวัสดุ โดยอนุภาคจะค่อยๆไหลมาตามถาดลำเลียงวัสดุ และเมื่ออนุภาคตกลงสู่พื้นผิวของโรลเลอร์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นตัวนำ ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของอนุภาคจาก Corona electrode กับ Roller electrode ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้า ที่ 15 กิโลโวลต์ ด้วยขั้วบวกทำให้ตัวนำรอบบริเวณ Corona electrode ซึ่งตัวนำนั้นก็คืออากาศและเกิดการไอออไนซ์ขึ้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เพื่อเพิ่มความเป็นตัวนำรอบบริเวณดังกล่าวต้องปราศจากความชื้น เมื่ออนุภาคมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ต่างกันทำให้อนุภาคที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าต่ำ จะติดกับโรลเลอร์เพราะการถ่ายเทประจุได้ช้าซึ่งบริเวณโรลเลอร์จะต่อสายดินเข้ากับบริเวณของเพลลาของโรลเลอร์ ทำให้ภายในโรเตอร์นั้นเป็นขั้วลบและเมื่ออนุภาคที่ติดกับโรลเลอร์คายประจุหมด อนุภาคนั้นก็จะหล่นลงพื้นตามแรงโน้มถ่วงหรือไม่หล่นจะถูกแปรงขัดลงสู่พื้น ในทางตรงกันข้ามอนุภาคที่มีคุณสมบัติตัวนำสูงจะถูกคายประจุอย่างรวดเร็วจึงทำให้อนุภาคกระเด็นออกจากโรลเลอร์ด้วยแรงเหวี่ยง และแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 3.1 แสดงไดอแกรมของส่วนประกอบเครื่อง Electrostatic Electrode

3.1.1 DC Transformer

สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการสร้างเครื่องต้นแบบนี้และจะ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงโดยมรแรงดันสูงที่มากกว่าหรือเท่ากับ 15 กิโลโวลต์ เพื่อให้สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาจากช่องว่างของอากาศเพื่อให้กระบวนการคัดแยกเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

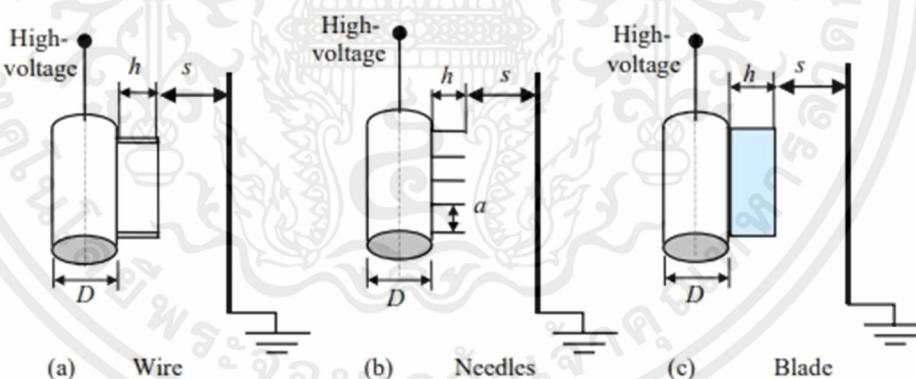
3.1.2 โรลเลอร์

โรลเลอร์ที่จะใช้ในเครื่อง Electrostatic separator จะสร้างขึ้นจากวัสดุที่มีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าเพื่อที่จะได้เกิดการเหนี่ยวนำจากหัวอิเล็กโทรดวัสดุที่จะใช้คือการใช้ Stainless steel ในการทำเป็นโรลเลอร์

มอเตอร์ที่นำมาใช้จะเป็นมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้หรือปรับเกียร์ได้เพราะความเร็วรอบของโรลเลอร์มีผลต่อการคัดแยกของวัสดุเพื่อที่จะได้หาค่าความเร็วที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดของการคัดแยกวัสดุ

3.1.3 หัว CORONA Electrode

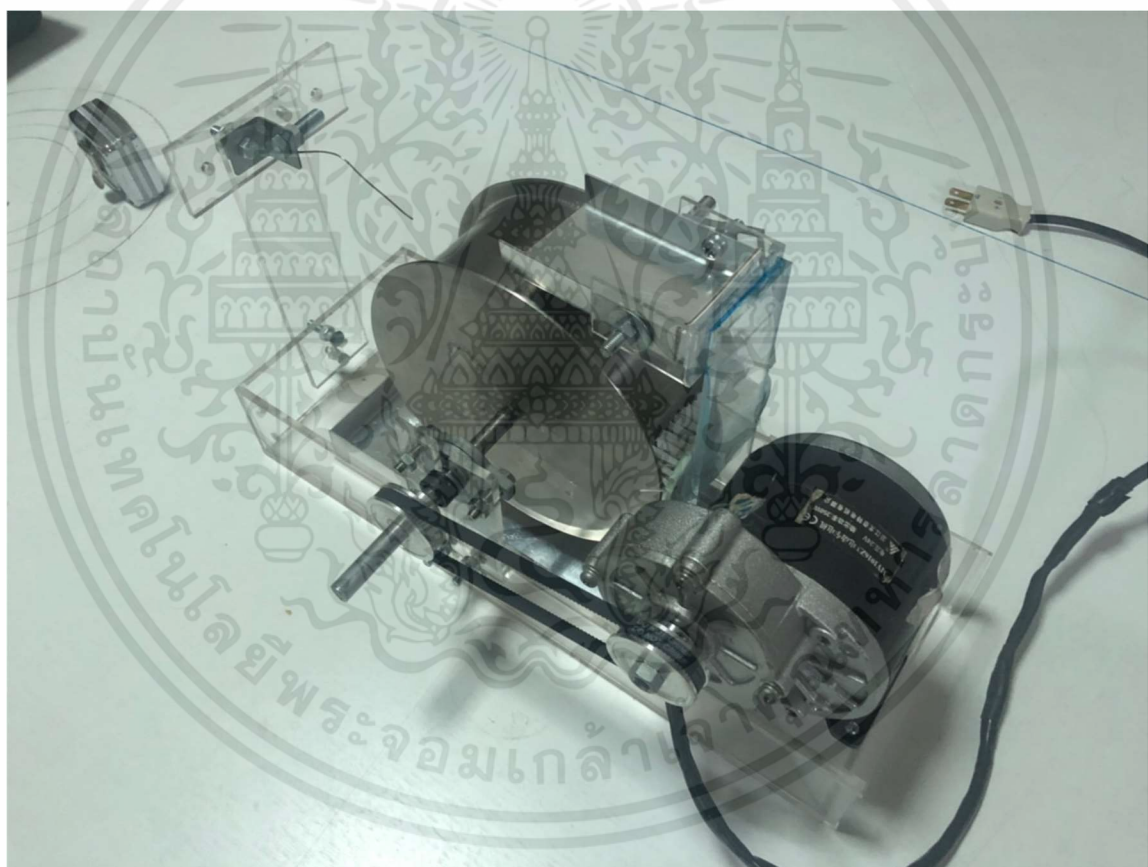
หัวโคโรนาอิเล็กโทรดมีอยู่หลายประเภทซึ่งแต่ละประเภทสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มข้นสูงได้แตกต่างกันมากซึ่งมีอยู่ 3 ประเภท a) แบบลวด, b) แบบเข็ม และ c) แบบใบมีด ดังรูปที่ 3.2



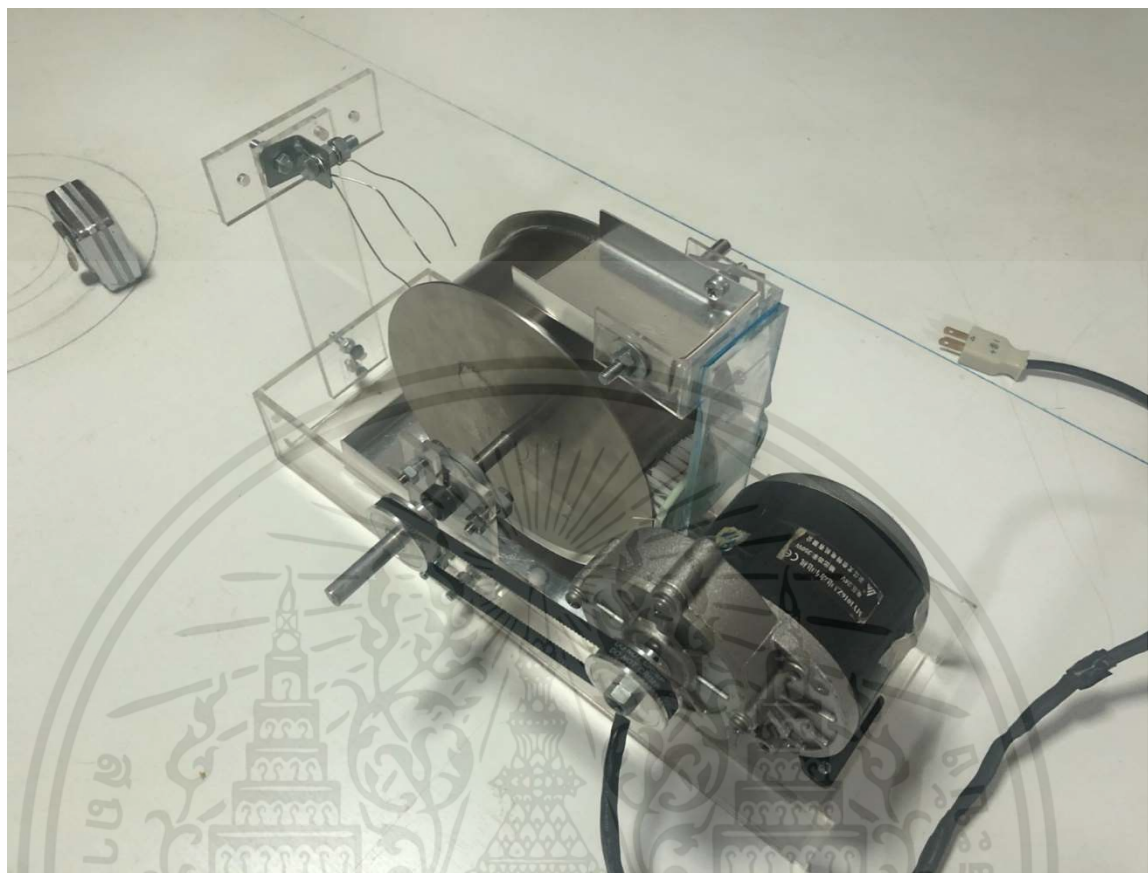
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหัวโคโรนาอิเล็กโทรดประเภทต่างๆ (a)แบบลวด (b)แบบเข็ม (c)แบบใบมีด

การชาร์จอนุภาคที่เป็นฉนวนในตัวแยกไฟฟ้าสถิตแบบหมุน [28] ทำได้โดยการปล่อยโคโรนาจากอิเล็กโทรด [29] ดังนั้น จึงมีการทำงานมากมายเพื่อระบุลักษณะอิเล็กโทรดโคโรนาประเภทต่างๆ และคำนวณความแรงของสนามไฟฟ้า E ตลอดจนความหนาแน่นของประจุไอออน q ที่สร้าง [30-35] ในการใช้งานส่วนใหญ่ โคโรนาเกิดจากลวดโลหะเส้นบางโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางจะอยู่ที่ประมาณ 10^{-4} ถึง

10^{-2} เมตร เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง และอยู่ในระยะห่างที่เหมาะสม จากขั้วไฟฟ้าระนาบหรือทรงกระบอก [3] อิเล็กโทรดโคโรนาคู่ กำหนดอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบไอออนไนซ์หนึ่งหรือหลายอย่าง (สายไฟ) ที่ติดอยู่กับส่วนค้ำโลหะ (รูปที่ 3.1) โครงสร้างต่างๆ ได้รับการอธิบายไว้ในเอกสารทางเทคนิค [30,36] พร้อมด้วยเส้นโค้งแรงดันกระแสไฟที่ทำให้สามารถเปรียบเทียบได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้เป็นอย่างดีบางประการ (ระยะทางไปยังอิเล็กโทรดที่ต่อลงกราวด์, ขั้วของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง) อย่างไรก็ตามนั้น ข้อมูลที่เผยแพร่มานั้นมีประโยชน์เพียงเล็กน้อยสำหรับผู้ที่ต้องการออกแบบอุปกรณ์ใหม่หรือปรับกระบวนการนั้นให้เหมาะสม และข้อมูลประเภทนี้จำเป็นสำหรับการประเมินประจุที่อนุภาคฉนวนจะได้รับขณะเคลื่อนผ่านเขตสนามไฟฟ้าดังกล่าว



รูปที่ 3.3 ต้นแบบหัวโคโรนาแบบหัวเข็ม 1 เซ็ม



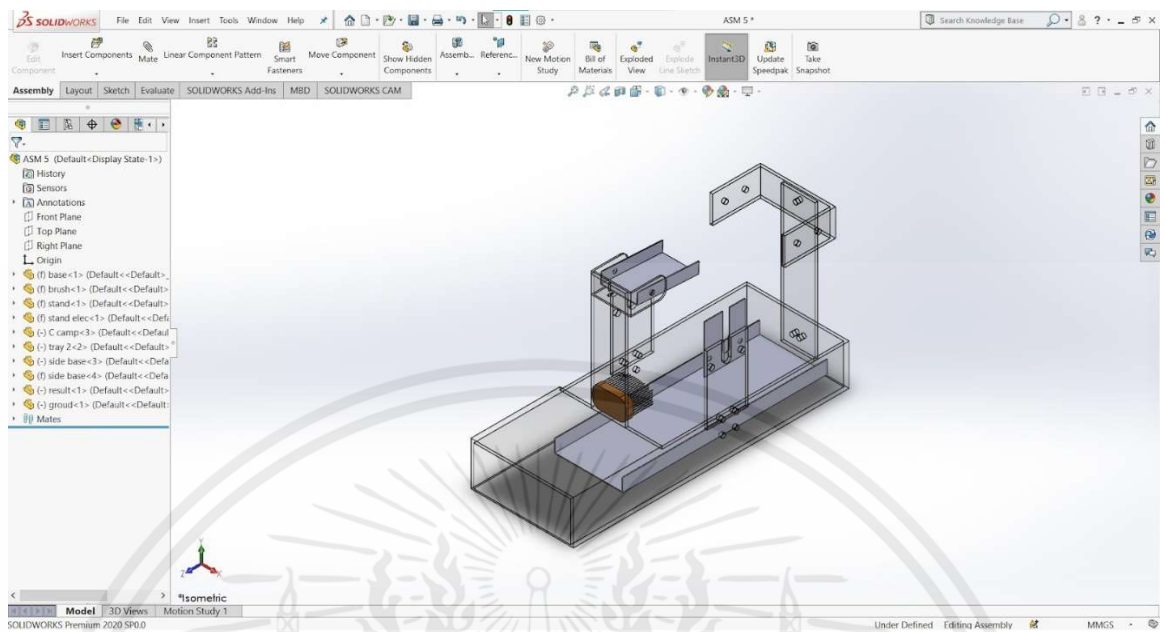
รูปที่ 3.4 ต้นแบบหัวโคโรน่าแบบหัวเข็ม 3 เซ็ม

