

การออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโฟรีติกของดินขาว

ปริญญานิพนธ์
ของ
กมลวรรณ อ่อนใจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2546
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโพสิทีฟของดินขาว

บทคัดย่อ
ของ
กมลวรรณ อ่อนใจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2546

กมลวรรณ อ่อนใจ. (2546). การออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบ

อิเล็กโตรโฟรีติกของดินขาว. ปรินูญานินพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิต
วิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
บัญชา ศิลปสกุลสุข, รองศาสตราจารย์ ดร.ณสรณ์ ผลโกค.

การออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโฟรีติกของดินขาว
ได้สร้างภาชนะบรรจุน้ำดิน แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงค่าความต่างศักย์คงที่ 0 -100 โวลต์
กระแสไฟฟ้าคงที่ 0 - 100 มิลลิแอมแปร์ และขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ผสมปูนพลาสเตอร์ อัตราส่วน
แกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 1:2 และ 1:3 แล้วทำการทดลองหาสภาพนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า
ซึ่งได้ค่าสภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ 6.84×10^{-1} Siemens/m 1.70×10^{-2} Siemens/m และ 2.30×10^{-6}
Siemens/m ตามลำดับ ในการทดสอบเครื่องมือเพื่อศึกษาขอบเขตการใช้งาน พบว่าค่าความ
ต่างศักย์ไฟฟ้าค่าเดียวกัน น้ำดินขาวอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดี
ที่สุด ที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าไกลที่สุดคือ 5 เซนติเมตร โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 84 ถึง
90 mA และนำไฟฟ้าได้น้อยที่สุดที่อัตราส่วนน้ำดิน 1:3 ที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าไกลที่สุด 15
เซนติเมตร ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 30 ถึง 36 มิลลิแอมแปร์ ผลการหาค่าความสัมพันธ์
ระหว่างมวลดินขาวที่เพิ่มขึ้นกับค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 10 -100 มิลลิแอมแปร์ในน้ำดินขาวอัตรา
ส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร พบว่าค่ามวลดินขาวที่เกาะติด
บนขั้วไฟฟ้าอัตราส่วนเดียวกัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่าของกระแสไฟฟ้า และที่กระแส
ไฟฟ้าค่าเดียวกัน ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:1 จะมีดินขาวมาเกาะมากที่สุด ส่วนผลค่าความ
หนาแน่นรวมจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์คงที่จาก 10 ถึง 90 โวลต์

A DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL KIT FOR STUDYING
ELECTROPHORETIC FORMING OF CHINA CLAY

AN ABSTRACT
BY
KAMOLWAN ONJAI

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Education degree in Physics
at Srinakharinwirot University
October 2003

Kamolwan Onjai.(2003). *A design and construction of an experimental kit for studying electrophoretic forming of china clay*. Master thesis, M.Ed.(Physics). Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst Prof. Buncha Silskulsuk, Asssoc. Prof. Dr. Nason Phonphok.

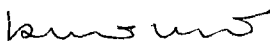
An experimental kit for studying electrophoretic forming of China clay was designed and constructed. The kit consisted of the following components: a slip container, a 0 –100 mA current regulated and a 0 –100 V voltage regulated DC power supply, and three graphite electrodes with the ratios of graphite powder to plaster of 1:1, 1:2 and 1:3. The current conductivities were determined by the graphite to plaster ratios. The determined electrode conductivities were 6.84×10^{-1} siemens/m 1.70×10^{-2} siemens/m and 2.30×10^{-6} siemens/m, respectively. The kit's applicable range was tested, it was found that at the same applied voltage, the highest current conductivity was obtained in 1:1 slip at the shortest electrode distance of 5 cm and direct current in the range of 84 to 90 mA. On the other hand, the lowest current conductivity was obtained in 1:3 slip at the electrode distance of 15 cm and direct current of 30 to 36 mA. The measurement of the relation of clay mass to constant direct current applied at 0-100 mA in 1:1 slip at an electrode distance of 5 cm indicated that the mass of clay forming on the same ratio electrodes was proportional to the applied direct current. At the same direct current, 1:1 graphite electrode provided the highest deposition. The result of clay bulk density was nearly steady when 10 - 90 V voltages were applied.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูป
แบบอิเล็กทรอนิกส์โพรีติกของดินขาว

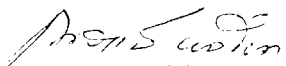
ของ
นางสาวกมลวรรณ อ่อนใจ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร หะวานนท์)
วันที่7.....เดือน.....ตุลาคม.....พ.ศ. ๒๕๕๖

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลปสกุลสุข)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณสรณ์ ผลโคก)

 .....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(รองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทศร)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ นิรันดร์ พงษ์พันธุ์)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้ ความช่วยเหลือในการให้คำปรึกษา และช่วยแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ อย่างดี จากผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลปสกุลสุข ซึ่งเป็นประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ดร.ณสรณ์ ผลโภค กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ที่ชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย แก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในระหว่างการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์อรุณย์ อินทศร และอาจารย์นิรันดร์ พงษ์พันธุ์ คณะกรรมการสอบปากเปล่า ที่ได้กรุณาเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไข จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้ และได้นำความรู้มาใช้ในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ อีกทั้งขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาอรรถวิทยา คณะเกษตรศาสตร์บางพระ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล จ.ชลบุรี ที่ช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ และให้ใช้ห้องปฏิบัติการในการทำการทดลองเก็บข้อมูล จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาผู้ให้กำเนิด และอาจารย์ยิ่งยศ จิตจักรที่คอยช่วยเหลือในการแปลเอกสาร และคอยให้กำลังใจอยู่เสมอจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท วิชาเอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

กมลวรรณ อ่อนใจ

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
	ภูมิหลัง	1
	ความมุ่งหมายของการวิจัย	3
	ขอบเขตของการวิจัย	3
	นิยามศัพท์เฉพาะ	4
	ความสำคัญของการวิจัย.....	5
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
	ความหมายและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส...	6
	กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรไลซิส (Faraday' s law of Electrolysis)....	8
	ดิน (Clays).....	14
	อิเล็กทรอนิกส์.....	20
3	วิธีดำเนินการศึกษาค้นคว้า.....	51
	การออกแบบสร้างชุดทดลอง	51
	การออกแบบการทดลอง.....	55
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	64
5	สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	98
	สรุปผลการทดลอง	98
	อภิปรายผลการทดลอง.....	99
	ข้อเสนอแนะ	100
	บรรณานุกรม.....	104
	ประวัติย่อผู้วิจัย	107

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจังหวัดลำปาง ที่ผ่านการล้างแล้ว.....	17
2 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนโครงสร้างของแกรไฟต์.....	25
3 ผลการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสที่ 0-100 มิลลิแอมป์ที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ.....	73
4 ผลการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0-100 โวลต์ที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ.....	74
5 ตารางแสดงผลการทดลองหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของแกรไฟต์.....	77
6 ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของน้ำดินขาวที่อัตราส่วนต่าง ๆ	79
7 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วต่างกัน.....	81
8 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 รวมกับน้ำดินขาว ในอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน	83
9 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:2 รวมกับน้ำดินขาว ในอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน.....	85
10 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:3 รวมกับน้ำดินขาว ในอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน.....	87
11 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์กับกระแสไฟฟ้า.....	90
12 ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของพาราฟิน.....	94
13 ผลการทดลองหาความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยความต่างศักย์คงที่ 10- 100 โวลต์.....	95