3.2 การออกแบบตัวเครื่อง

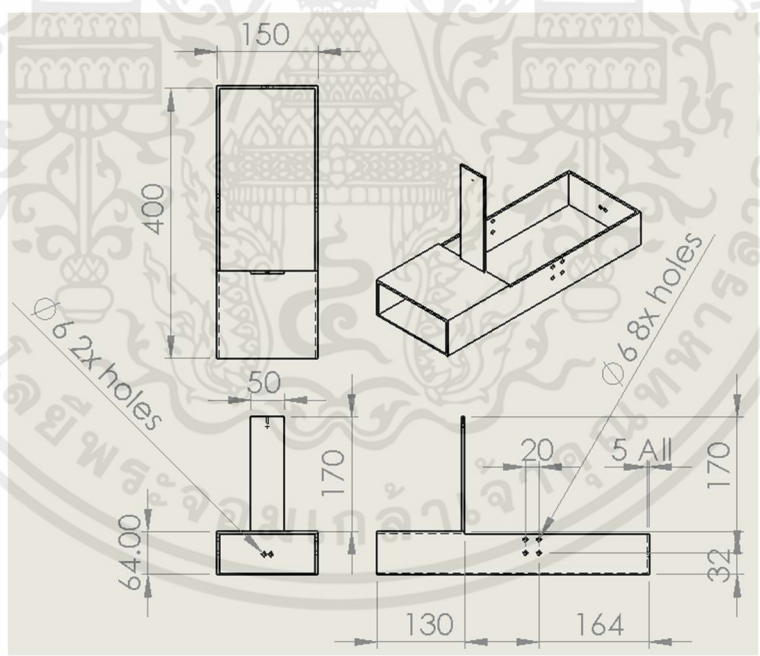
3.2.1 ออกแบบโครงสร้างของเครื่องต้นแบบ

การออกแบบเครื่องกัดแยกโดยที่คำนึงถึงการจัดวางอุปกรณ์ภายในเครื่องต้นแบบนี้ โดยผู้จัดทำต้องการวัสดุที่นำมาทำเครื่องต้นแบบที่มีต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก โดยเน้นไปที่ขนาดที่ไม่ใหญ่มากเพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้าย และรับแรงได้ดีผู้จัดทำจึงใช้อะคริลิก ในการออกแบบโครงสร้างโดยใช้อะคริลิกความหนา 5 มิลลิเมตร สำหรับคุณสมบัติของอะคริลิก ก็คือ เป็นวัสดุที่มีความทนทานแข็งแรง ยืดหยุ่นสูง สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ค่อนข้างสูง และมีความโปร่งใสของตัวเนื้อวัสดุทำให้สามารถมองเห็นการทำงานของเครื่องได้ชัดเจน อะคริลิกจึงเป็นตัวเลือกที่ดีและน่าสนใจในการนำมาทำโครงสร้าง

ในก่อนทำเครื่องต้นแบบเราต้องทำการจำลองเครื่องต้นแบบขึ้นมาจากวัสดุที่ผู้จัดทำเลือกใช้ โดยการออกแบบโครงสร้างแบบจำลองใน ซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS ในการออกแบบโครงสร้างจำลองนั้นเราสามารถออกแบบโดยเลือกอะคริลิกได้เราออกแบบได้ดังรูปที่ 3.5

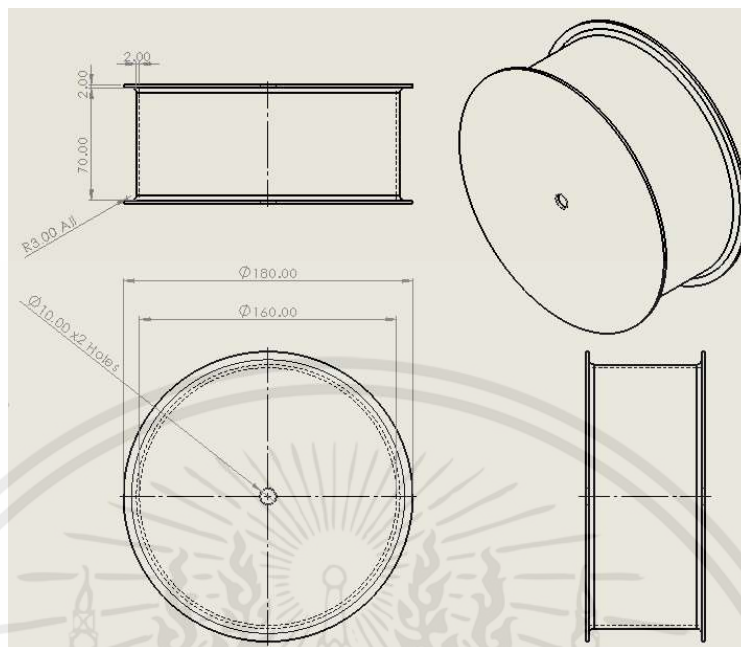


รูปที่ 3.5 แสดงภาพโมเดลของเครื่องจาก SOLIDWORKS

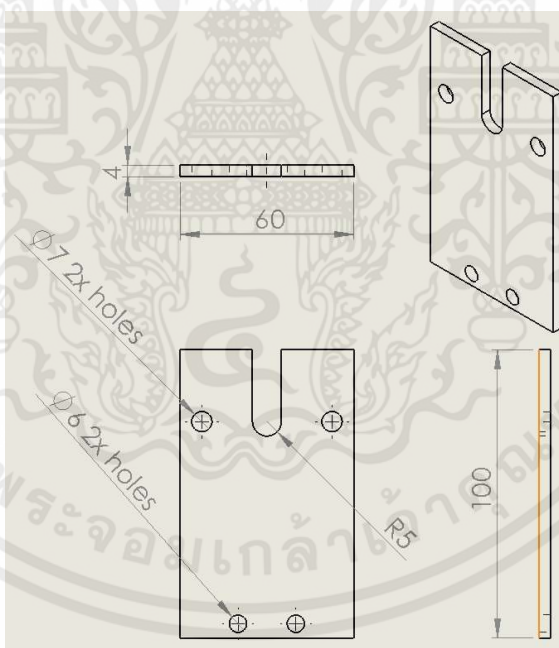


รูปที่ 3.6 การออกแบบโครงสร้างรับน้ำหนักของฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

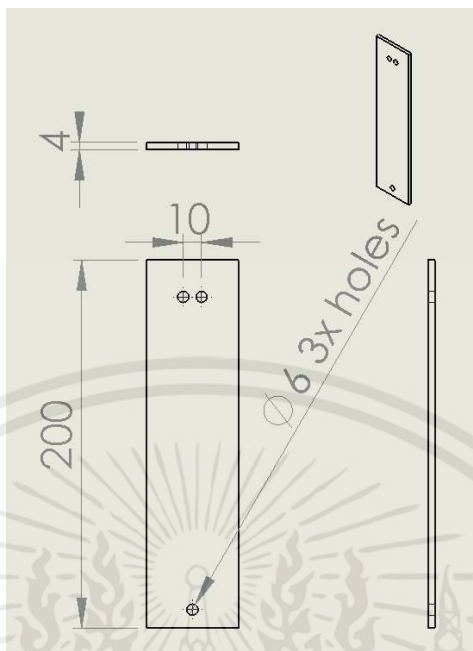


รูปที่ 3.7 การออกแบบของโรลเลอร์เพื่อใช้เป็นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์

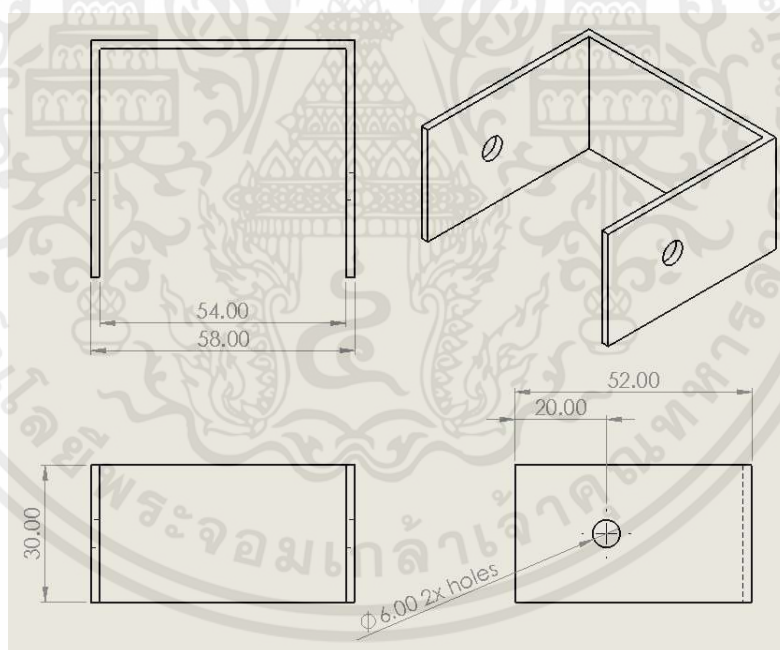


รูปที่ 3.8 การออกแบบชิ้นส่วนรับน้ำหนักของโรลเลอร์และเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

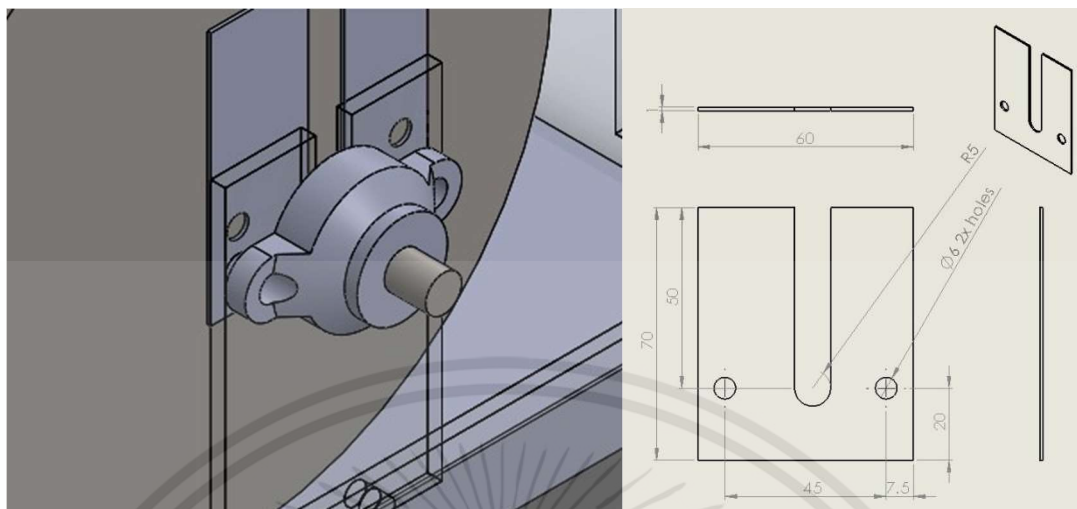


รูปที่ 3.9 การออกแบบขาตั้งของหัวโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์

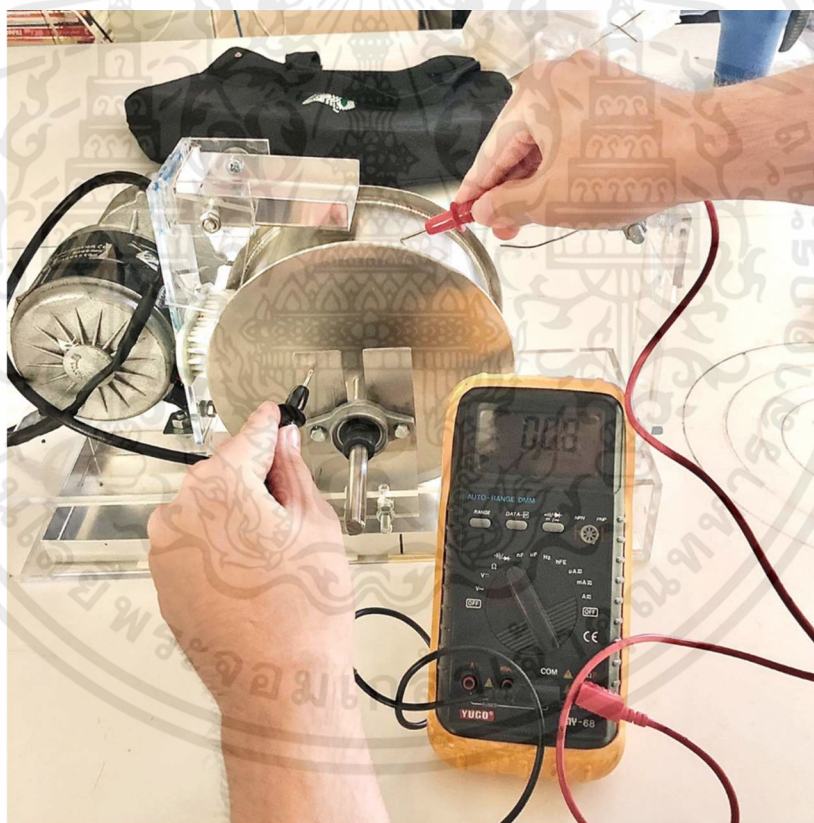


รูปที่ 3.10 การออกแบบ C camp ของถาดลำเลียงวัสดุ

บริเวณเพลลาของโรลเลอร์เราจะติดตั้งแผ่นแอสแตนเลส ไว้สำหรับเชื่อมต่อสายดิน โดยเราจะใช้มัลติมิเตอร์ดิจิตอล เพื่อทดสอบว่าหลังจากติดตั้งแผ่นแอสแตนเลสบริเวณเพลลาของโรลเลอร์ แล้วไฟฟ้าสามารถไหลถึงกันได้ไหม ดังรูปที่ 3.12



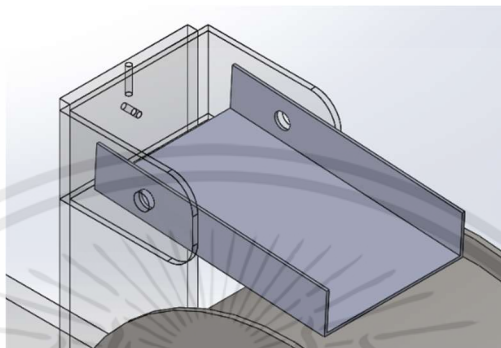
รูปที่ 3.11 แผ่นสแตนเลส ไว้สำหรับเชื่อมต่อสายดิน



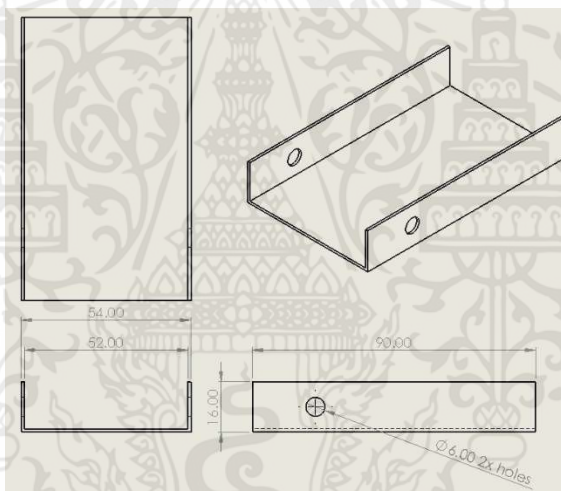
รูปที่ 3.12 เช็คแผ่นสแตนเลส ไว้สำหรับเชื่อมต่อสายดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบ ระบบลำเลียงวัสดุเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายของสิ่งประดิษฐ์ จะออกแบบ โดยให้เนื้อวัสดุค่อยๆ ไหลลงมาตามแรงโน้มถ่วง โดยการติดตั้งถาดสแตนเลสและ สามารถปรับให้มีมุมเอียงได้ตามต้องการดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ถาดลำเลียงวัสดุ