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ภาพวาดการเกิดกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์.....	7
2 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าในสองชั้นถัดมาจากผิวอนุภาค.....	13
3 สมบัติทางเคมีของดินขาวเกาหลีที่มีปฏิกิริยาแตกตัวในขั้นตอนการเผา.....	15
4 แสดงโครงสร้างของดิน Kaolinite ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้น.....	16
5 แสดงการเกิด Flocculated ของดินที่มีสภาพเป็นกรด และการเกิด Deflocculated ของดินที่มีสภาพเป็นเบส.....	18
6 แท่งตัวนำต่อความต่างศักย์ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า	22
7 แสดงการจัดเรียงตัวแบบ Hexagonal ของแกรไฟต์.....	25
8 แสดงลักษณะการทำงานเป็นสวิตช์ของทรานซิสเตอร์.....	26
9 วงจรเรกติไฟเออร์ชนิดเต็มคลื่น.....	27
10 รูปคลื่นความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในวงจรเรกติไฟเออร์ชนิด เต็มคลื่น.....	30
11 วงจรเรกติไฟด์เออร์แบบบริดจ์และทิศทางการไหลของกระแส.....	31
12 วงจรกรองชนิดตัวเก็บประจุในวงจรเรกติไฟเออร์.....	32
13 รูปคลื่นกระแส ที่ทางออกของวงจรที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรอง.....	32
14 รูปคลื่นสามเหลี่ยม.....	33
15 วงจรเรกติไฟเออร์ที่ให้ความต่างศักย์สองขั้ว.....	34
16 แสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเรกติฟายเออร์.....	35
17 ลักษณะเฉพาะของซีเนอร์ไดโอด.....	36
18 วงจรเรกติฟายเออร์ชนิดซีเนอร์ไดโอด.....	37
19 จุดตัดของเส้นกราฟ I_Z , V_L กับลักษณะเฉพาะของซีเนอร์ไดโอด.....	38
20 การใช้โอปแอมป์ในการควบคุมความต่างศักย์กระแสตรงให้มีค่าคงที่	41
21 วงจรควบคุมความต่างศักย์ ที่มีทรานซิสเตอร์เป็นตัวผ่านกระแสและจำกัดกระแส...	42
22 วงจรควบคุมกระแสด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าบวกของโอปแอมป์.....	44
23 วงจรควบคุมกระแสโดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลบกับทางเข้าลบของโอปแอมป์.....	46
24 วงจรเรกติฟายเออร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่ผ่านกระแสไฟฟ้า.....	47
25 วงจรตั้งเวลาสำหรับเปิดปิดอุปกรณ์.....	50
26 กล้องใส่ดินขาว.....	51
27 ส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าบวก.....	52

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
28 ส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่เป็นขั้วบวกของวงจร.....	53
29 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่เป็นขั้วลบของวงจร.....	54
30 แผนผังวงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC Powersupply).....	54
31 แบบหล่อขั้วไฟฟ้า.....	55
32 การต่อชุดอุปกรณ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ความต่างศักย์ไฟฟ้า กับ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 7 9 11 13 15 เซนติเมตร.....	58
33 การต่อชุดอุปกรณ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับมวลของดิน.....	59
34 การต่อชุดอุปกรณ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่นรวม ของดินขาว.....	61
35 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้ความต่างศักย์คงที่ 0 – 100 โวลต์.....	65
36 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ 0 -100 มิลลิแอมป์.....	67
37 วงจรตั้งเวลา ปิดเปิดสวิตช์สำหรับตั้งเวลาการทดลอง.....	70
38 ส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าบวกของวงจร.....	75
39 ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่เป็นขั้วลบของวงจร.....	75
40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 ในน้ำดินขาว อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3.....	84
41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:2 ในน้ำดินขาว อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3.....	86
42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:3 ในน้ำดินขาว อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3.....	88
43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และมวลดินขาวที่เกาะติดบน ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน แกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1.....	91
44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และมวลดินขาวที่เกาะติดบน ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน แกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:2.....	91
45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และมวลดินขาวที่เกาะติดบน ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน แกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:3.....	92

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- | | | |
|----|---|----|
| 46 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และมวลดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนทั้งสามอัตราส่วน ในน้ำดินขาวอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1..... | 93 |
| 47 | กราฟแสดงความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:1 โดยความต่างศักย์คงที่ 0 – 80 โวลต์..... | 96 |
| 48 | กราฟแสดงความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:2 โดยความต่างศักย์คงที่ 0 – 80 โวลต์..... | 96 |
| 49 | กราฟแสดงความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:3 โดยความต่างศักย์คงที่ 0 – 80 โวลต์..... | 97 |

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์เซรามิกส์นับว่าได้รับความนิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ด้านงานศิลปกรรม ด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ผลิตภัณฑ์พวกจาน ชาม แก้วน้ำ เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้องปูผนังและปูพื้น เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ บางอย่างได้มาจากการสกัดสินแร่ตามธรรมชาติ เช่น ดินต่าง ๆ (Clays) หินฟันม้า (Feldspar) หินควอตซ์ (Quartz) และทราย เป็นต้น นอกจากนี้วัตถุดิบบางอย่างได้มาจากการสกัดจากสินแร่ตามธรรมชาติ แล้วนำมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น อลูมินา (Alumina) ซึ่งได้จากแร่บอกไซต์ (Bauxite) ในขณะที่วัตถุดิบบางชนิดได้จากการสังเคราะห์ เช่น แบเรียมไททาเนต $BaO \cdot TiO_2$ ¹

วิธีที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่สำคัญและใช้งานกันอย่างแพร่หลายมีด้วยกัน 4 วิธี คือ²

1. การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว (Plastic Forming) เป็นการขึ้นรูปด้วยมือโดยอาศัยความเหนียวของเนื้อดิน เช่น การขึ้นรูปโดยใช้แป้นหมุน
2. การหล่อแบบ (Slip Casting) เป็นวิธีการหล่อผลิตภัณฑ์โดยการเทน้ำดินลงไปแม่แบบที่ทำด้วยปูนพลาสเตอร์เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์จะค่อย ๆ ก่อตัวขึ้นเมื่อแม่แบบปูนพลาสเตอร์ที่ใช้เริ่มดูดน้ำเข้าสู่ตัวเนื้อแบบ

¹ปรีดา พิมพ์ขาวขา. (2532). เซรามิกส์. หน้า 41.

²ภาวดี อังค์วัฒนะ. (ม.ป.ป.). "กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์," ในความรู้เบื้องต้นด้านวัสดุ. หน้า 25-26.

3. การอัดแห้ง (Dry Pressing) เป็นวิธีการที่นำผงเซรามิกส์หรือดินที่มีส่วนผสมตามต้องการเติมลงในแบบอัดซึ่งมักจะทำด้วยเหล็กกล้า จากนั้นก็ใช้แรงอัด ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

4. การหล่อแบบโดยการหลอมเหลวแล้วเทแบบ (Fusion Casting) ทำได้โดยหลอมเนื้อผลิตภัณฑ์ในเตาความร้อนสูงแล้วเทลงในแบบโลหะหรือทราย

นอกจากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ทั้ง 4 กระบวนการแล้ว ยังมีอีกกระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการขึ้นรูปโดยอาศัยการเกาะติดแบบอิเล็กโตรโฟเรติก (Electrophoretic Deposition, EPD.) ซึ่งเป็นกระบวนการทางสารแขวนลอย เนื้อของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์จะค่อย ๆ ก่อตัวขึ้นจากสารแขวนลอยโดยใช้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง ลักษณะของรูปร่างผลิตภัณฑ์เซรามิกส์จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของขั้วไฟฟ้าที่สารแขวนลอยเข้าไปเกาะ¹ จากการศึกษาผลงานการวิจัยของโยชิฮิโร ฮิราตาและคณะ (Yoshihiro Hirata and other) ในปี 1991 พบว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโฟเรติกนี้เป็นวิธีการที่ดีสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ กล่าวคือ ใช้เวลาน้อย สามารถควบคุมความหนาของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ให้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่มาก² และจากการศึกษาผลงานการวิจัยของ เอ็ม มิสเซล และคณะ (M.Mihailescu and other) ในปี 1991 พบว่าค่าปริมาณการเกาะติดของวัสดุโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโฟเรติกจะเพิ่มขึ้นตามค่าของกระแสไฟฟ้าหรือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลา และค่าความหนาแน่นของน้ำดินที่ใช้ โดยใช้ค่าความต่างศักย์ในการวิจัย 0 -48 โวลต์³

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรโฟเรติก กับดินขาว (China clay, Kaolin) โดยดินขาวจัดเป็นดินอีกประเภทหนึ่งที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ และมีแหล่งดินขาวที่พบในประเทศไทยหลายแหล่งได้แก่ ดินขาวระนอง ดินขาวลำปาง ดินขาวปราจีนบุรี ดินขาวนราธิวาส ดินขาวอุดรดิตถ์ ดินขาวเชียงราย และดินขาวพะโต๊ะ³

¹ Sarkar, P. & Nicholson, P.S. (1996). "Electrophoretic Deposition (EPD): Mechanism, Kinetics, and Application to ceramic," in *Journal of the American Ceramic Society*, V.79. p 1987.

² Hirata, Y. and others. (1991). "Forming of Alumina Powder by Electrophoretic Deposition," In *Journal of the Ceramic Society of Japan*. V.99. p 105.

³ Mihailescu, M. and Others. (1991). "Electrophoretic Behavior of Ceramic Sanitaryware Slips," In *Journal of Inceram*. V.40. p 166.

^{3a} ไพจิตร อังศิริวัฒน์. (2541). *เนื้อดินเซรามิกส์*. หน้า 43.

ความมุ่งหมายของการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายในการสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์กับดินขาว โดยชุดทดลองมีสมบัติดังนี้คือ

1. ดินขาวสามารถเกาะติดบนขั้วไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ในช่วง 0-100 มิลลิแอมป์ เพื่อศึกษาการเกาะติดของมวลดินขาวบนขั้วไฟฟ้า ที่เป็นผลมาจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
2. ดินขาวสามารถเกาะติดบนขั้วไฟฟ้าโดยใช้ความต่างศักย์คงที่ในช่วง 0 -100 โวลต์ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับค่าความหนาแน่นรวมของดินขาว

ขอบเขตการวิจัย

สร้างชุดการทดลองเพื่อศึกษาการขึ้นรูปดินขาวลำปางแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่ง มีขอบเขตของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. สร้างภาชนะใส่น้ำดินขาวมีความจุประมาณ 7,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นฉนวนไฟฟ้า และมีสเกลบอกระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า
2. สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ที่สามารถให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ ในช่วงความต่างศักย์ต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 – 100 โวลต์ และสามารถตั้งค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วง 0 – 100 มิลลิแอมแปร์
3. ใช้แกรไฟต์ (Graphite) ผสมกับปูนพลาสเตอร์เป็นขั้วไฟฟ้า ที่อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์โดยมวล 1:1 1:2 1:3 และมีตัวยึดขั้วไฟฟ้าที่สามารถถอดเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าได้โดยสะดวก
4. ทำการทดสอบสมบัติสภาพนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่อัตราส่วนผสมระหว่างแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ โดยมวลที่อัตราส่วน 1:1 1:2 และ 1:3
5. ทดสอบอุปกรณ์กับดินขาวลำปางในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 0 – 100 โวลต์ และที่กระแส 0 – 100 มิลลิแอมแปร์ เพื่อศึกษาขอบเขตการใช้งานของอุปกรณ์
6. ทดสอบชุดทดลองที่สร้างขึ้นกับดินขาวลำปาง ที่อัตราส่วนของดินต่อน้ำโดยมวล 1:1 และใช้กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 10 -100 มิลลิแอมแปร์โดยเพิ่มค่าครั้งละ 10 มิลลิแอมแปร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับมวลที่เกาะบนขั้วไฟฟ้าทั้งสามอัตราส่วน ซึ่งใช้เวลาและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากัน

7. ทดสอบชุดทดลองที่สร้างขึ้นกับดินขาวลำปาง ที่อัตราส่วนของดินต่อน้ำโดยมวล 1:1 ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 -100 โวลต์โดยเพิ่มครั้งละ 10 โวลต์ และวัดค่าความหนาแน่นรวมของดินขาวที่เกิดจากกระบวนการเกาะติดแบบอิเล็กโตรโฟรีติกบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ทั้งสามอัตราส่วน

นิยามศัพท์เฉพาะ

การเกาะติดแบบอิเล็กโตรโฟรีติก (Electrophoretic Deposition, EPD.)

หมายถึง การที่เนื้อของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์จะก่อตัวขึ้นจากสารแขวนลอยโดยใช้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง รูปร่างของผลิตภัณฑ์จะเป็นไปตามลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ใช้¹

กระบวนการอิเล็กโตรโฟรีซิส (Electrophoresis Process)

หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุที่เป็นสารแขวนลอย ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า²

กระบวนการอิเล็กโตรลิซิส (Electrolysis Process)

หมายถึง กระบวนการขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยาในทิศทางที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ โดยใช้กระแสไฟฟ้า

ความพรุนทั้งหมด (Total Porosity) ของดิน

หมายถึง ปริมาตรทั้งหมดของส่วนที่ไม่ใช่ของแข็งของดินเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมดของดิน ซึ่งเป็นสมบัติที่บ่งถึงผลรวมของความจุน้ำและความจุอากาศของดิน³

¹ Sarkar, P. & Nicholson, P.S. (1996). "Electrophoretic Deposition (EPD): Mechanism, Kinetics, and Application to Ceramic," in *Journal of the American Ceramic Society*. V.79. p. 1987.

² Ibid. P 1987

³ สำออง ศรีนิลทา. (2517). *คู่มือปฏิบัติการปฏิกิริยาเคมีเบื้องต้น*. หน้า 21-22.

ความสำคัญของการวิจัย

1. ได้ชุดอุปกรณ์สำหรับศึกษาการเกาะติดแบบอิเล็กทรอนิกส์ไตรโพรติก
2. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับมวลของดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าในช่วง 10 ถึง 100 มิลลิแอมแปร์
3. ทราบความหนาแน่นรวมของดินขาวที่เกิดจากกระบวนการเกาะติดแบบอิเล็กทรอนิกส์ไตรโพรติก
4. ผลทดลองอาจเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับการผลิตเซรามิกส์ โดยกระบวนการเกาะติดแบบอิเล็กทรอนิกส์ไตรโพรติกที่มีดินขาวเป็นองค์ประกอบได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

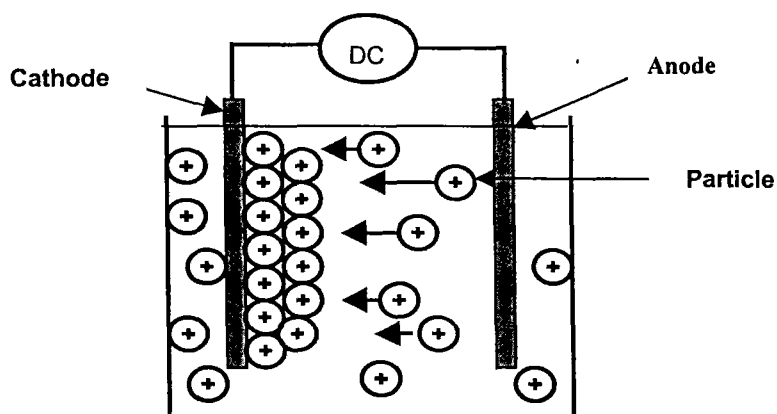
ในการวิจัยเพื่อสร้างเครื่องมือสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กโทรโฟรีติกกับดินขาว มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัยดังนี้

1. ความหมายและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโทรโฟรีซิส
2. กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรไลซิส (Faraday's law of Electrolysis)
3. ดิน (Clays)
4. อิเล็กทรอนิกส์

1. ความหมายและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโทรโฟรีซิส

กระบวนการเกาะติดแบบอิเล็กโทรโฟรีติก เป็นกระบวนการทางสารแขวนลอย ซึ่งเนื้อของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์จะเกิดขึ้นโดยการใช้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไปตามลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ จากภาพประกอบที่ 1 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำให้เกิดการเกาะติดบนขั้วไฟฟ้าชนิดตรงข้ามกับประจุของตัวอนุภาค กระบวนการขึ้นรูปแบบอิเล็กโทรโฟรีติกเป็นการรวมกันของสองกระบวนการคือ กระบวนการอิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis Process) และกระบวนการเกาะติด (Deposition Process) ซึ่งกระบวนการเกาะติด คือ การรวมตัวกันของอนุภาคแขวนลอยในของเหลวให้เป็นก้อนและมีมวลที่หนาแน่นขึ้น¹

¹ Sarkar, P. & Nicholson, P.S. (1996). "Electrophoretic Deposition (EPD): Mechanism, Kinetics, and Application to Ceramic," in *Journal of the American Ceramic Society*, V.79. p. 1987.



ภาพประกอบ 1 ภาพวาดการเกิดกระบวนการอิเล็กโตรฟอเรติก

ที่มา: Portho Sarkar and Patrick S. Nicholson. (1996, April). "Electrophoretic Deposition (EPD.): Mechanisms, Kinetics, and Application to Ceramics," *American Ceramic Society*. 1996(79) : 1987.

กระบวนการอิเล็กโตรฟอเรซิส เป็นคำมาจากภาษากรีก "Elektron" ซึ่งเป็นต้นศัพท์ของ Electric (ไฟฟ้า) และ "Phore" มาจากภาษาละติน ที่มีความหมายตรงกับภาษาอังกฤษว่า Bearer (ผู้นำไป) ดังนั้นอิเล็กโตรฟอเรซิส จึงหมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยสนามไฟฟ้า หรือสนามไฟฟ้าทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่¹ หรืออาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ กระบวนการอิเล็กโตรฟอเรซิสเป็นการเคลื่อนที่ของสารแขวนลอยที่มีประจุ ภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง

นอกเหนือจากกระบวนการอิเล็กโตรฟอเรซิสที่เกิดขึ้นในน้ำดินแล้วนั้น ยังมีปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นพร้อมกันคือ²

1. ปรากฏการณ์อิเล็กโตรออสโมซิส (Electroosmosis Phenomenon) เป็นปรากฏการณ์เมื่อให้กระแสไฟฟ้า

¹ประกอบ เอี่ยมสะอาด. (2515). การวิเคราะห์(อินออเทนิค แคตชั่น) โดยอาศัย (อิเล็กโตรฟอเรติกเทคนิค) *Electrophoretic technique*. หน้า 5.

²Mihailescu, M. and Others. (1991). "Electrophoretic Behavior of Ceramic Sanitaryware Slips," In *Interceram Review*. V.40. p.166.

ผ่านวัสดุพูน ซึ่งภายในรูปพูนมีของเหลวที่มีไอออนละลายอยู่ ของเหลวจะเกิดการเคลื่อนที่ออกจากวัสดุพูนนั้น อิเล็กโทรออสโมซิสเป็นกระบวนการที่เสริมกับกระบวนการอิเล็กโทรฟรีซิส กล่าวคือ ชั้นของอนุภาคที่เกาะบนขั้วไฟฟ้า จะจับตัวเป็นของแข็งที่มีความหนาแน่น โดยน้ำจะถูกขับออกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรออสโมซิส

2. ปรากฏการณ์การตกตะกอน (Sedimentation Phenomenon) คือกระบวนการที่อนุภาคแยกตัวออกจากของเหลว เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเป็นอุปสรรคในกระบวนการอิเล็กโทรฟรีซิส อนุภาคจะแยกตัวออกจากของเหลว

2. กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรไลซิส (Faraday' s law of Electrolysis)

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่ากระบวนการ อิเล็กโทรฟรีซิสคือการเคลื่อนที่ของอนุภาคนขนาดเล็กที่อยู่ในของเหลว เนื่องมาจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง กระบวนการนี้มีความคล้ายคลึงกับกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis Process) ทั้งนี้กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส คือกระบวนการขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยาในทิศทางที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ โดยใช้กระแสไฟฟ้า หรือ คือปฏิกิริยาเคมีที่ใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อแยกสารประกอบ เช่น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปในสารละลาย NaCl ทำให้เกิด Na^+ และ Cl^- เคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า ที่มีศักย์ไฟฟ้าตรงข้ามกับตัวประจุ คือ Na^+ เคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ ส่วน Cl^- เคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกของวงจร เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการถ่ายเทมวลสารขึ้น

กฎของฟาราเดย์ที่เกี่ยวกับอิเล็กโทรไลซิส (Faraday's law of Electrolysis) เป็นกฎที่เกี่ยวกับการถ่ายเทมวลสารด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการศึกษาของ Michael Faraday ในปี ค.ศ. 1834 กฎของฟาราเดย์นี้แยกได้เป็น 2 ข้อด้วยกันคือ

กฎข้อที่ 1 ปริมาณมวลสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะแปรผันตรงกับปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารละลายที่นำไฟฟ้า

$$m \propto Q$$

$$Q = It$$

จะได้

$$m = kIt$$

เมื่อ m คือมวลของสารที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้า

Q คือปริมาณประจุไฟฟ้า

I คือกระแสไฟฟ้า

t คือเวลาที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าในสารละลาย

k เป็นค่าคงที่ ที่เรียกว่าค่าสมมูลเคมีไฟฟ้า (Electrochemical equivalent, ECE) ของสารละลาย

กฎข้อที่ 2 ในการผ่านกระแสไฟฟ้าปริมาณเท่ากันลงในสารละลายนำไฟฟ้าต่างชนิดกัน มวลของสารที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลสมมูลของสารนั้น

นั่นคือ

$$m \propto \delta$$

โดยที่ δ คือมวลสมมูลเคมีของสาร

$$\delta = \frac{M}{Z}$$

เมื่อ M คือมวลโมลาร์

Z คือขนาดประจุของแต่ละไอออนของสารที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้า

จากกฎของฟาราเดย์ทั้งสองข้อ ได้ว่า

$$\begin{aligned} m &\propto Q \delta \\ m &= \frac{1}{F} Q \delta \end{aligned} \quad \text{-----(1)}$$

เมื่อ F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} F \text{ (Faraday)} &= eN_A \\ &= (1.602 \times 10^{-19} \text{ C})(6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 96487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} \end{aligned}$$

เมื่อ e คือประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

N_A คือเลขอะโวกาโดร (Avogadro's Number)