รูปที่ 3.14 การออกแบบถาดลำเลียงวัสดุ



รูปที่ 3.15 ถาดลำเลียงวัสดุ จากตัวเครื่องจริง

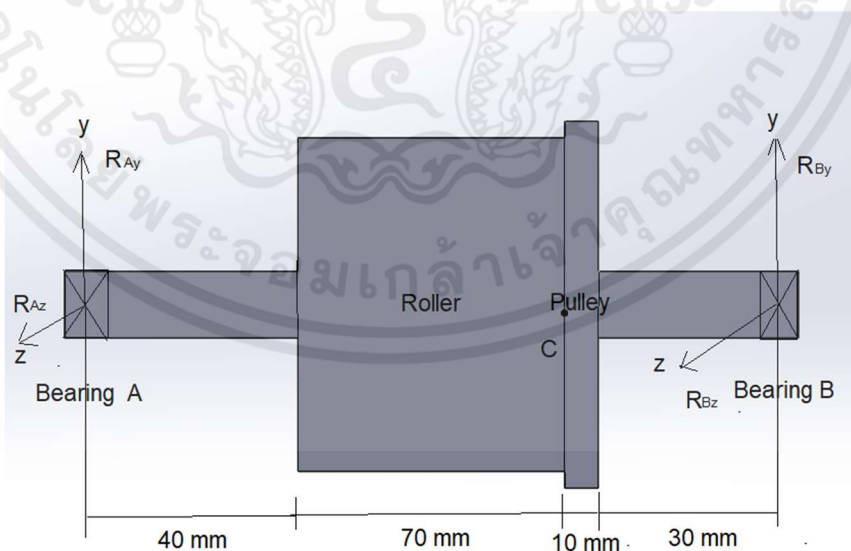
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งตัวมอเตอร์สั่นบริเวณด้านข้างของตัวพีต เพื่อให้วัสดุถูกลำเลียงและตกลงมา โดยมอเตอร์สั่นจะประกอบด้วย มอเตอร์สั่น 3 โวลต์ , รางถ่านขนาด 2 ก้อน 3 โวลต์ และ สายไฟเพาเวอร์ซีพหลาย เป็นดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.16 มอเตอร์สั่นที่ติดตั้งกับภาตพีตวัสดุ

3.2.2 การออกแบบโรลเลอร์



รูปที่ 3.17 การออกแบบโรลเลอร์

การคำนวณเพลารับน้ำหนักโรลเลอร์จะใช้การประมาณค่าความเค้นรวมศูนย์บนเพลลา ในการ ออกแบบโรลเลอร์ได้ถูกออกแบบมาจนถึงการกำหนดเพลลาและถูกยึดที่ปลายสองข้างด้วยแบริ่งดังแสดงใน รูป 3.17 และรองรับการทำงานของเพลลาโดยมูเล่มีการส่งกำลังจากมอเตอร์ด้วยสายพานซึ่งสามารถ พิจารณาเป็นการส่งแรงตามแนวหน้าสัมผัสและตามแนวรัศมีของตัวมูเล่ได้และแรงที่กระทำตามแนวรัศมี ของโรลเลอร์ได้ดังนี้ $w_p^t = 223 \text{ N}$, $w_p^r = 9.81 \text{ N}$, $w_R^r = 29.43 \text{ N}$ โดยมีค่า safety factor เท่ากับ 1.5

จาก $\sum M_x$ ทอร์กที่เกิดในเพลาระหว่าง Pulley ได้

$$T = w_p^t \left(\frac{d_p}{2} \right) = 223 \left(\frac{150 \times 10^{-3}}{2} \right) = 16.73 \text{ N}$$

เขียน FBD และวิเคราะห์หาแรงที่กระทำกับแบริ่งจะได้

$$\begin{aligned} \sum M_A = 0 \text{ counterclockwise} &+ (9.81 \times 35 \times 10^{-3}) \\ &+ (29.43 \times 75 \times 10^{-3}) - (R_{Ay} \times 150 \times 10^{-3}) = 0 \\ (223 \times 35 \times 10^{-3}) - (R_{Az} \times 150 \times 10^{-3}) &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } R_{Ay} = 17.004 \text{ N}, R_{Az} = 52.033 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \sum M_A = 0 \text{ clockwise} &+ (29.43 \times 75 \times 10^{-3}) \\ &+ (9.81 \times 115 \times 10^{-3}) - (R_{By} \times 150 \times 10^{-3}) = 0 \\ (223 \times 115 \times 10^{-3}) - (R_{Bz} \times 150 \times 10^{-3}) &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } R_{By} = 22.236 \text{ N}, R_{Bz} = 170.970 \text{ N}$$

พิจารณาที่จุด C ซึ่งมีค่าโมเมนต์ค่อนข้างสูงจะมีความเค้นรวมศูนย์เกิดขึ้นที่บารองรับอัน เนื่องมาจากการเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาที่ตำแหน่งนี้และเกิดแรงบิด ที่จุด C

$$M_a = 5.72 \text{ N} \cdot \text{M}, T_m = 16.72 \text{ N} \cdot \text{M}$$

สมมติเป็นการ Fillet แบบทั่วไปจาดารางที่ 7-1 ได้

$$k_t = 1.7, k_{ts} = 1.5$$

ลองสมมติให้

$$k_f = k_t; k_{fs} = k_{ts}$$

เลือกเหล็ก stainless steel 304 tensile strength

$$215 \text{ Mpa}, S_{ut} = 505 \text{ Mpa cold - drawn}$$

สำหรับความต้านทานความล้า

$$S_e \text{ จาก } k_a = aS_{ut}^b = 4.51(505^{-0.265}) = 0.867$$

เดาค่าตัวประกอบขนาด

$$k_b = 0.9, k_c = k_d = k_e = 1$$

จาก

$$S_e = k_a k_b k_c S'_e = 0.867 \times 0.9 \times 0.5 \times 505 = 197.025 \text{ Mpa}$$

หา \emptyset ของเพลลาที่บารองตรงจุด C จะใช้ทฤษฎีของ DE-Goodman

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left(\frac{2(k_f M_a)}{S_e} + \frac{[3(k_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}}}{S_{ut}} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left\{ \frac{16(1.5)}{\pi} \left(\frac{2(1.7 \times 5.72)}{197.025} + \frac{[3(1.5 \times 16.72)^2]^{\frac{1}{2}}}{505 \times 10^6} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

ดังนั้นจะได้ $d = 0.0112 \text{ m}$ หรือ 11 mm

เนื่องจากการคำนวณที่ทำมาก่อนข้างเข้มงวดอยู่แล้วจึงเลือกขนาดมาตรฐานถัดไปที่ต่ำกว่า 11 mm ดังนั้นจึงใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาที่ $d = 10 \text{ mm}$

3.3 ชุดมอเตอร์

1. วิธีคำนวณการเลือกขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสม และ การเลือกมอเตอร์

ในการเลือกใช้มอเตอร์ ต้องเลือกมอเตอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งานโดยเลือกจากทอร์คของโรลเลอร์ที่เราต้องการให้มอเตอร์หมุนโรลเลอร์ดังนี้

Moment Inertia in x-axis ; ของโรลเลอร์

$$\frac{m}{8}(d^2) = \frac{3}{8}(160 \times 10^{-3})^2 = 9.6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment Inertia in x-axis ; ของเพลลา

$$\frac{m}{8}(d^2) = \frac{0.5}{8}(10 \times 10^{-3})^2 = 6.25 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment Inertia; ของพูลเลย์

$$\frac{m}{8}(d^2) = 8.8 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\left((J_R + J_S + J_{P2}) \times \left(\frac{D_{P1}}{D_{P2}} \right) \right) + J_P$$

J_L ; Moment of inertia

$$= 9.78 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Acceleration Torque ; $V_m = 20 \text{ rpm}$, $t_1 = 1$

$$J_L = \left(\frac{V_m}{9.55 \times t_1} \right)$$

$$T_a = 20.48 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$$

Required Torque , กำหนด Safety factor = 1.5

$$T_M = (T_a + T_L) \times \text{Safety Factor}$$

$$T_M = 30.72 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{Power} = \frac{2 \times \pi \times T \times N}{60} = 0.064 \text{ watt}$$

ในการเลือกมอเตอร์เราต้องเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดขั้นต่ำอยู่ที่ $30.72 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$

ในการเลือกมอเตอร์เนื่องจากทางภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ได้มีมอเตอร์ของเดิมอยู่แล้ว ซึ่งทางทีมผู้ทดลองจึงนำมาใช้ และยังสามารถช่วยในการประหยัดงบประมาณในส่วนของการทดลอง

มอเตอร์เป็นปัจจัยหลักในการทำให้โรลเลอร์หมุน โดยมอเตอร์จากทางภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และเราได้เลือกควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ระบบควบคุมความเร็วแบบ PWM (Pulse Width Modulation) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น โดยใช้สวิตซ์ไฟอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัยดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 มอเตอร์และชุดคอนโทรล

มอเตอร์ที่เราเลือกนำมาใช้เป็น มอเตอร์ทดเกียร์แบบเฟือง MY-1016Z3 DC24V 350W 306RPM มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กำลังไฟ 350 วัตต์ แรงดันไฟ 24 โวลต์ ความเร็วสูงสุด 306 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากทางภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งมีแรงบิด $1.11 \text{ N} \cdot \text{m}$ มากกว่าแรงบิดขั้นต่ำ $30.72 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ ที่เราต้องการ



รูปที่ 3.19 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.สวิตชิง เพาเวอร์ ซัพพลาย Switching Power Supply 24 โวลต์ จ่ายกระแสได้ 20 แอมป์ มี
 พัดลมในตัวดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 สวิตชิง เพาเวอร์ ซัพพลาย

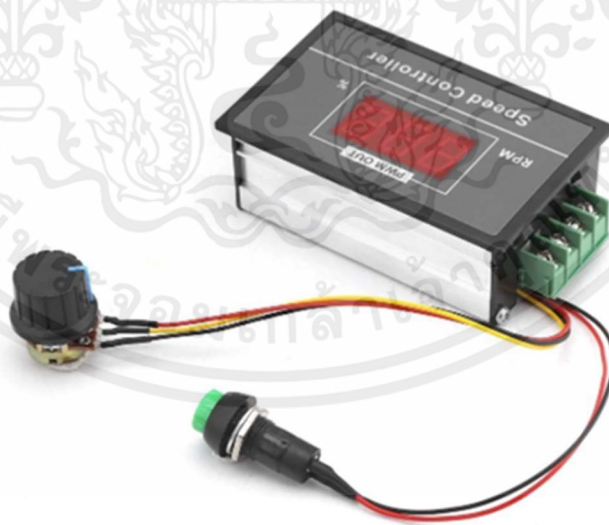
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.สายไฟเพาเวอร์ซัพพลาย PC Power Supply ใช้เป็นสาย AC Powerเพื่อต่อกลับไฟบ้าน และใช้เป็นสายภายในเครื่องคอนโทรลดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 สายไฟเพาเวอร์ซัพพลาย

4.โมดูลควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 6 ถึง 60 โวลต์ เป็นระบบแบบ PWM(Pulse Width Modulation)เป็นเทคนิคที่ใช้กันทั่วไปในการควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยใช้สวิทซ์ไฟอิล็กทรอนิกส์ ส่งกระแสไฟได้สูงสุด 30 แอมป์ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 โมดูลควบคุมความเร็วมอเตอร์

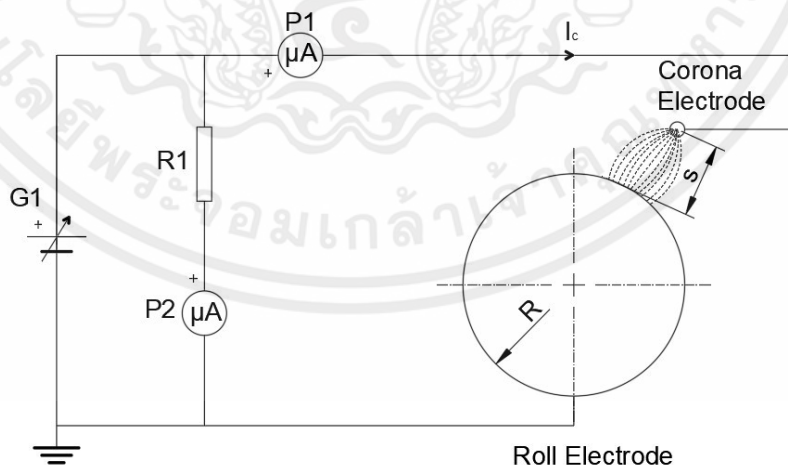
5. สวิตช์โยก 4 ขา 2 ทิศทาง เปิด-ปิด แบบล็อก โดยผู้จัดทำจะใช้สำหรับ เปิด-ปิด ตัวเพาเวอร์ ซัพพลาย โดยมีหน้าตา ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 สวิตช์โยก 4 ขา

3.4 วงจรการต่อเครื่อง

การออกแบบวงจรของเครื่อง ในการทดลองจะมีการวัดลักษณะกระแสแรงดันของอิเล็กทรอนิกส์โรนาลวดที่ช่องว่างการคายประจุต่างๆ โดยมีระยะ s ด้วยโดยจะเป็นตัวอย่าง ดังรูป 3.4 เพาเวอร์ซัพพลายจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจะติดตั้งตัวต้านทานไว้ด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดประกายไฟจนเกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ ตัวจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจะถูกวัดโดยไมโครแอมมิเตอร์ P2 ที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานไฟฟ้าแรงสูง โดยที่ IC คือกระแสโคโรนาที่วัดโดยไมโครแอมมิเตอร์ P1 ดังรูปที่ 3.4

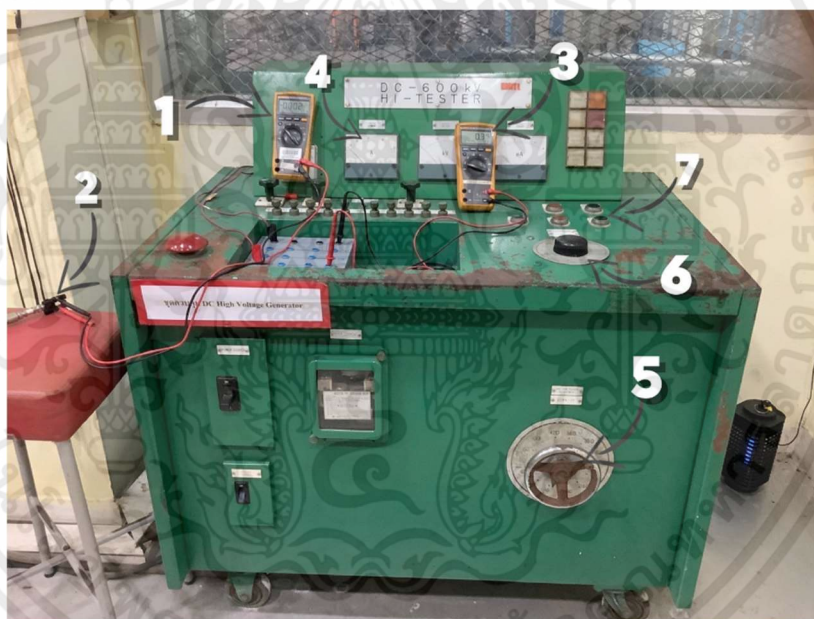


รูปที่ 3.24 แสดงไดอแกรมทางวงจรไฟฟ้าของเครื่อง Electrostatic separator

3.5 อุปกรณ์จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

3.5.1 ชุดควบคุม DC High Voltage Generator

1. multimeter อ่านค่าไฟฟ้าที่ Output ออกมา
2. สายที่ต่อจาก DC Divider เพื่อนำค่า Output ทางไฟฟ้าเข้าสู่ multimeter
3. multimeter อ่านค่าว่ามีไฟฟ้า AC เข้าสู่หม้อแปลงมัย
4. ตัวบอกลักษณะเตือน
5. ตัวปรับแรงดันทางไฟฟ้าแบบหยาบ
6. ตัวปรับแรงดันไฟฟ้าแบบละเอียด
7. สัญญาณเตือนกดเพื่อบอกว่าเครื่องกำลังทำงานอยู่



รูปที่ 3.25 ชุดควบคุม DC High Voltage Generator

3.5.2 หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสตรง 600 กิโลวัตต์



รูปที่ 3.26 หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสตรง

3.5.3 สายตัวต้านทานน้ำ หรือ Deioniz water Resistors

เป็นสายน้ำที่ผ่านขบวนการจัดไอออนของสารละลายทั้งหมด ทำให้ได้น้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากเกลือแร่ ไม่มีสารใดๆหลงเหลืออยู่ในน้ำอีก มีเพียงแต่โมเลกุลของน้ำบริสุทธิ์ล้วนๆ ซึ่งใช้เป็นตัวต้านทานขณะจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 สายตัวต้านทานน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 Sphere gap

โดยอุปกรณ์นี้จะเป็น STANDARD SPHERE GAP G-250V และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร อุปกรณ์ประเภทนี้จะมีช่องว่างอากาศระหว่างสองทรงกลมที่แตกต่างกัน หนึ่งในทรงกลมเชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลงแรงดันสูงกระแสตรงกับเครื่องที่ใช้ทดลอง และทรงกลมอีกอันที่เชื่อมต่อกับสายดิน ระยะห่างระหว่างทรงกลมทั้งสองนั้นเล็กมาก



รูปที่ 3.28 Sphere gap

3.5.5 แผ่นทองแดง

เลือกใช้สายแผ่นทองแดงนี้เพราะ มีค่าความต้านทานที่น้อย ทำให้ขณะจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง มีการสูญเสียน้อย



รูปที่ 3.29 แผ่นทองแดง

3.5.6 หลุมกราวด์ หรือ หลุมสายดิน

ใช้เป็นจุดศูนย์รวมสายดิน สายกราวด์จากเครื่องต่างๆ เพื่อส่งไฟฟ้าลงไปยังกราวด์ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 หลุมกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.7 R-C Voltage Divider

วงจรที่ใช้สำหรับแบ่งค่าแรงดันไฟฟ้าออกเป็นหลายๆ ค่า เพื่อใช้เลี้ยงอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในวงจร โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเพียงแหล่งเดียว โดยนำตัวต้านทาน (resistor) มาเป็นตัวแบ่งแล้วนำกฎของโอห์ม มาประยุกต์ใช้ในการแบ่งแรงดันไฟฟ้าในวงจร



รูปที่ 3.31 R-C Voltage Divider

3.5.8 ความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการไฟฟ้า

เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ดำเนินการทดลองจำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าแรงสูงในการดำเนินงานเราจึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกันในการดำเนินการเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์อันตรายต่อผู้ทดลอง

สำหรับงานเกี่ยวกับไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) ต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสมกับงาน เช่น ถุงมือยาง รองเท้าหุ้มส้นพื้นยาง หมวกแข็ง เป็นต้น และเนื่องจากต้องทำงานในบริเวณที่มีระยะห่างจากตัวเครื่องแยกน้อยกว่า 60 cm จะต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่มีฉนวนกันไฟฟ้าอย่างดี และการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องใช้ไฟฟ้าต้องใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับงานไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้น

รั้วศักย์ไฟฟ้าสูง high voltage เป็นอุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยไฟฟ้า โดยที่ทำการทดลองต้องยืนหลังรั้ว รั้วนี้จะทำหน้าที่เป็นศักย์ไฟฟ้าสูง เพื่อไม่ให้ไฟฟ้าที่กระจายอยู่รอบๆอุปกรณ์ มาทำอันตรายผู้ทำการทดลอง ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 high voltage

ไม้คายประจุ หรือ Discharge Rod เป็นอุปกรณ์สำหรับป้องกันไฟฟ้าที่ยังตกค้างในอุปกรณ์โดยการนำไปสัมผัสกับอุปกรณ์ต่างๆที่ผ่านการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 ไม้คายประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นมีราคาแพงและในประเทศไทยยังไม่มีโรงงานสำหรับรีไซเคิลแบตเตอรี่รถยนต์โดยเฉพาะ ทำให้การนำวัสดุจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมาใช้ในการทดลองนั้นยากและอันตรายเกินไปหากทำการคัดแยกแบตเตอรี่ด้วยตนเอง ผู้ทดลองจึงแก้ปัญหาด้วยการใช้วัสดุตัวอย่างที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนบางส่วนมาใช้ในการทดลองประกอบด้วย

ตารางที่ 3.1 ค่าการนำไฟฟ้าแร่ธาตุในตัวที่นำมาทดลอง [38]

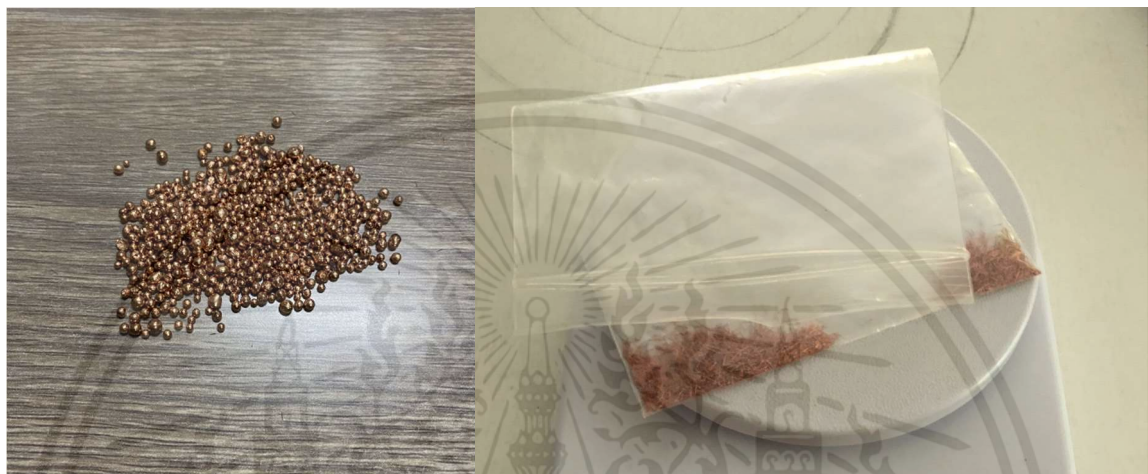
Material	Electric conductivity (10.E6 Siemens/m)
Lithium	10.8
Copper	58.7
Brass	15.9
Nickel	14.3

วัสดุจำพวกโพลีเมอร์และพลาสติก ได้แก่ HDPE (High density polyethylene) ,PVC (Polyvinylchloride), XLPE (Cross-Linked Polyethylene) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ยกตัวอย่างของฉนวนหุ้มสายไฟดังรูปที่ 3.34 ประเภท PVC ในการทดลองแทนวัสดุที่ใช้ในการทำแผ่นกั้นแบตเตอรี่ซึ่งปกติจะเป็นฟิล์มบางของโพลีเมอร์



รูปที่ 3.34 ฉนวนหุ้มสายไฟ

วัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดและแอโนดสำหรับรถยนต์พลังงานไฟฟ้าหรือสำหรับกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนจะใช้วัสดุประเภทสปีเนล $LiMn_2O_4$ และวัสดุประเภทโอลิซีน $LiFePO_4$ ซึ่งผู้ทดลองได้นำวัสดุจำพวก ทองแดง ทองเหลือง ดังรูปที่ 3.35 และ 3.36 เพื่อเป็นตัวแทนของวัสดุเหล่านี้ โดยเหตุผลที่เลือกใช้วัสดุเหล่านี้เป็นเพราะมีค่า Conductivity ใกล้เคียงกับ วัสดุที่อยู่ใน Black Mass



(a)

(b)

รูปที่ 3.35 (a) เม็ดทองแดง และ (b) สายทองแดง



รูปที่ 3.36 เม็ดทองเหลือง

3.7 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายสนามไฟฟ้า

มีการสังเกตการกระจายของสนามไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้น และความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าในระบบElectrical Separation โดยใช้วิธี Finite Elements โดยจำลองสภาพแวดล้อม โดยซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ซอฟต์แวร์นี้เป็นชุดการจำลอง ซึ่งใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์บางส่วนและไม่เชิงเส้นในหนึ่ง สอง หรือสามมิติ แบบจำลองที่คำนวณประกอบด้วยโรลเลอร์ที่หมุนได้ และต่อสายดินโดยมีตัวโหลดวงอยู่ด้านบนซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อจัดหาระบบที่มีอนุภาคเพื่อแยกออก และ แบบจำลองนี้ประกอบด้วยอิเล็กโทรดสองขั้ว: โครโนอิเล็กโทรดแบบหัวเข็มไม่เคลื่อนที่ โรลเลอร์รูปทรงกระบอกและแบบเคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อจำลองขนาดศักย์ไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่และนำไปวิเคราะห์หาขนาดสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าและทิศทางของสนามความเครียดทางไฟฟ้า โดยอาศัยการคำนวณจากความสัมพันธ์ Maxwell's Equations ในการ simulation ดังนี้

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

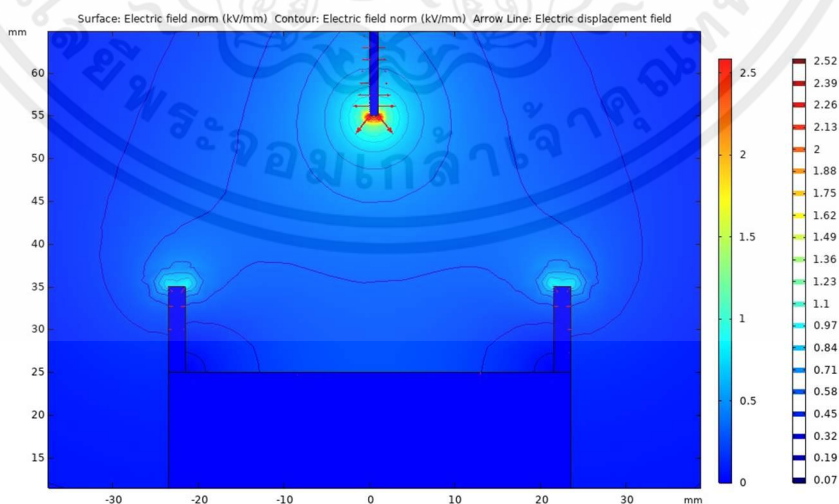
$$E = -\nabla V \quad (2)$$

เมื่อ D คือ Electric displacement (m)

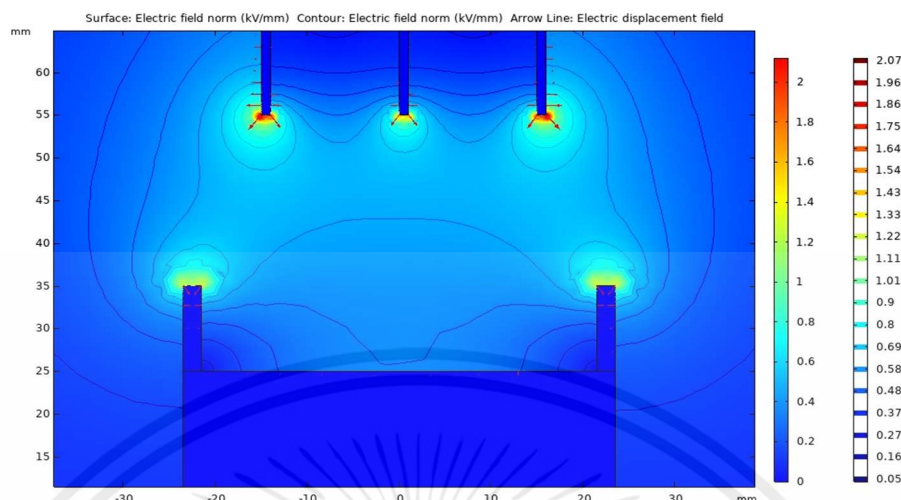
ρ คือ charge density (C/m^3)

E คือ Electric field (V/m)

V คือ voltage (V)



รูปที่ 3.37 การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า,โครโนอิเล็กโทรดแบบ 1 เข็ม ที่ 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.38 การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า, โครโนอิเล็กโทรดแบบ 3 เซ็ม ที่ 15 กิโลโวลต์

แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ในรูปที่ 3.37 และ 3.38 การกระจายความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสำหรับโครโนอิเล็กโทรดแบบ 1 เซ็ม และ 3 เซ็ม ที่อธิบายข้างต้น ความหนาแน่นสูงสุดของสนามสามารถพบได้บริเวณขอบของขั้วไฟฟ้าโครโนอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตาม พื้นผิวของโรลเลอร์ยังได้รับผลกระทบจากความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสูง ซึ่งหมายความว่าอนุภาคที่อยู่ในโรลเลอร์ในบริเวณนี้ อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้านี้เช่นกัน

3.8 ความสัมพันธ์ของโครโนอิเล็กโทรดชนิดเซ็มและพื้นที่หน้าตัดของโรลเลอร์

จากรูปที่ 3.37 การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า, โครโนอิเล็กโทรดแบบ 1 เซ็ม ที่ 15 กิโลโวลต์ จะพบว่าพื้นที่บริเวณขอบของโรลเลอร์ จะมีสนามไฟฟ้าค่อนข้างอ่อนมาก เราจึงเพิ่มอีก 2 เซ็ม บริเวณขอบของโรลเลอร์ทั้ง 2 ข้าง และจากรูปที่ 3.37 และรูปที่ 3.38 การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า, โครโนอิเล็กโทรดแบบ 1 เซ็ม และ 3 เซ็ม ที่ 15 กิโลโวลต์ จะพบว่ามีผลต่อการเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างโรลเลอร์และโครโนชนิดเซ็มเมื่อเพิ่มจำนวนเซ็มของอิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้เป็นไปตามความสัมพันธ์

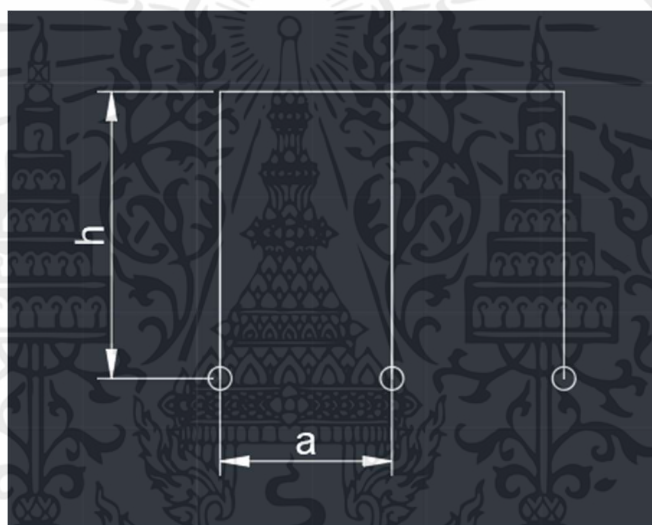
$$E = \frac{V}{d}$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

d คือ ระยะห่างของโคโรนาอิเล็กโทรดกับโรลเลอร์ (m)

ดังนั้นการออกแบบระยะห่างระหว่างโคโรนาอิเล็กโทรดชนิดเข็ม ในการทดลองนี้ใช้ระยะห่าง (a) 15 mm เพื่อเพิ่มปริมาณประจุไฟฟ้าให้กับหัวอิเล็กโทรดและเพิ่มความหนาแน่นของประจุทำให้ขนาดอิเล็กโทรดมีพื้นที่มากขึ้น โดยที่สนามไฟฟ้าคงที่ ที่ 15 kV สำหรับ 3 เข็ม เพื่อเพิ่มความเสถียรของสนามไฟฟ้าต่อความยาวของโรลเลอร์ซึ่งครอบคลุมบริเวณ 70 mm ของหน้าตัดโรลเลอร์และสามารถเพิ่มแรงทางไฟฟ้าให้แก้ววัสดุใดๆ เมื่อผ่านกระบวนการเพิ่มจำนวนประจุจากการเพิ่มเข็มของอิเล็กโทรดจากความสัมพันธ์ $F_e = qE$