หรือ 1 ฟาราเดย์ = 96500 C.mol^{-1}

1 คูลอมป์ = 1 Ampere .Second

แทนค่า $\delta = \frac{M}{Z}$ ในสมการที่ 1 จะได้ว่า

$$m = \frac{QM}{ZF}$$

$$\frac{m}{M} = \frac{It}{ZF}$$

เพราะฉะนั้น $n = \frac{It}{ZF} = \frac{m(w)}{M} \dots\dots\dots(2)$

เมื่อ n คือจำนวนโมลของสารที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเกาะติดแบบอิเล็กโตรโฟรีติกของดินขาว เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการดังกล่าว จึงทำการวิเคราะห์กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับกระบวนการอิเล็กโตรโฟรีติกดังนี้¹

มวลของการเกาะติด m ของอนุภาคนิต i ต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าคือ

$$\frac{m}{M} = \frac{Q_i}{z_i F} = \frac{J_i t}{(z_i e) N_A} \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ M คือมวลของอนุภาคนิต i ที่มีจำนวนเท่ากับเลขอะโวกาโดร

i คือชนิดของอนุภาคที่เป็นพาหะนำไฟฟ้า

Q_i คือประจุที่พาไปโดยอนุภาค i

J_i คือกระแสต่อหน่วยพื้นที่ หรือความหนาแน่นกระแสของอนุภาค i

z_i คือจำนวนประจุของ 1 อนุภาค

¹ Hirata, Y. and others. (1991). "Forming of Alumina Powder by Electrophoretic Deposition," In *Journal of the Ceramic Society of Japan*. V.99. p. 105-106.

เปลี่ยนรูปสมการ 3 ใหม่ได้ว่า

$$m = \frac{1}{(z_i e)} \frac{M}{N_A} J_i t \quad \dots\dots\dots(4)$$

น้ำหนักของอนุภาค i หนึ่งอนุภาค ($\frac{M}{N_A}$) เท่ากับ

$$\frac{M}{N_A} = \frac{C_i}{\gamma_i} \quad \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อ C_i คือน้ำหนักของอนุภาค i ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

γ_i คือจำนวนอนุภาค i ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

นำสมการที่ 5 แทนลงในสมการที่ 4 จะได้ว่า

$$m = \frac{C_i}{\gamma_i (z_i e)} J_i t \quad \dots\dots\dots(6)$$

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า หาได้จากสมการ

$$J_i = \sigma_i \left(\frac{d\phi}{dx} \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อ σ_i คือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของอนุภาค i

$\frac{d\phi}{dx}$ คือสนามไฟฟ้า

แทนค่าสมการที่ 7 ในสมการที่ 6 จะได้ว่า

$$m = \frac{C_i}{\gamma_i (z_i e)} \sigma_i \left(\frac{d\phi}{dx} \right) t \quad \dots\dots\dots(8)$$

สภาพนำไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_i = \gamma_i (z_i e) B_i \quad \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อ B_i คือค่าความสามารถในการเคลื่อนย้ายไฟฟ้า (Mobility) ของอนุภาค i ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเร็วลอยเลื่อน (V_i) ของอนุภาคที่มีประจุ ดังสมการ

$$B_i = \frac{V_i}{\left(\frac{d\phi}{dx}\right)} \quad \dots\dots\dots(10)$$

สำหรับความเร็วลอยเลื่อนของอนุภาคทรงกลม ในสารแขวนลอย เป็นค่าดังสมการ

$$V_i = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \xi}{\eta} \left(\frac{d\phi}{dx}\right) \quad \dots\dots\dots(11)$$

เมื่อ ε_0 คือค่าสภาพยอม (Permittivity) ของสุญญากาศ

ε_r คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ของตัวกลางของเหลว

ξ คือค่า ศักย์ซีต้า (Zeta Potential) ของอนุภาค

η คือค่าความหนืดของสารแขวนลอย

แทนค่า σ_i , B_i และ V_i ในสมการที่ 8 จะได้

$$m = c_i B_i \left(\frac{d\phi}{dx}\right) t = c_i V_i t$$

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะได้ว่า $\frac{d\phi}{dx} = \frac{V}{L}$ ดังนั้น

$$m = \frac{2}{3} c_i \varepsilon_0 \varepsilon_r \xi \frac{1}{\eta} \frac{V}{L} t \quad \dots\dots\dots(12)$$

เมื่อ V คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้

L คือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

จากสมการที่ 12 แสดงให้เห็นว่า มวลของอนุภาคที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับปัจจัยกำหนดทั้งหมด 4 ประการคือ

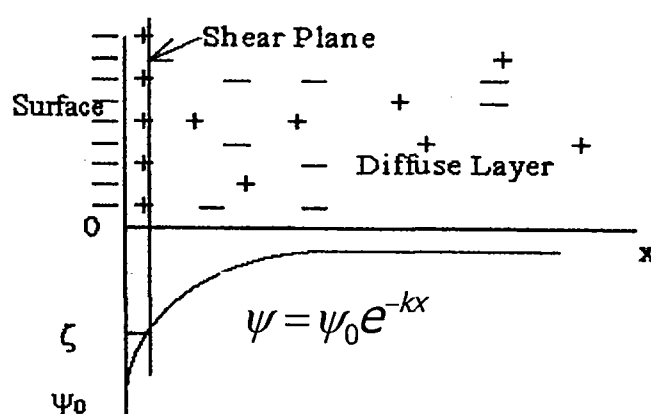
1. สมบัติพื้นฐานของพื้นผิวของอนุภาคแขวนลอย (Zeta Potential)
2. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสื่อที่เป็นของเหลว (ค่าคงที่เกี่ยวกับฉนวน)
3. คุณสมบัติของอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย (ปริมาณความจุของของแข็งและความหนืด)
4. แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ และเวลา

2.1 ศักย์ซีต้า (Zeta Potential)

ความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคในของเหลว หรือลักษณะความเสถียรของสารแขวนลอย เป็นอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคแต่ละตัวในของเหลวนั้น ถ้าเกิดแรงผลักรันระหว่างอนุภาคในของเหลว แรงนี้จะต้านการตกตะกอนหรือการรวมกันของอนุภาคภายในของเหลว ถ้าไม่มีแรงผลักรันก็จะเกิดการตกตะกอน หรือเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็ง ศักย์ซีต้าเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเสถียรของสารแขวนลอย ซึ่งถ้าศักย์ซีต้ามีค่าสูง จะเป็นการบ่งบอกถึงสถานะของสารแขวนลอยที่มีความเสถียรมาก แต่ถ้าศักย์ซีต้ามีค่าน้อย จะนำไปสู่สภาวะการรวมตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคหรือการตกตะกอน

ที่มาของศักย์ซีต้า

อนุภาคส่วนใหญ่ในตัวกลางที่มีประจุไฟฟ้าอย่างเช่น น้ำ จะเข้าครอบคลุมพื้นผิวที่มีประจุ อนุภาคที่มีประจุนี้จะดึงดูดไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ให้เข้ามาห่อหุ้มรอบอนุภาค ไอออนที่ห่อหุ้มอนุภาคจะแบ่งได้เป็น 2 ชั้นคือ ชั้นที่ใกล้กับผิวของอนุภาค ในชั้นนี้อิออนจะเกาะแน่นกับผิวอนุภาค และแสดงตัวเหมือนเป็นผิวของอนุภาค ไอออนเหล่านี้จะเคลื่อนตัวไปกับอนุภาคเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ ถัดจากชั้นไอออนนี้ออกไป เป็นไอออนที่เกาะอย่างหลวม ๆ เรียกไอออนในชั้นนี้ว่า ชั้นแห่งการแพร่ (Diffuse Layer)บริเวณรอยต่อของชั้นไอออนด้านในที่ติดแน่นกับอนุภาคและไอออนชั้นนอกมีชื่อเรียกว่า ระนาบเฉือน (Shear Plane) ศักย์ซีต้า คือค่าศักย์ไฟฟ้าที่ชั้นของรอยต่อนี้



ภาพประกอบ 2 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าในสองชั้นถัดมาจากผิวของอนุภาค

ที่มา: Zeta Potential Theory. (online). (2001. December).