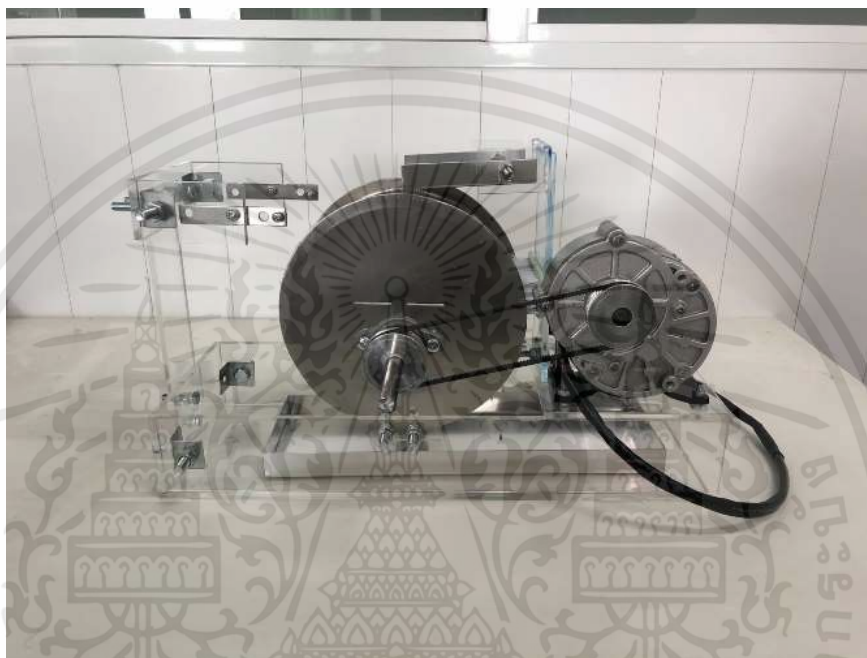


รูปที่ 3.39 รูปแสดงระยะของโคโรนาอิเล็กโทรดชนิดเข็ม

บทที่ 4

ขั้นตอนและผลการทดลอง

4.1 ผลการออกแบบเครื่อง Electrical separation



รูปที่ 4.1 เครื่องต้นแบบ Electrical Separation

การออกแบบเครื่อง Electrical Separation นั้นมีเงื่อนไขมากมายก็คือ ต้องสามารถแยกวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า(Conductor) และวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าได้ (Nonconductor) โดยการส่งวัสดุผ่านกรดกำมะถัน ซึ่งทำมุม 2 องศา กับแนวระดับและมีระบบสั่นสะเทือนเพื่อช่วยในการลำเลียงเนื้อวัสดุให้ผ่านกระบวนการ Ion Bombardment ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุชนิดใดๆที่ผ่านสนามไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าชั่วขณะ

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

4.2.1 เตรียมห้องปฏิบัติการไฟฟ้า

ในขั้นตอนกระบวนการเตรียมห้องปฏิบัติการไฟฟ้านั้น เพื่อให้ได้ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าเหมาะสมกับการทดลองและปลอดภัยต่อผู้ทดลอง การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองแกนหลักของการทดลอง คือ หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสตรง จะต่อออกมาด้วยตัวต้านทานน้ำ เพื่อไปต่อกับ Standard

Sphere Gap ต่อแยกไปสองทางคือ ตัวVoltage Dividerเพื่อเก็บค่าไฟฟ้า Out put ที่จ่ายออกมาเพื่อเก็บค่าทางไฟฟ้า และเครื่อง Electrical Separation โดยใช้สายทองแดง โดยที่ตัว Voltage Divide และเครื่อง Electrical Separation บริเวณข้างโรลเลอร์จะต่อลงหลุมสายดิน ดังรูปที่ 4.2



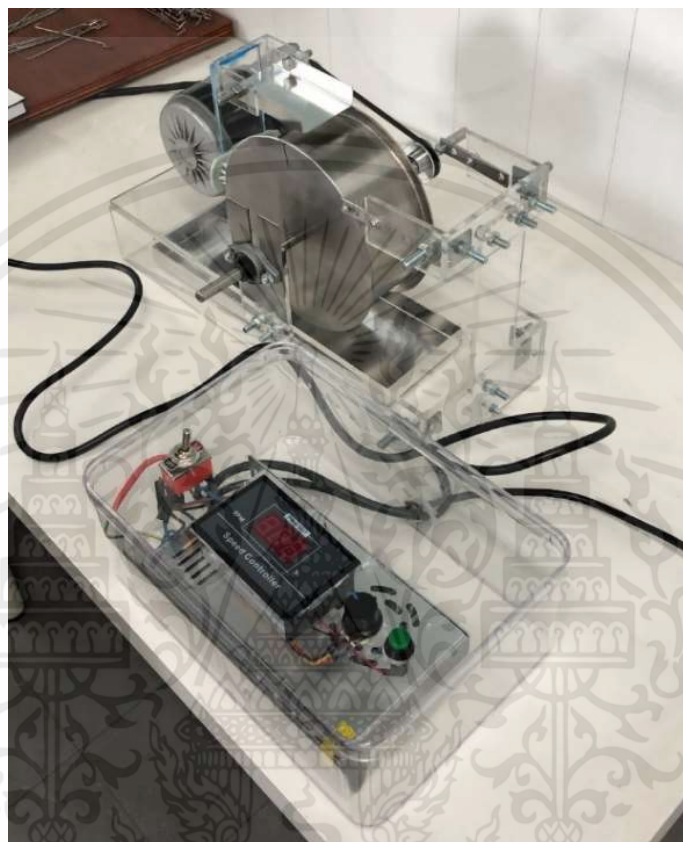
รูปที่ 4.2 แสดงพื้นที่และการติดตั้งการทดลองในภาพรวม



รูปที่ 4.3 แสดงการเตรียมการทดลองและบริเวณรั้วศักย์ไฟฟ้าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางผู้ทดลองจะติดตั้งรั้วศักย์ไฟฟ้าสูงดังรูปที่ 4.3 เพื่อป้องกันไม่ให้ไฟฟ้าที่ทำการทดลองกระจายออกมาบริเวณผู้ทดลองอันจะเกิดอันตรายระหว่างการทดลองได้ ติดตั้งตัวกล่องควบคุมมอเตอร์ และ ที่ควบคุมมอเตอร์สั้นไว้บริเวณด้านนอกเพื่อใช้ในการควบคุมการทดลอง



รูปที่ 4.4 ตัวเครื่องพร้อมแผงคอนโทรล

4.1.2 การทดลองเครื่องElectrical Separation

Standard Sphere Gap จะต่อสายทองแดงไปติดเข้ากับเครื่องทดลองElectrical Separation เพื่อให้บริเวณลวดเกิดกระบวนการ ion bombardment จะทำให้บริเวณลวดมีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง และจากนั้นนำสายดินไปติดตั้งที่บริเวณโรลเลอร์ ติดกับแผ่นเหล็กที่ทำขึ้นจาก Stainless-steel บริเวณด้านข้างโรลเลอร์โดยที่ทางผู้ทดลองได้เช็คแล้วว่าไฟฟ้าสามารถไหลถึงกันได้ระหว่างตัวจับสายดินกับตัวโรลเลอร์ ทำการจับสายดินเพื่อให้ตัวโรลเลอร์ มีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ ติดตั้งตัวกล่องควบคุมมอเตอร์กับมอเตอร์ของเครื่อง และติดตั้งมอเตอร์สั้นกับตัวภาคลำเลียงวัสดุ



รูปที่ 4.5 แสดงการบรรจุเนื้อวัสดุบนถาดลำเลียง

โดยผู้ทดลองนำเนื้อวัสดุไปใส่ในบริเวณถาดลำเลียงวัสดุ แล้วให้ผู้ทำการทดลองออกมานอกรั้ว ศักย์ไฟฟ้าสูง ทดลองแล้วส่งการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองเสร็จจะมีการนำไม้ค้ายประจุไปแตะบริเวณที่มีการจ่ายไฟฟ้าเพื่อทำการคายประจุไฟฟ้าและเพื่อความปลอดภัยของผู้ทดลอง สุดท้ายเมื่อเครื่องทำงานเสร็จสิ้นขั้นตอนของวัสดุที่นำมาคัดแยกจะตกลงไปในถาดรองรับและแต่ละช่องจะมีคุณสมบัติของการรองรับวัสดุที่ต่างกันประกอบด้วย

1. ช่อง A คือ ช่องซึ่งวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงและเมื่อวัสดุตกที่ช่อง A จะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า(Conductor)
2. ช่อง B คือ ช่องซึ่งวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้ารองลงมาจากวัสดุช่อง A และยังคงมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า(Conductor)
3. ช่อง C คือ ช่องซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าประเภทกึ่งตัวนำไฟฟ้า(Semiconductor)
4. ช่อง D คือ ช่องซึ่งวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำและเมื่อวัสดุตกที่ช่อง D จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุไม่นำไฟฟ้า (Non-conductor)



รูปที่ 4.6 แสดงภาดัดแยกวัสดุตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้า A, B, C และ D

4.3 ผลการทดลอง

การทดลองของเครื่อง Electrical separation ได้กำหนดเงื่อนไขการทำงานและบันทึกผลการทดลองที่กำลังไฟ 15 กิโลวัตต์ มุมของหัวโคโรนาอิเล็กโทรด 45 องศา กับตัวโรลเลอร์และระยะห่างของลวดโคโรนากับโรลเลอร์มีขนาด 25 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ใช้ในการทดลองคือ 1 มิลลิเมตรและใช้ความเร็วที่ 20 รอบต่อนาที ตลอดการทดลอง ซึ่งจะแตกต่างกันที่เนื้อวัสดุในการทดลองแต่ละกรณีคือแบบเนื้อวัสดุเดี่ยวและวัสดุเนื้อผสม

การหาประสิทธิภาพของการทดลอง

$$n_{ES} = \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุที่ได้ของ (Conductor or Non – conductor)}}{\text{น้ำหนักของวัสดุที่ได้รับ}} \times 100$$

การทดลองที่ 0 กิโลวัตต์ ของวัสดุชนิดเดี่ยว

การทดลองเพื่อแสดงพฤติกรรมของวัสดุ ก่อนที่จะเข้าสู่การทดลองโดยใช้สนามไฟฟ้า โดยเราจะใช้กำลังไฟที่ 0 กิโลวัตต์ กับวัสดุต่างๆ ได้แก่ ฉนวนหุ้มสายไฟ, เม็ดทองแดง, สายไฟทองแดง และทองเหลือง ดังรูปที่ 4.7 , 4.8 , 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองที่ 0 กิโลโวลต์ ของฉนวนหุ้มสายไฟ



รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองที่ 0 กิโลโวลต์ ของเม็ดทองแดง



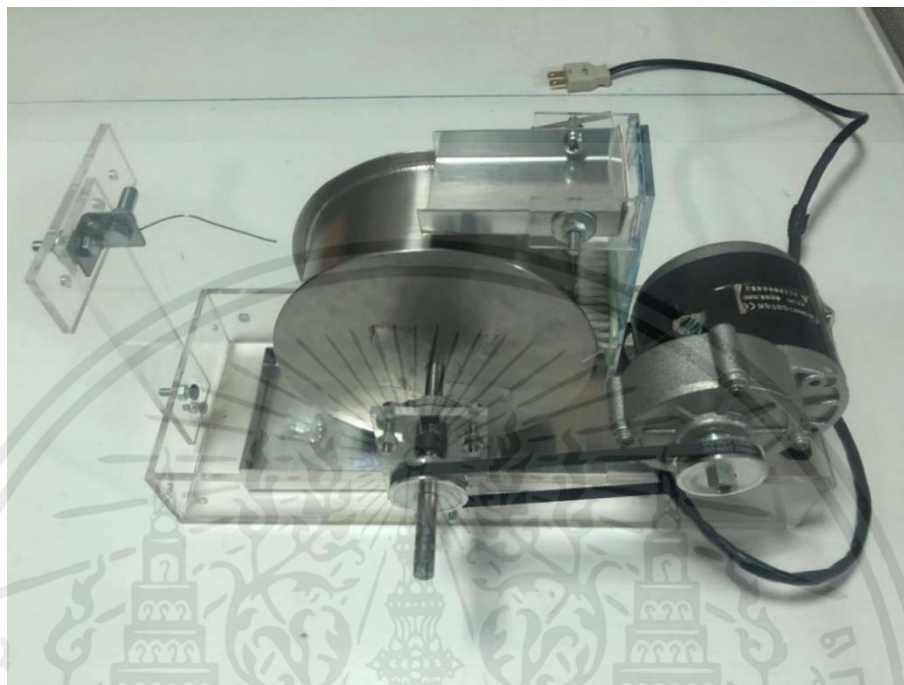
รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองที่ 0 กิโลโวลต์ ของสายไฟทองแดง



รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองที่ 0 กิโลโวลต์ ของทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การทดลองโคโรนาหัวเข็มแบบ 1 เข็ม ที่ 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 4.11 แสดงเครื่อง Electrical separation แบบ 1 เข็ม

1. การทดลองหัวโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 เข็ม กับ วัสดุชนิดเดียว



รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 5 กรัม



รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ เม็ดทองแดง 40 กรัม

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 เซ็ม กับเนื้อวัสดุชนิดเดียวคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 5 กรัม และทองแดง 40 กรัม

รอบการทดลอง	ครั้งที่1 (กรัม)				ครั้งที่2 (กรัม)				ครั้งที่3 (กรัม)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
วัสดุ												
ฉนวนหุ้มสายไฟ	0.05	0.75	2.50	1.70	0.05	0.80	2.60	1.55	0.06	0.79	2.50	1.56
เม็ดทองแดง	0.80	38.0	0.80	0.40	1.20	38.2	0.50	0.10	1.30	38.3	0.40	0
หมายเหตุ	ตัวเลขที่ขีดไป เพราะ เกิดการกระเด็นออก ทำให้เกิด ความคลาดเคลื่อน											

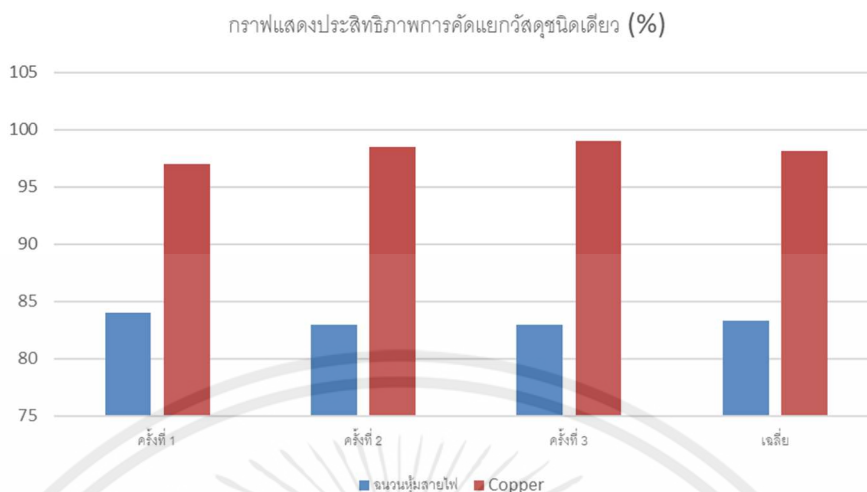
ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพของการทดลอง

$$n_{ES1} = \frac{5 - (0.05 + 0.75)}{5} \times 100$$

$$n_{ES} = 84\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุชนิดเดียว คือ

- ฉนวนหุ้มสายไฟคือ 84%, 83% และ 83% ตามลำดับ
- เม็ดทองแดงคือ 97%, 98.5%, และ 99% ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุชนิดเดียว

2.การทดลองหัวโครนาลีเก้โทรดแบบ 1 เซ็ม กับ วัสดุเนื้อผสม 2 ชนิด



รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองของวัสดุเนื้อผสมสองชนิดคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 5 กรัม และเม็ดทองแดง 20 กรัม

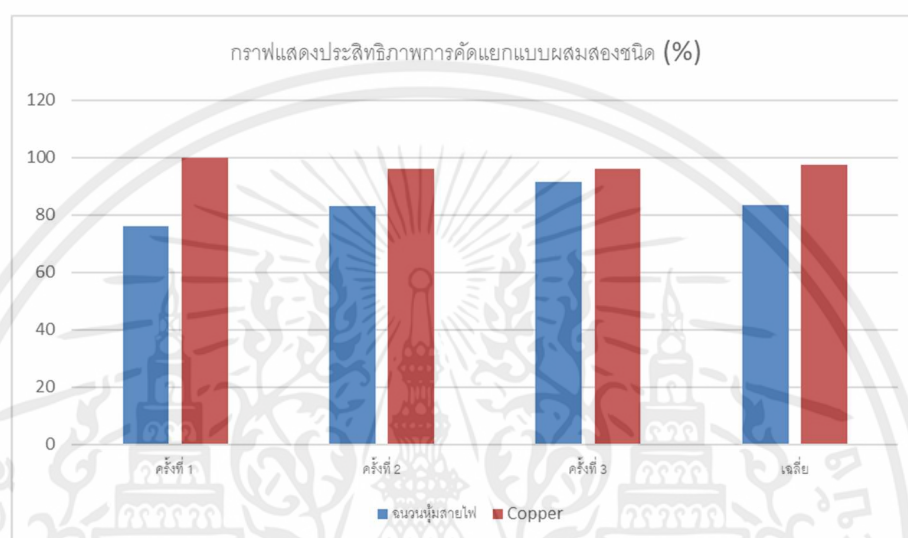
ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองหัวโครนาลีเก้โทรดแบบ 1 เซ็ม กับวัสดุเนื้อผสมสองชนิดคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 5 กรัม และเม็ดทองแดง 20 กรัม

รอบการทดลอง	วัสดุ	ครั้งที่1 (กรัม)				ครั้งที่2 (กรัม)				ครั้งที่3 (กรัม)			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1.ฉนวนหุ้มสายไฟ	1.	0.05	1.15	2.50	1.30	0.05	0.80	3.20	0.95	0.02	0.40	3.23	1.35
	2.เม็ดทองแดง	0.20	19.8	0	0	5.00	14.2	0.60	0.20	4.00	15.2	0.80	0

หมายเหตุ	ตัวเลขที่ขาดไป เพราะ เกิดการกระเด็นออก ทำให้เกิด ความคลาดเคลื่อน
----------	--

ดังนั้น ประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุเนื้อผสมสองชนิดคือ

1. ฉนวนหุ้มสายไฟ 76%, 83%, และ 91.6 % เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 83.53%
2. เม็ดทองแดง 100%, 93.4% และ 95.12% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 97.33%



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุผสมสองชนิด

3.การทดลองหัวโครโนอิเล็กโทรดแบบ 1 เข้ม กับ วัสดุเนื้อผสม 3 ชนิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

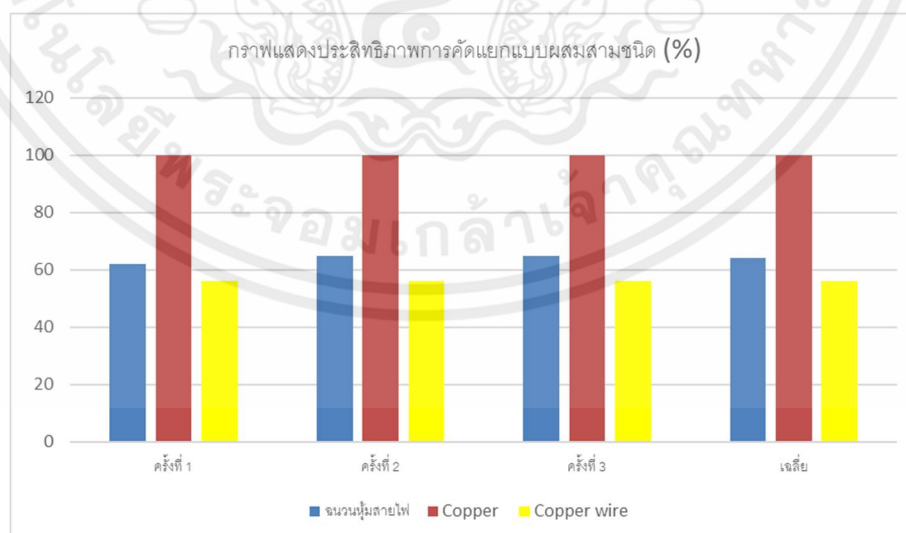
รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลองของวัสดุเนื้อผสมสามชนิดคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 5 กรัม เม็ดทองแดง 40 กรัม และสายไฟทองแดง 8 กรัม

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 เซ็ม กับวัสดุเนื้อผสมสามชนิดคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 5 กรัม ทองแดง 40 กรัม และสายไฟทองแดง 8 กรัม

รอบการทดลอง		ครั้งที่1 (กรัม)				ครั้งที่2 (กรัม)				ครั้งที่3 (กรัม)			
วัสดุ		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1.ฉนวนหุ้ม	1.	0.05	1.85	1.80	1.30	0.05	1.7	1.85	1.40	0.02	1.73	1.80	1.45
สายไฟ	2.	2.80	37.2	0	0	0.40	39.6	0	0	0.20	39.8	0	0
2.เม็ดทองแดง	3.	0.16	4.32	2.72	0.80	0.08	4.4	2.64	0.88	0.10	4.38	2.72	0.80
3.สายไฟทองแดง													
หมายเหตุ		ตัวเลขที่ขาดไป เพราะ เกิดการกระเด็นออก ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน											

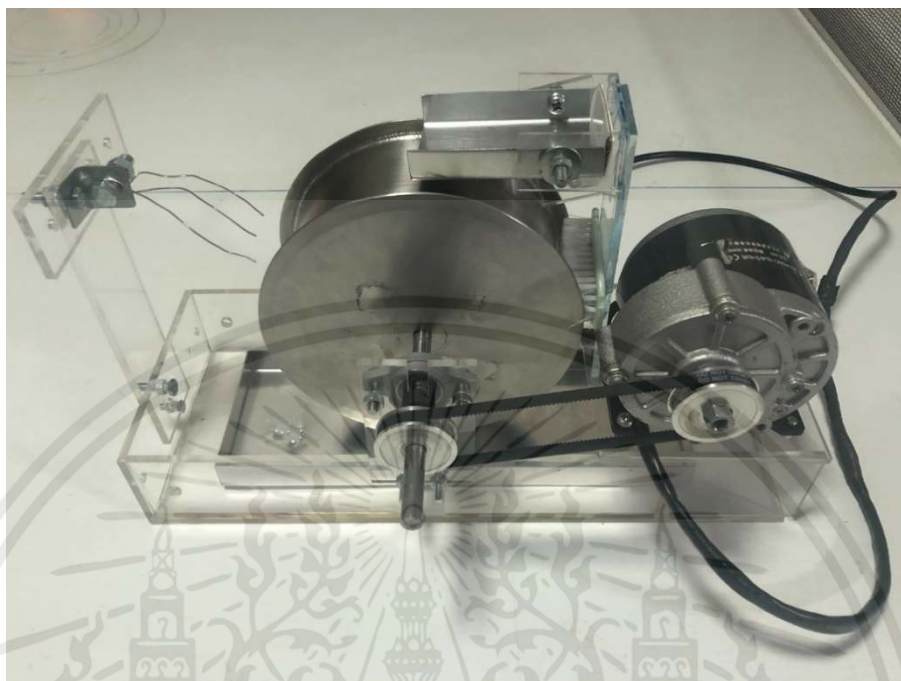
ดังนั้น ประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุเนื้อผสมสามชนิดคือ

1. ฉนวนหุ้มสายไฟ 62%, 65% และ 65% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 64%
2. เม็ดทองแดง 100%, 100% และ 100% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 100%
3. สายไฟทองแดง 56%, 56% และ 56% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 56%



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุผสมสามชนิด

4.3.2 การทดลองโคโรนาหัวเข็มแบบ 3 เข็ม ที่ 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 4.19 แสดงเครื่อง Electrical separation แบบ 3 เข็ม

1. การทดลองหัวโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 เข็ม กับ วัสดุชนิดเดียว



รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ สายไฟทองแดง 8 กรัม



รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ เม็ดทองแดง 40 กรัม



รูปที่ 4.23 แสดงผลการทดลองของวัสดุชนิดเดียวคือ เม็ดทองเหลือง 10 กรัม

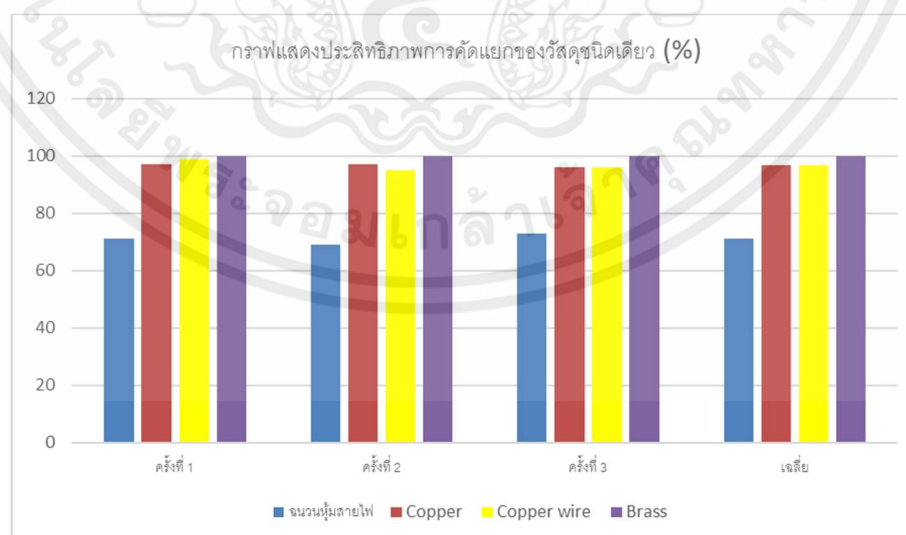
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 เข็ม กับเนื้อวัสดุชนิดเดียวคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 10 กรัม, สายไฟทองแดง 8 กรัม, เม็ดทองแดง 40 กรัม และ เม็ดทองเหลือง 10 กรัม

รอบการทดลอง	ครั้งที่1 (กรัม)				ครั้งที่2 (กรัม)				ครั้งที่3 (กรัม)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
วัสดุ												
ฉนวนหุ้มสายไฟ	0.10	2.50	2.90	4.20	0.30	2.60	3.30	3.60	0.10	2.40	2.70	4.60
สายไฟทองแดง	0.08	7.84	0.08	0	0.08	7.52	0.32	0.08	0.08	7.60	0.24	0.08
เม็ดทองแดง	0.70	9.00	0.30	0	0.80	8.90	0.20	0.10	0.10	9.50	0.10	0
เม็ดทองเหลือง	0.10	9.90	0	0	0.05	9.95	0	0	0.05	9.95	0	0
หมายเหตุ	ตัวเลขที่ขาดไป เพราะ เกิดการกระเด็นออก ทำให้เกิด ความคลาดเคลื่อน											

ดังนั้น ประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุชนิดเดียว คือ

- ฉนวนหุ้มสายไฟคือ 71%, 69% และ 73% ตามลำดับ
- สายไฟทองแดงคือ 99%, 95% และ 96% ตามลำดับ
- เม็ดทองแดงคือ 97%, 97% และ 96% ตามลำดับ
- เม็ดทองเหลืองคือ 100%, 100% และ 100% ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุชนิดเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดลองหัวโครนาลีเก้โทรดแบบ 3 เซ็ม กับ วัสดุเนื้อผสม 2 ชนิด



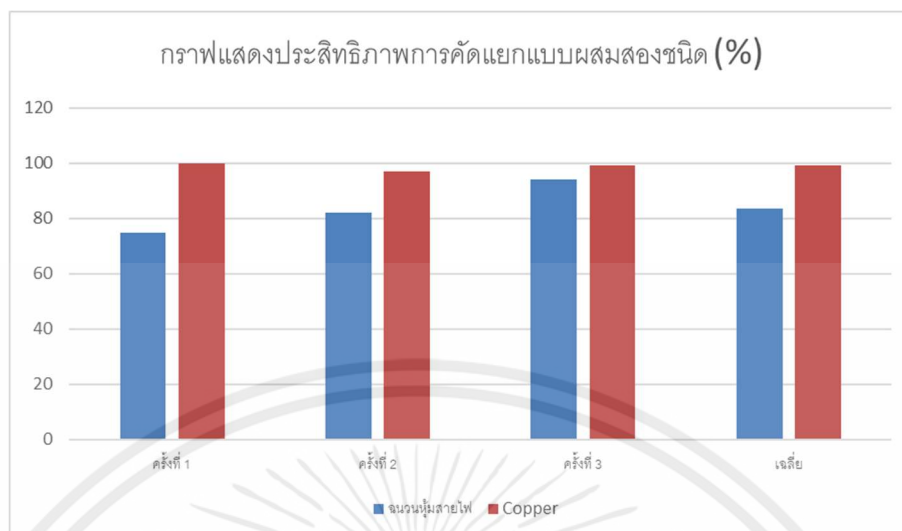
รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดลองของวัสดุเนื้อผสมสองชนิดคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 8 กรัม และทองแดง 40 กรัม

ตารางที่ 4.5 บันทึกผลการทดลองหัวโครนาลีเก้โทรดแบบ 3 เซ็ม กับวัสดุเนื้อผสมสองชนิดคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 8 กรัม และเม็ดทองแดง 40 กรัม

รอบการทดลอง	วัสดุ	ครั้งที่1 (กรัม)				ครั้งที่2 (กรัม)				ครั้งที่3 (กรัม)			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1.	ฉนวนหุ้มสายไฟ	0.16	1.76	2.72	3.28	0.24	1.28	3.28	3.28	0.08	0.24	4.08	3.44
2.	เม็ดทองแดง	1.20	38.8	0	0	0.80	38	0.40	0	0.40	39.6	0	0
หมายเหตุ		ตัวเลขที่ขีดไป เพราะ เกิดการกระเด็นออก ทำให้เกิด ความคลาดเคลื่อน											

ดังนั้น ประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุเนื้อผสมสองชนิด คือ

1. ฉนวนหุ้มสายไฟ 75%, 82% และ 94% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 83.67%
2. เม็ดทองแดง 100%, 97%, และ 100% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 99%



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการคัดแยกวัสดุผสมสองชนิด

3.การทดลองหัวโครนาลีเก้โทรดแบบ 3 เซ็ม กับ วัสดุเนื้อผสม 3 ชนิด



รูปที่ 4.27 แสดงผลการทดลองของวัสดุเนื้อผสมสามชนิดคือ จำนวนหุ้มสายไฟ 8 กรัม , สายไฟทองแดง 40 กรัม และทองแดง 40 กรัม

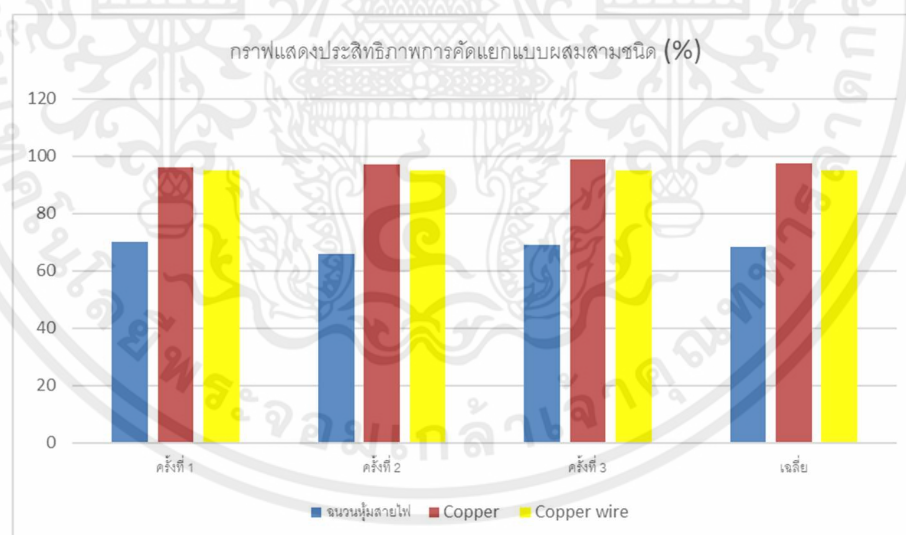
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 บันทึกผลการทดลองหัวโคโรนาอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3เข็ม กับวัสดุเนื้อผสมสามชนิดคือ ฉนวนหุ้มสายไฟ 8 กรัม,สายไฟทองแดง 10 กรัม และเม็ดทองแดง 40 กรัม