Available: [http:// www.malvern.co.uk/ zettheo.htm](http://www.malvern.co.uk/zettheo.htm)

จากภาพประกอบที่ 2 ψ คือศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใด ๆ
 ψ_0 คือศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งเริ่มต้น

3. ดิน (Clays)

นักแร่วิทยาได้แบ่งแร่ดินทั้งหมดออกเป็น 4 กลุ่มคือ¹

1. กลุ่มแร่กาอลินไนท์ (Kaolinite) มีโครงสร้างของผลึกเป็นแผ่นบาง ๆ เรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เบียดอัดกันแน่น โครงสร้างของผลึกประสานกันแข็งแรง แร่อื่นไม่สามารถที่จะแทรกเข้าไปในโครงสร้างของผลึกได้ ดังนั้นแร่ดินกาอลินไนท์จึงมีความบริสุทธิ์มาก

2. กลุ่มฮอลลอยไซต์ (Halloysite) มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากแร่กาอลินไนท์ โดยผลึกที่เป็นแผ่นเกิดการม้วนตัวเป็นหลอดหรือกลายเป็นผลึกรูปแท่ง โครงสร้างของผลึกเกิดการเรียงตัวไม่เป็นระบบแตกต่างจากโครงสร้างกาอลินไนท์ แร่ดินฮอลลอยไซต์คือ ดินขาวที่มีความเหนียว มีความบริสุทธิ์น้อยกว่ากาอลินไนท์

3. กลุ่มอิลไลต์ (Illite) หรือมีอีกชื่อหนึ่งว่า กลุ่มแร่ไมกา ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากกาอลินไนท์โดยสิ้นเชิง ผลึกของดินไม่ได้เรียงตัวซ้อนกันด้วยระนาบเดียวกัน แต่มีผลึกของแร่อื่นเข้ามาแทรกอยู่ในระหว่างผลึกด้วย แร่อิลไลต์มีผลึกหยาบกว่าแร่เซอร์ไซต์ เป็นแร่ดินขาวที่มีไมกาอยู่สูง จึงมีจุดหลอมละลายต่ำกว่าดินขาวบริสุทธิ์

4. กลุ่มมอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) มีโครงสร้างผลึกที่ไม่แน่นอน เม็ดของผลึกดินมีความละเอียดมาก โครงสร้างของผลึกแตกกันอย่างหลวม ๆ ดังนั้น น้ำ อินทรีย์สาร และแร่ธาตุจึงแทรกเข้าไปตามชั้นของผลึกดินได้ และมีปริมาณของแร่ธาตุอื่น ๆ เข้ามาประกอบอยู่ในดินมาก ทำให้ดินไม่บริสุทธิ์ แต่มีความเหนียวสูงและมีเนื้อดินละเอียดมาก ได้แก่ ดินเบนโตไนท์ (Mcmeekin, I. 1967 Raw Materials and Clay Bodies. Volume 1 pp. 48-57)

3.1 ดินขาว (Kaolin, China clay)

ดินขาว หมายถึง ดินมีสีขาว หรือสีซีดจางทั้งในสภาพที่ยังไม่ได้เผาและเผาแล้ว²

ดินขาวที่ขุดขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีอยู่ 3 ชนิดคือ³

1. ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์และความทนไฟสูง สามารถนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้
2. ดินขาวอีกชนิดหนึ่งเป็นเกรดของฟิลเลอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ทำสี

¹ไพจิตร อิงศิริรัตน์. (2541). เนื้อดินเซรามิกส์. หน้า 39 – 40.

²ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2532). เซรามิกส์. หน้า 42.

³ไพจิตร อิงศิริรัตน์. (2541). เนื้อดินเซรามิกส์. หน้า 41-42.

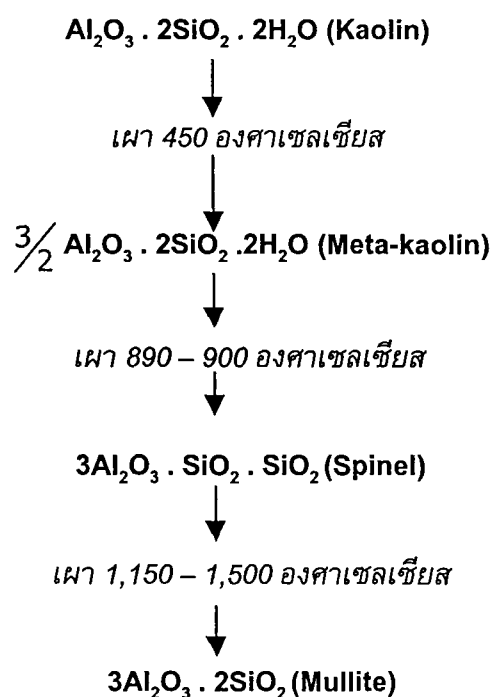
ยาง ยางฆ่าแมลง ปุ๋ย และอื่น ๆ โดยใช้ดินขาวที่มีเนื้อสีขาวบริสุทธิ์ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี แต่

ไม่ได้นำไปเผาผ่านความร้อนในกระบวนการผลิต

3. ดินขาวที่เป็นดินสอพองซึ่งไม่ใช่ดินขาว แต่เป็นปูนขาวซอล์ก (Chalk) หรือเป็นดินขาวที่มีส่วนประกอบของสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เกิดจากการแปรสภาพของหินปูนตามธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นผลึกละเอียดสีขาว บางครั้งเป็นสีอมชมพูและน้ำตาลอ่อน สามารถนำมาขึ้นรูปได้แต่เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียสจะสลายตัวแตกไม่สามารถคงรูปได้ จึงไม่นิยมนำมาเป็นวัตถุดิบหรือผสมในน้ำเคลือบ

แหล่งดินขาวมีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง คือ แหล่งต้นกำเนิด (Residual Deposits) ซึ่งจะพบบริเวณที่ราบที่เคยเป็นภูเขาหรือภูเขา ในบริเวณนั้นจะเป็นแร่หินพื้นผิว เมื่อเกิดการผุพังโดยบรรยากาศแล้วสุดท้ายจะได้เป็นดินขาว และอีกแหล่งหนึ่งคือแหล่งสะสมที่ลุ่ม (Sedimentary Deposits) เกิดเนื่องจากต้นกำเนิดแรกถูกน้ำพัดพาไปในบริเวณที่ลุ่ม แล้วสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

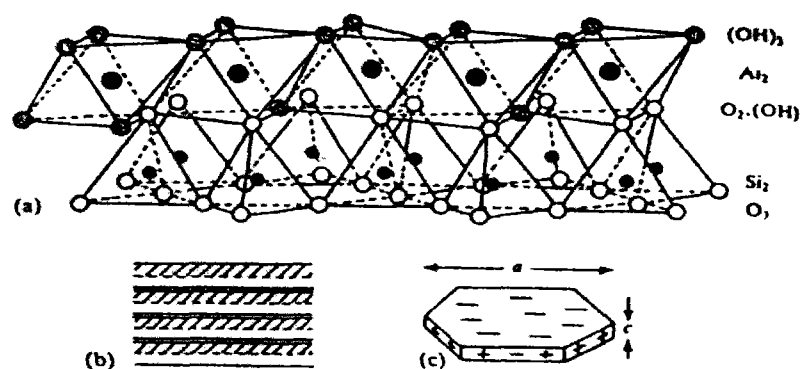
ผลึกดินขาวที่บริสุทธิ์ จะประกอบด้วยส่วนประกอบทางเคมี คือ องค์ประกอบทางเคมี $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือ $(\text{OH})_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ซึ่งมีร้อยละขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้คือ Al_2O_3 มีอยู่ 39.5% 2SiO_2 มีอยู่ 46.5% และ $2\text{H}_2\text{O}$ มีอยู่ 14% สมบัติทางเคมีของดินขาวเกาลินเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นขั้นตอนดังภาพประกอบที่ 3 คือ