รอบการทดลอง	วัสดุ	ครั้งที่1 (กรัม)				ครั้งที่2 (กรัม)				ครั้งที่3 (กรัม)			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1.ฉนวนหุ้มสายไฟ	1.	0.08	2.16	2.00	3.60	0.08	2.48	2.64	2.64	0.08	2.32	2.72	2.80
2.เม็ดทองแดง	2.	0.80	37.6	1.20	0.40	0.40	38.4	1.20	0	0.40	39.2	0.40	0
3.สายไฟทองแดง	3.	0.20	9.30	0.20	0.20	0.10	9.4	0.20	0.20	0.20	9.30	0.20	0.20
หมายเหตุ	ตัวเลขที่ขาดไป เพราะ เกิดการกระเด็นออก ทำให้เกิด ความคลาดเคลื่อน												

ดังนั้น ประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุเนื้อผสมสามชนิด คือ

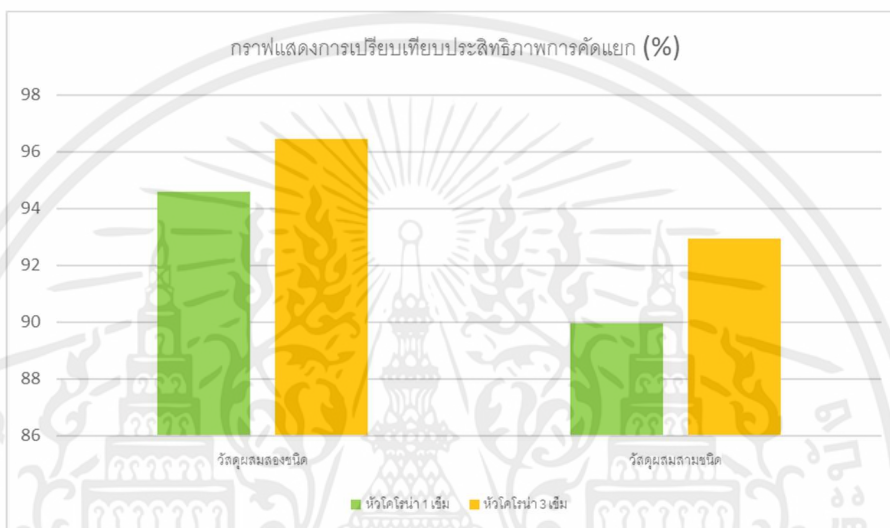
1. ฉนวนหุ้มสายไฟ 70%, 66%, 69% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 68.33
2. ทองแดง 96%, 97% และ 99% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 97.33%
3. สายไฟทองแดง 95%, 95% และ 95% เฉลี่ยแล้ว ประมาณ 95%



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกวัสดุผสมสามชนิด

4.4 เปรียบเทียบผลของลักษณะหัวโคโรน่า

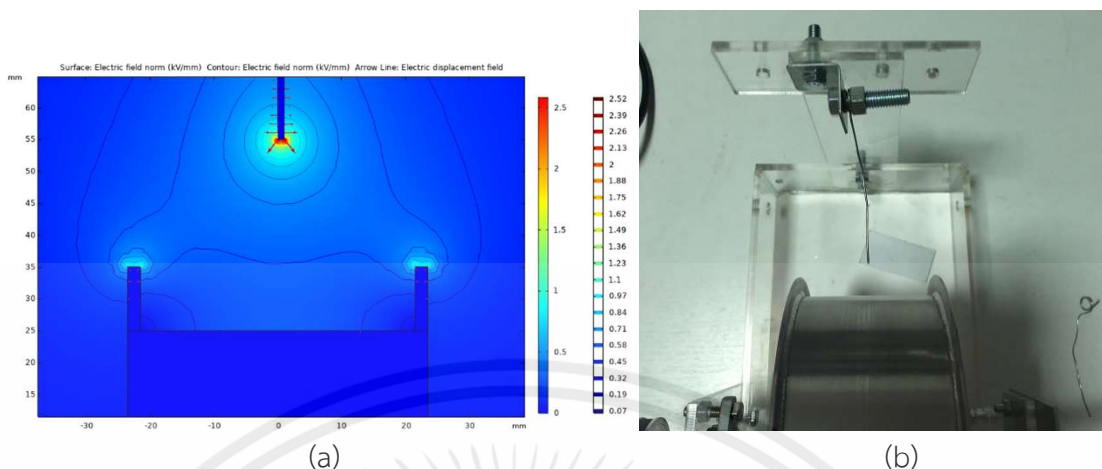
จากการทดลองพบว่าโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเข็มแบบ 3 เข็ม นั้นจะมีประสิทธิภาพ การทำงานที่ดีกว่าของ โคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเข็มแบบ 1 เข็ม ที่ 15 กิโลโวลต์ เนื่องจากโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเข็มแบบ 3 เข็ม มีการแผ่สนามความเครียดทางไฟฟ้าได้ดีกว่า โคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเข็มแบบ 1 เข็ม จากการทดลองทั้งหมด เราจะเขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตัดแยกได้ตามรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการตัดแยกระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ชนิดเข็มแบบ 1 เข็ม และ อิเล็กทรอนิกส์ชนิดเข็มแบบ 3 เข็ม

4.4.1 หัวโคโรน่าแบบ 1 เข็ม

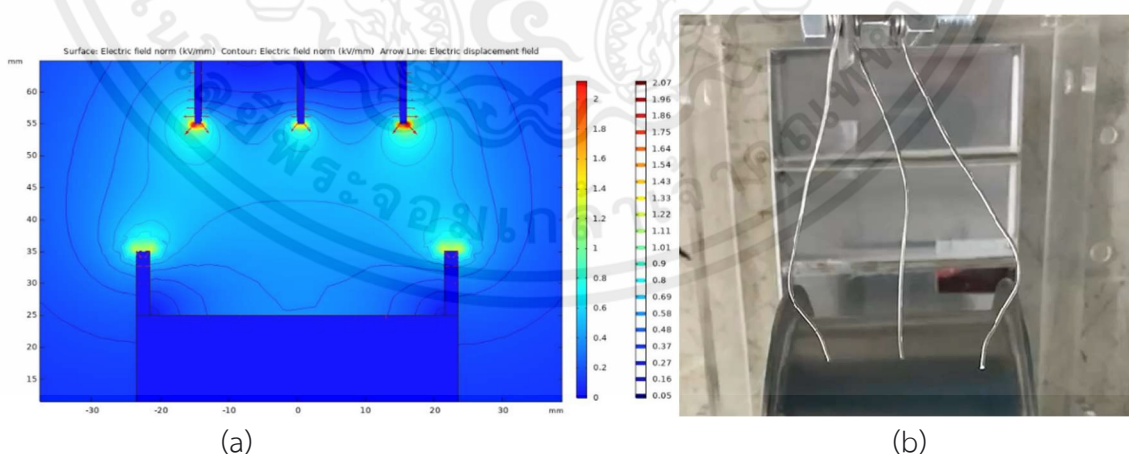
แบบ 1 เข็ม เป็นการแผ่สนามความเครียดทางไฟฟ้าได้ดีในบริเวณพื้นผิวของโรลเลอร์และมีความเครียดที่ไม่สูงบริเวณคิ๊บของโรลเลอร์ ที่ 15 กิโลโวลต์ ทำให้การแยกวัสดุ Conductive-Nonconductive จะได้ผลการแยกที่มีประสิทธิภาพเมื่อวัสดุเคลื่อนที่ผ่านสนามโคโรน่าที่บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่ผิวโรลเลอร์ แต่ประสิทธิภาพในการแยกจะลดลงมาก เมื่อวัสดุนั้นไหลผ่านบริเวณขอบของโรลเลอร์ เนื่องจากปัจจัยทางด้านการแผ่สนามไฟฟ้ามีกำลังค่อนข้างอ่อนกว่าบริเวณกึ่งกลาง ดังนั้นจึงทำให้วัสดุที่ไหลลงมาช่วงขอบของโรลเลอร์ ซึ่งเป็นจุดบอด ไม่ได้ผ่านสนามไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนของผลการทดลองนี้ได้



รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะผลของสนามไฟฟ้าผ่านการ Simulation (a) และหัวโคโรน่าแบบ 1 เซ็มซึ่งใช้ในการทดลอง (b)

4.4.2 หัวโคโรน่าแบบ 3 เซ็ม

แบบ 3 เซ็ม หัวโคโรน่าอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 เซ็มจะมีการแผ่ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่มีความคงตัวกว่า 1 เซ็ม และเมื่อวัสดุจำพวก Conductive-Nonconductive เคลื่อนที่ผ่านบริเวณสนามโคโรน่าจะทำให้ได้ผลการคัดแยกที่มีประสิทธิภาพที่ดีทั้งบริเวณกึ่งกลางและบริเวณขอบของโรลเลอร์แต่เนื่องจากการแผ่สนามความเครียดทางไฟฟ้าที่บริเวณคืบของโรลเลอร์ค่อนข้างสูง ทำให้เมื่อมีวัสดุไหลลงมาจากถาดลำเลียงทำให้เกิดเหตุการณ์ที่เนื้อวัสดุไหลมาติดขอบของโรลเลอร์ทำให้ได้ประสิทธิภาพลดลง



รูปที่ 4.31 แสดงลักษณะผลของสนามไฟฟ้าผ่านการ Simulation (a) และหัวโคโรน่าแบบ 3 เซ็มซึ่งใช้ในการทดลอง (b)

4.5 การหาอัตราป้อนวัสดุของตัวเครื่อง

จากการทดลองผู้ทดลองพบอัตราการป้อนวัสดุมีผลต่อระยะเวลาในการทดลอง ผู้ทดลองจึงได้ทดลองอีกรอบ เพื่อหาอัตราจากการทดลองของการคัดแยกวัสดุ 50 g ด้วยการทดสอบ 10 ครั้ง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 แสดงการทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุ

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	เวลาในการฟีดวัสดุ (วินาที)
1	50	25
2	50	20
3	50	14
4	50	16
5	50	19
6	50	13
7	50	24
8	50	15
9	50	14
10	50	14
เฉลี่ย	50	17.4

จากการทดลองอัตราการป้อนวัสดุจากการทดลองจะได้ 50 g/17.4 s ดังนั้นใน 1 ชั่วโมง จะได้
อัตราการฟีดวัสดุคือ 10.345 kg/h

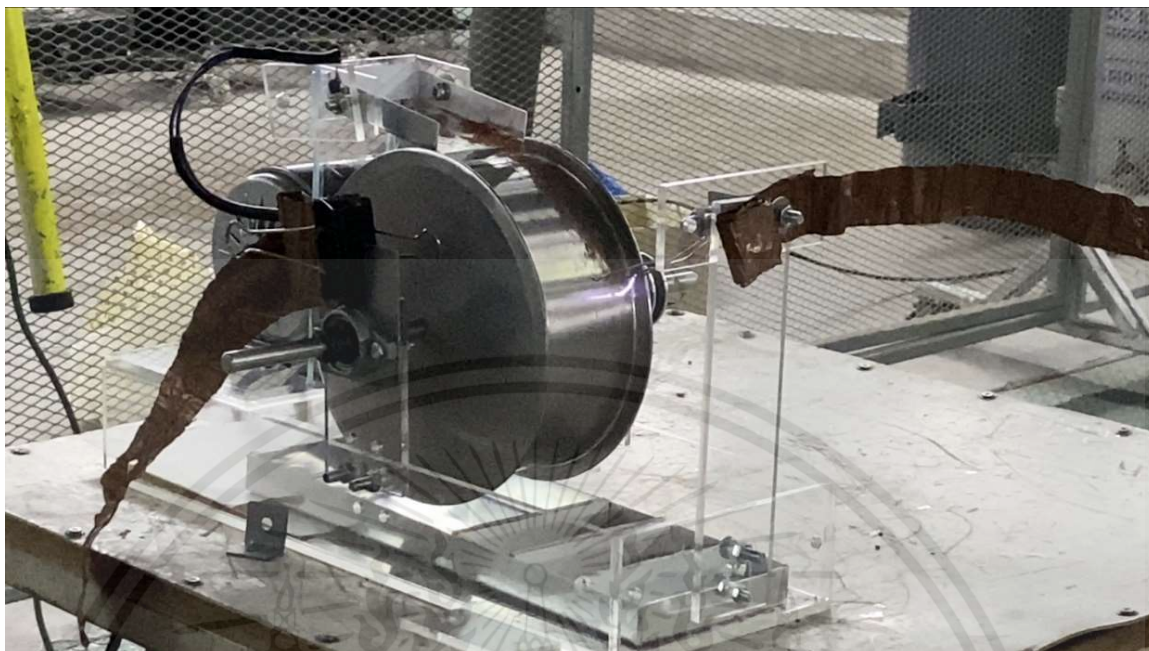
4.6 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองเราจะเห็นได้ว่าจะมีผลการทดลองที่ไม่เท่ากันทุกรอบเนื่องด้วยองค์ประกอบหลายๆอย่างไม่ว่าจะเป็น ตัววัสดุน้ำหนักของวัสดุที่มีน้ำหนักมากส่งผลต่อการคัดแยกเพราะทำให้แรงสนามไฟฟ้าไม่สามารถยึดวัสดุติดไว้กับโรลเลอร์ได้ ตัวถาดรองรับวัสดุ จากการทดลองนั้นทำให้ผู้ทดลองสังเกตว่าเวลาวัสดุตกลงมากระทบกับตัวถาดตัววัสดุจะกระเด็นออกอยู่ข้างไม่ว่าจะออกด้านข้างหรือข้ามช่องไปอีกช่องหนึ่ง ทำให้อาจจะเกิด Error เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นตัวน้ำหนักไม่ครบตามที่เราใส่ไปตั้งแต่แรกหรือ ควรจะลงที่ช่อง B แต่ตกลงมาแล้วกระเด็นไปลงช่อง C เป็นต้น



รูปที่ 4.32 เกิดการช็อตไฟฟ้ากัน ระหว่างตัวโรลเลอร์กับโคโรนาอิเล็กโตรดแบบ 1 เซ็ม เพราะมีระยะใกล้กันเกินไป

ในส่วนของการออกแบบ พบว่าการออกแบบตัวเครื่อง ระหว่างตัวโรลเลอร์กับโคโรนาอิเล็กโตรด มีผลกับการทำงานของเครื่องอย่างมากถ้าให้ระยะใกล้กันจนเกินไปอาจทำให้ตัวโรลเลอร์กับโคโรนาอิเล็กโตรดเชื่อมถึงกันทำให้เกิดการช็อตไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.1 และ ในส่วนโคโรนาอิเล็กโตรดแบบ 3 เซ็มจะเกิดการช็อตไฟฟ้ากับตัวโรลเลอร์บริเวณคิปรอลเลอร์ทำให้ต้องหยุดการทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูง กระแสตรง ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 4.33 เกิดการช็อตไฟฟ้ากัน ระหว่างตัวโรลเลอร์บริเวณคิบบโรลเลอร์ กับ โครโมนาอิเล็กทรอนิกส์แบบ3เข็ม เพราะมีระยะใกล้กันเกิน