ภาพประกอบ 3 สมบัติทางเคมีของดินเกาลินมีปฏิกิริยาแตกตัวในขั้นตอนการเผา

ที่มา: ไพจิตร อิงศิริรัตน์. (2541). เนื้อดินเซรามิก. หน้า 42. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

รูปร่างของอนุภาค (Particle Shape) ของดินขาว เป็นแบบแผ่นบางหกเหลี่ยม (Hexagonal Plates) ดังภาพประกอบที่ 4 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 – 10 ไมครอน ซึ่งเฉลี่ยแล้วจะอยู่ในช่วง 0.5 ไมครอน มีความเหนียวต่ำ มีความทนไฟได้ในช่วง 1,750 – 1,770 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Green Strength) เมื่อผสมน้ำจะมีความเหนียวประมาณ 25 – 40% แต่ความแกร่งหลังจาก การเผามีค่าสูง และมีการหดตัวประมาณ 20% หลังเผา



ภาพประกอบ 4 แสดงโครงสร้างของดิน Kaolinite ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้น (Layer Structure Modern Colloid Science. R. J. Hunter 1998)

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค). (ม.ป.ป.) ความรู้เบื้องต้นด้านวัสดุ.
หน้า 22.

ประโยชน์ของดินขาว

ดินขาวมีคุณสมบัติในด้านสีที่มีความขาวสวยงามทั้งก่อนเผา และหลังเผา จึงมีประโยชน์มากมาย ทั้งในด้านที่เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกส์เองคือเครื่องสุขภัณฑ์ ถ้วยชาม และสิ่งก่อสร้าง กระเบื้องปูพื้นผนัง และเป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมอื่นอีกมากมาย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ เพื่อทำให้ผิวหน้าของกระดาษเรียบ หมึกไม่ซึม เพิ่มน้ำหนักกระดาษ ทำให้สีของกระดาษขาวมากขึ้น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ใช้ทำเป็นฉนวนไฟฟ้า ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเครื่องสำอาง เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมสี ซึ่งเป็นส่วนผสมของสีขาว และยังมีประโยชน์ที่เราอาจคาดไม่ถึงอีกมากมายเช่น เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลง ทำเครื่องกรองน้ำ เป็นต้น จากประโยชน์ดังกล่าวนี้ว่าดินขาวเป็นที่รู้จักและนำมาใช้กันอย่างแพร่

หลาย แหล่งดินขาวที่พบในประเทศไทยมีอยู่ด้วยกันหลายแห่ง คือ เชียงราย ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง ชุมพร และนราธิวาส

ดินขาวลำปาง (Lampang China Clay, Sericite)

ดินขาวลำปางเป็นดินขาวเซอร์ซิไซต์ (Sericite) มีแร่ไมกาเป็นส่วนประกอบหลักมีแร่แคลิไนท์ประกอบอยู่เป็นส่วนน้อย หรือแร่แคลิไนท์ในตำแหน่งต่ำ (Disordered Kalinite) แร่เซอร์ซิไซต์ซึ่งแร่นี้ เกิดจากการผุพังของหินแกรนิต ซึ่งกลายเป็นเฟลด์สปาร์ ก่อนที่จะกลายเป็นแร่แคลิไนท์ จึงเป็นแร่แคลิไนท์ที่ไม่สมบูรณ์

ดินขาวบ้านปางคำ อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง ล้างและกรองผ่านตะแกรงละเอียด 325 เมช มีปริมาณเหล็กและไทเทเนียมต่ำ นิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์เนื้อดินขาวทุกประเภท ทนไฟไม่เกิน 1,250 – 1,300 องศาเซลเซียส

ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจังหวัดลำปาง ที่ผ่านการล้างแล้ว

ผลการวิเคราะห์ทางเคมี	%ส่วนประกอบดินหลังล้าง
ซิลิกา (SiO ₂)	63.00%
ไทเทเนียม (TiO ₂)	0.06%
อะลูมินา (Al ₂ O ₃)	25.45%
เหล็ก (Fe ₂ O ₃)	0.48%
แคลเซียม (CaO)	0.05%
แมกนีเซียม (MgO)	0.10%
โพแทสเซียม (K ₂ O)	2.82%
โซเดียม (Na ₂ O)	0.02%
น้ำหนักที่สูญหายไปหลังการเผา (LOI)	3.54%

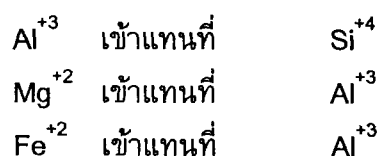
ที่มา: บริษัทสยามเซรามิคซ์พลาย จำกัด ต.สวนดอก อ.เมือง จ.ลำปาง

3.2 พฤติกรรมของดินในน้ำ

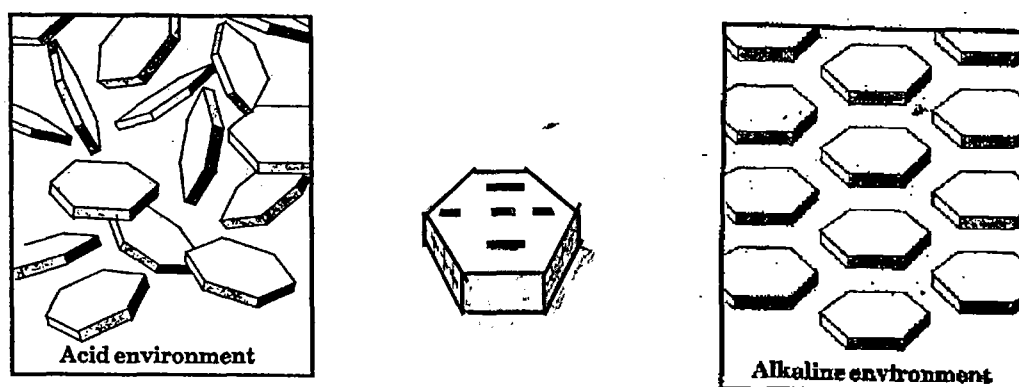
คุณสมบัติของดินที่ลอยตัวอยู่ในน้ำ จะมีลักษณะเหมือนกับของแข็งทั่วไป คือ ที่ผิวหน้าของอนุภาคดินมีพันธะไม่สมบูรณ์ จึงสามารถดูดซับประจุบวก หรือค่าอนุลบวกไว้ที่ผิว

ของตัวอนุภาคได้ โดยทั่วไปแล้วดินที่มีความละเอียดมาก ๆ จะสามารถดูดซับประจุบวกได้ดีกว่าดินที่หยาบ ๆ เพราะดินที่มีความละเอียดมากจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก อนุภาคดินที่สามารถดูดซับประจุต่าง ๆ ได้นั้นเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ

1. ความไม่สมบูรณ์ของพันธะบริเวณผิวหน้าของอนุภาค
2. การเข้าแทนที่กันระหว่างอนุมูลหรือค่าประจุที่แตกต่างกันของอนุภาคที่ประกอบกันภายในดิน เช่น¹