ตัวคั่นช่องของถาดที่ต่ำเกินไปส่งผลให้วัสดุตกลงไปแล้วสามารถกระเด็นข้ามช่องไปอีกช่องหนึ่งได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดค่า Error ต่างๆที่ไม่ควรเกิดขึ้นมา และมีขนาดตัวคั่นที่หนาส่งผลให้บางที่เวลาวัสดุตกลงมาแล้วชนที่ตัวคั่นไม่ได้ตกลงไปที่ถาดแล้วกระเด็นไปลงยังช่องต่างๆ ตัวถาดปิดที่มีช่องไม่ตรงกับโรลเลอร์ เนื่องจากต้องเอียงหัวคั่นหนึ่งเพื่อให้ปากถาดนั้นอยู่บริเวณกึ่งกลางของโรลเลอร์พอดี ทำให้เวลาพีดวัสดุแล้ววัสดุจะไปกองอยู่ที่ข้างใดข้างหนึ่งไม่ไหลลงมาพร้อมกันหมด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาและพัฒนาเครื่อง Electrical Separation เพื่อตัดแยกวัสดุแบบเตอรีลิเทียมไอออนมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับวัสดุที่นำมาตัดแยกที่ใช้ในกระบวนการตัดแยกองค์ประกอบแร่ธาตุในแบบเตอรีลิเทียมไอออน เพื่อออกแบบโครงสร้างของตัวเครื่องต้นแบบในการตัดแยกให้เหมาะสมกับการตัดแยกวัสดุโดยใช้ Ion Bombardment เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตัดแยกของหัวโคโรน่าแบบเข็มทั้งแบบ 1 เข็มและแบบ 3 เข็มและเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องตัดแยกวัสดุโดยใช้ Ion Bombardment ในการตัดแยก จากการทดสอบและทดลองเครื่อง Electrical Separation เพื่อแยกวัสดุรีไซเคิลแบบเตอรีลิเทียมไอออนที่สร้างขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากผลการทดลองการแยกด้วยเครื่อง Electrical separation พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิดให้ผลการตัดแยกที่ต่างกันเมื่อผ่านกระบวนการ Ion bombardment ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่สุดเมื่อวัสดุตัวอย่างที่เป็นฉนวนหุ้มสายไฟที่มีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้าและวัสดุใดๆที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าสามารถแยกจากกันได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจากวัสดุตัวอย่างการทดลองทำให้เราสามารถนำแบบเตอรีลิเทียมไอออนเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลด้วยการตัดแยกผ่านกระบวนการ Ion bombardment ได้

2. การออกแบบโครงสร้างของเครื่องต้นแบบในการตัดแยก พบว่าเครื่องต้นแบบ Electrical separation สามารถที่จะใช้อะคริลิกในการขึ้นโครงสร้างมีความแข็งแรง ทนทานและแน่นอนหาพอต่อการรับน้ำหนักทั้งหมดของอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งบนตัวเครื่อง และจากที่ได้กำหนดเงื่อนไขของตัวเครื่องไปแล้วหา โหลดแรงบิดที่ใช้ในการขับ โรลเลอร์ ทำให้สามารถหาขนาดของ โหลดแรงบิดได้อยู่ที่ $30.72 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ เราจึงมอเตอร์ที่มีขนาด แรงบิดขั้นต่ำที่สามารถให้ได้ที่ $30.72 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ ซึ่งมอเตอร์ที่เรามีอยู่สามารถใช้ได้(ให้ชื่อมอเตอร์ไป) และมีส่วนประกอบอื่นๆเช่นเพลลา stainless-steel 10 มิลลิเมตร โรลเลอร์ ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และถาดลำเลียงวัสดุ และตัวเครื่องเองยังทนทานต่อศักย์ไฟฟ้าสูงที่ 15 กิโลวัตต์ได้ดี ซึ่งใช้งานและสามารถเก็บผลการทดลองรวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ และได้ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาอัตราการบ้อนวัสดุในการรีไซเคิลอยู่ที่ 50กรัม ภายในเวลา 17.4 วินาที ซึ่งแปลงเป็น 10.345 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3. จากการศึกษาผลการคัดแยกวัสดุด้วยหัวโคโรนาที่แตกต่างกันคือ แบบ 1 เข็มและแบบ 3 เข็ม พบว่าหัวโคโรนาทั้งสองชนิดที่ใช้ในการทดลองสามารถแยกวัสดุได้ทั้งคู่ ซึ่งประสิทธิภาพของหัวโคโรนาแบบ 1 เข็มมีประสิทธิภาพในการแยกเมื่อผสมวัสดุตัวอย่างสองและสามชนิดคือ 94.57% และ 89.96% ตามลำดับ และประสิทธิภาพของหัวโคโรนาแบบ 3 เข็ม มีประสิทธิภาพในการคัดแยกเมื่อผสมวัสดุตัวอย่างสองและสามชนิดคือ 96.44% และ 92.93% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการแยกวัสดุตัวอย่างผสม หัวโคโรนาแบบ 3 เข็มมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าหัวโคโรนาแบบ 1 เข็ม เนื่องจากปัจจัยของการแผ่สนามความเครียดทางไฟฟ้าจากตัวอิเล็กโทรดทั้งสองที่คงตัวกว่าแบบหัวโคโรนาแบบ 1 เข็ม

คณะผู้จัดทำคาดหวังว่าเมื่อตัวเครื่อง Electrical separation นี้ได้รับการพัฒนาต่อยอดจนสมบูรณ์จะสามารถช่วยให้สามารถคัดแยกแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนหรือ Black mass ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อวงการอุตสาหกรรมการรีไซเคิลแบตเตอรี่ในประเทศไทยในอนาคต โดยสามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพ มีความต่อเนื่องในการทำงาน เพื่อที่จะช่วยนำแร่ธาตุสำคัญภายในแบตเตอรี่นำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้งและสามารถลดปัญหาการเผาทำลายขยะแบตเตอรี่ได้

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาโครงการ

การศึกษาและพัฒนาเครื่องแยกวัสดุแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยเครื่อง Electrical separation ที่ได้สร้างขึ้นนี้เพื่อเป็นแนวทางให้กับเครื่องคัดแยกแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต่อไปในอนาคต โดยเครื่องคัดแยกแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ยังคงมีข้อจำกัดในการทำงานอยู่มาก ทั้งในส่วนของโรลเลอร์ควรออกแบบให้ส่วนคิบบริเวณขอบของโรลเลอร์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงหรือใช้เป็นวัสดุที่เป็นฉนวนในการทำคิบบริเวณขอบโรลเลอร์โดยไม่มีคิบบ เพื่อจะได้ไม่ทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าไปรวมกันบริเวณคิบบ เมื่อทดลองเข้ากับหัวโคโรนาอิเล็กโทรดแบบต่างๆ ตัวเครื่องควรทำให้มีขนาดกะทัดรัดเพื่อไม่ให้เวลาทำการทดลองนั้น ไม่ทำให้วัสดุเกิดการกระเด็นออกมาขณะทำการทดลองและควรออกแบบให้ง่ายต่อการทำความสะอาดและเก็บสิ่งตกค้างภายในตัวเครื่องหลังทดลองเสร็จสิ้น

ตัวถาดลำเลียงวัสดุ อุปกรณ์นี้ควรออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสม เพื่อที่จะบรรจุวัสดุเพื่อทดลองให้มากขึ้น ควรทำให้ตัวถาดลำเลียงวัสดุมีความมั่นคงและควรพัฒนาระบบส่งลำเลียงวัสดุให้มีความคงตัวในการป้อนวัสดุให้มีประสิทธิภาพหรือพัฒนาใช้ระบบสายพานในการลำเลียงวัสดุ ส่วนของถาดรองรับวัสดุที่ผ่านการคัดแยกจากระบวนการ Ion bombardment ควรออกแบบให้มีความกว้างพอดีกับตัวเครื่องและความลึกที่เหมาะสมในการรองรับวัสดุ เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างภายในตัวเครื่องทดลองทำให้วัสดุกระเด็น

ออกมาจากตัวถาดรองวัสดุได้ ตัวถาดรองรับวัสดุ ควรทำแผงกันแต่ละช่องที่สามารถปรับแต่งองศาเพื่อรองรับการคัดแยกวัสดุที่จำเพาะได้เพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถแบ่งแยกวัสดุตัวนำและไม่นำไฟฟ้าได้ชัดเจน

วัสดุที่ใช้ในการทดลองควรใช้ขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสมกับตัวเครื่องและขนาดของสนามไฟฟ้าเพื่อการคัดแยกที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกให้มากขึ้นควรติดตั้งหัว Electrostatic separation เข้าไปเพื่อเสริมแรงทางไฟฟ้าให้กับวัสดุตัวนำในการคัดแยกหลังจากผ่านกระบวนการ Ion bombardment และการทดลองควรทดลองค่ากำลังไฟที่มีค่าต่างกันหลายๆการทดลอง จากนั้นปรับความเร็วหลายระดับ เพื่อจับคู่ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับความเร็วในการหมุนของโรลเลอร์และสิ่งที่สำคัญที่สุดนั้นควรจะคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นอันดับแรกเสมอตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง อีกทั้งเครื่องคัดแยกแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนี้ควรมีการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อให้สามารถคำนวณได้ว่าเครื่องคัดแยกแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนี้สามารถสร้างและนำไปใช้ได้จริงหรือไม่ มีระยะคุ้มทุนเท่าใด เพื่อที่จะสามารถลงทุนในอุตสาหกรรมรีไซเคิลแบตเตอรี่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Korthauer, R. Handbuch Lithium-Ionen-Batterien; Imprint: Springer Vieweg; Berlin/Heidelberg, Germany, 2013;
- [2] Harper, G.; Sommerville, R.; Kendrick, E.; Driscoll, L.; Slater, P.; Stolkin, R.; Walton, A.; Christensen, P.; Heidrich, O.; Lambert, S.; et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 2019, pp. 575, pp. 75–86.
- [3] Werner, D.; Peuker, U.A.; Mütze, T. Recycling Chain for Spent Lithium-Ion Batteries. *Metals* 2020, 10, pp. 316.
- [4] Zeng, X.; Li, J.; Singh, N. Recycling of Spent Lithium-Ion Battery: A Critical Review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2014, 44, pp. 1129–1165.
- [5] Träger, T.; Friedrich, B.; Weyhe, R. Recovery Concept of Value Metals from Automotive Lithium-Ion Batteries. *Chem. Ing. Tech.* 2015, 87, pp. 1550–1557.
- [6] Julien, C.; Mauger, A.; Vijn, A.; Zaghbi, K. Lithium Batteries. In *Lithium Batteries*; Julien, C., Mauger, A., Vijn, A., Zaghbi, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016; pp. 29–68.
- [7] Lazuen, J. Batteries: The true drivers behind LFP demand – new safety standards, costs, IP rights, ESG & simplified battery pack designs. *Roskill News [Online]*. 25 June 2020.
- [8] Kwade, A.; Diekmann, J. *Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; ISBN 9783319705712.
- [9] Elwert, T.; Römer, F.; Schneider, K.; Hua, Q.; Buchert, M. Recycling of Batteries from Electric Vehicles. In *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health* 2018; pp. 289–321.
- [10] Adrian Samuila, Alexandru Iuga, Roman Morar, Vasile Neamtu, Lucian Dascalescu : Electrostatic technologies for materials recovery in high-intensity electric fields.

- [11] Dance, A.D., Morrison, R.D., 1992. Quantifying a black art: the electrostatic separation of mineral sands. *Miner. Eng.* 5 (7), pp. 751-765 .
- [12] Lockhart, N.C., 1984. Dry beneficiation of coal. *Powder Technol.* 40, pp. 17-42.
- [13] Kelly, E.G., Spottiswood, D.J., 1989a. The theory of electrostatic separations: a review—part II. Particle charging. *Miner. Eng.* 2 (2), pp. 193-205.
- [13.1] Kelly, E.G., Spottiswood, D.J., 1989b. The theory of electrostatic separations: a review—part III. The separation of particles. *Miner. Eng.* 2 (3), pp. 337-349.
- [13.2] Kelly, E.G., Spottiswood, D.J., 1989c. The theory of electrostatic separations: a review—part I. Fundamentals. *Miner. Eng.* 2 (1), pp. 33-46.
- [14] Manouchehri, H.R., et al., 2000. Review of electrical separation methods. Part 1: fundamental aspects. *Miner. Metall. Process.* 17 (1), pp. 23-36.
- [15] Edward, D., et al., 1995. The motion of mineral sand particles on the roll in high tension separators. *Mag. Elect. Sep.* 6, pp. 69-85
- [16] Butcher, D.A., Rowson, N.A., 1995. Electrostatic separation of pyrite from coal. *Mag. Elect. Sep.* 9, pp. 19-30.
- [17] Barry A. Wills , James A. Finch. , 2015 . *Wills' Mineral Processing Technology*, pp.397-406
- [18] Svoboda, J., 1987. *Magnetic Methods for the Treatment of Minerals*. Elsevier, Amsterdam, North Holland, Netherlands.
- [18.1] Svoboda, J., 1994. The effect of magnetic field strength on the efficiency of magnetic separation. *Miner. Eng.* 7 (5-6), pp. 747-757.
- [18.2] Svoboda, J., Fujita, T., 2003. Recent developments in magnetic methods of material separation. *Miner. Eng.* 16 (9), pp. 785-792.
- [19] Lisa Brückner, Julia Frank and Tobias Elwert. , *Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes*

- [20] Germain, M., et al., 2003. The application of new design concepts in high tension electrostatic separation to the processing of mineral sands concentrates, pp. 101-106
- [21] Elder, J., Yan, E., 2003. eForce—Newest generation of electrostatic separator for the mineral sands industry. Proceedings of Heavy Minerals 2003 Conference. South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa, pp. 63-70.
- [22] Dascalescu, L., et al., 1993. Corona-electrostatic separation: an efficient technique for the recovery of metals and plastics from industrial wastes. Mag. Elect. Sep. 4, pp.241-255.
- [23] [What Is Mild Steel? - Metal Supermarkets](https://www.metalsupermarkets.com/what-is-mild-steel/)
Online:https://www.metalsupermarkets.com/what-is-mild-steel/
- [24] Medles, K., L. Dascalescu, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and M. Younes. 2007. Experimental modeling of the electrostatic separation of granular materials. Particulate Science and Technology 25 (2): Page63–71.
- [25] Xue, M., J. Li, and Z. Xu. 2013. Management strategies on the industrialization road of state-of-the-art technologies for e-waste recycling: The case study of electrostatic separation—A review. Waste Management & Research 31 ;Page 30–40.
- [26] Andrei Catinean, Lucian Dascalescu, Mihai Lungu, Laurentiu Marius Dumitran & Adrian Samuila (2020): Improving the recovery of copper from electric cable waste derived from automotive industry by corona-electrostatic separation, Particulate Science and Technology
- [27] สายไฟฟ้าแรงดันสูง Archives - Phelps Dodge Cable (pdcable.com)
- [28] O.C. Ralston, Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids, Elsevier, Amsterdam, 1961.
- [29] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, L. Dascalescu, Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes, IEE Proc.Sci. Meas. Technol. 148 (2001) pp.47–54

- [30] A. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, I. Csorvasy, V. Neamtu, Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals, *J. Electrostat.* 23 (1989) pp.235–243
- [31] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, I. Suarasan, Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators, *J. Phys. D* 27 (1994) pp.1242–1251.
- [32] L. Dascalescu, A. Samuila, D. Rafiroiu, A. Iuga, R. Morar, Multiple-needle corona electrodes for electrostatic processes application, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 35 (1999) pp.543–548
- [33] A. Caron, L. Dascalescu, Numerical modeling of combined corona-electrostatic fields, *J. Electrostat.* 61 (2004) pp.43–55
- [34] A. Caron, L. Dascalescu, Numerical modeling of combined corona-electrostatic fields, *J. Electrostat.* 61 (2004) pp.43–55
- [35] A. Iuga, A. Samuila, M. Blajan, R. Belega, R. Morar, L. Dascalescu, Characterization of corona electrodes for electrostatic separation applications at small and large discharge gaps, in: *Conference Records of the IEEE/IAS Annual Meeting, Seattle, 2004*, pp.1967–1973.
- [36] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Suarasan, A. Samuila, D. Rafiroiu, Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators, *J. Electrostat.* 29 (1993) pp.211–215.
- [37] Abdelber Bendaouda,b, Lucian Dascalescu,, Marius Blajana, Adrian Samuilaa, Anca Stochitac, Petru V. Notingher ; Corona charging of granular layers of insulating particles at the surface of a grounded electrode
- [38] Conductive materials, metals and stainless steels properties table , https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=en_US