พฤติกรรมของการกระจายและลอยตัวของดินนั้น แตกต่างกันอยู่ 2 รูปแบบ² คือ ประจุที่อยู่บนผิวหน้าของอนุภาคดิน หรือ ไฟฟ้าสถิตที่อยู่บนผิวหน้าดินนั้น ทำให้มีดินมีพฤติกรรมดูด หรือ ผลักกัน ของอนุภาคดินในน้ำ หรือกล่าวคือ ในน้ำดินที่มีคุณสมบัติเป็นกรด จะเกิดการดูดซึ่งกันและกัน เป็นเหตุให้เกิดการจับตัวกัน ที่เรียกว่า Flocculated และอีกพฤติกรรมหนึ่งคือ เมื่อน้ำดินมีคุณสมบัติเป็นเบสหรือด่าง อนุภาคดินจะเกิดการผลัดซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดการกระจายและลอยตัวในน้ำดิน ที่เรียกว่า Deflocculated ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5



ภาพประกอบ 5 แสดงการเกิด Flocculated ของดินที่มีสภาพเป็นกรด และการเกิด Deflocculated ของดินที่มีสภาพเป็นเบส

ที่มา: ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2532). *เซรามิกส์*. หน้า 114.

¹ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2532). *เซรามิกส์*. หน้า 114.

²แหล่งเดิม. หน้า 116-117.

3.3 ความหนาแน่นและความพรุนของดิน

1. ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) หมายถึง มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรทั้งหมดของดิน

2. ความหนาแน่นของอนุภาค (Particle Density) หมายถึง มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของอนุภาคของดิน

ความพรุนทั้งหมด (Total Porosity) ของดิน หมายถึง ปริมาตรทั้งหมดของส่วนที่ไม่ใช่ของแข็งของดินเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมดของดิน ซึ่งเป็นสมบัติที่บ่งถึงผลรวมของความจุน้ำและความจุอากาศของดิน¹

การคำนวณหาค่ามวล และปริมาตรของดิน นั้นอาจทำได้โดยการชั่งดินในน้ำ หรือให้ดินแทนที่น้ำ การคำนวณหาความพรุนของดินทั้งหมด จะคำนวณ โดยความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นของอนุภาคโดยใช้สูตร

$$P = 100 \left[1 - \left(\frac{\rho_b}{\rho_s} \right) \right] \dots\dots\dots(13)$$

เมื่อ P = ความพรุนทั้งหมด (%)

ρ_b = ความหนาแน่นรวม

ρ_s = ความหนาแน่นของอนุภาค

3.4 คอลลอยด์ (Colloids)

การผสมสารสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดเข้าด้วยกันนั้น ถ้าสารทั้งหมดสามารถละลายรวมกันเป็นเนื้อเดียวได้โดยไม่มีการแยกชั้นออกมาจากกันระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลายเรียกสารนั้นว่า เป็นสารละลายชนิดเนื้อเดียว หรือเป็นสารละลายที่แท้จริง (Homogeneous) ซึ่งอาจกล่าวได้อีกอย่างว่าขนาดของอนุภาคทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกันมาก เช่น เติมน้ำลงในน้ำแล้วคน สุดท้ายเกลียวจะละลายผสมรวมกันกับน้ำเป็นเนื้อเดียวแยกไม่ออกด้วยการมองโดยตาเปล่า เป็นต้น และการผสมสารสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดแล้วไม่เกิดการละลาย มีการแยกชั้นกันอย่างชัดเจนไม่จัดว่าเป็นสารละลายแต่เป็นสารเนื้อผสม (Heterogeneous Substance) อาจเป็นเพราะขนาดของอนุภาคมีความแตกต่างกันมาก เช่นทรายที่ผสมกับน้ำ เมื่อหยุดคนจะเกิดการตกตะกอนทันที

¹ สำอาง ศรีนิลทา. (2517). คู่มือปฏิบัติการปฐพีศาสตร์เบื้องต้น. หน้า 21-22.

ของผสมอีกประเภทหนึ่งที่เรียกว่า ระบบคอลลอยด์ หรือสถานะคอลลอยด์ หรือสารแขวนลอย เมื่อผสมสารสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดเข้าด้วยกันแล้ว เกิดการกระจายและลอยตัวของสาร สามารถละลายเข้ากับตัวทำละลายได้ แต่ไม่สามารถละลายได้ทั้งหมดเหมือนสารละลายที่แท้จริง และสามารถลอยตัวอยู่ได้โดยไม่เกิดการแยกชั้นอย่างรวดเร็วเหมือนสารเนื้อผสม ตัวอย่างของระบบคอลลอยด์ คือ นม แป้งในน้ำ เม็ดเลือด เป็นต้น

การกระจายแบบคอลลอยด์หรือสถานะคอลลอยด์นั้นเป็นสถานะที่สารนั้นอยู่ในรูปของอนุภาคเล็ก ๆ เรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $10^{-7} - 10^{-4}$ เซนติเมตร ระบบคอลลอยด์จะแบ่งตามลักษณะของของผสมที่นำมาผสมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แต่คอลลอยด์ที่เป็นการผสมกันระหว่างอนุภาคแก๊สกับตัวกลางที่เป็นแก๊สไม่มี เนื่องจากแก๊สทุกชนิดสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ จึงเป็นสารละลายที่แท้จริงเท่านั้น ตัวอย่างระบบคอลลอยด์

1. อนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลว เช่น แป้งในน้ำ เรียกว่าเป็นคอลลอยด์ชนิดโซล (Sols)
2. อนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นของเหลวแขวนลอยในของเหลวเหมือนกัน เช่น น้ำมันแขวนลอยในน้ำส้มสายชู เรียกว่าเป็นคอลลอยด์ชนิดอีมัลชัน (Emulsion)
3. อนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นของแข็งที่มีขนาดอนุภาคใหญ่แขวนลอยอยู่ในของเหลว เช่น โปรตีนหรือโพลิเมอร์ ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนการเมื่อผสมกับน้ำจะพองตัว เรียกว่าเป็นคอลลอยด์ชนิดเจล (Gel)
4. อนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นของแข็งหรือของเหลวแขวนลอยในแก๊ส เช่น ควันทมอก เมฆ ฝุ่นละออง เรียกว่าเป็นคอลลอยด์ชนิด เอโรโซล (Aerosol)

คอลลอยด์มีอะตอมที่ผิวหน้ามาก จึงมีพื้นที่ผิวสูง อะตอมที่ผิวหน้าไม่สามารถเกิดพันธะใน 3 มิติได้อย่างอะตอมทั่วไป ดังนั้นแรงที่เกิดยังไม่สมบูรณ์ จึงทำให้สารอื่นมายึดที่ผิวของคอลลอยด์ได้ คอลลอยด์บางชนิดดูดซับโมเลกุลที่มีประจุเป็นกลาง บางชนิดดูดซับเฉพาะประจุบวกบางอย่างหรือประจุลบบางอย่างที่ผิวของมัน ทำให้มีประจุเกิดขึ้น¹

4. อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

4.1 ศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทาน และสภาพนำไฟฟ้าของวัตถุ

¹ โสภณ เริ่มสำราญ และคณะ. (2535). เคมีทั่วไปสำหรับนักศึกษาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและพยาบาล. หน้า 126.

ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดคือ a กับ b เท่ากับงานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุทดสอบ +1 คูลอมบ์ จาก a ไปยัง b หรือเขียนเป็นสมการ

$$V_b - V_a = \frac{W_{ab}}{Q_0} \quad \dots\dots\dots(14)$$

ถ้า W_{ab} คืองานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุ Q_0 จากจุด a ไปจุด b

V_a คือศักย์ไฟฟ้าที่จุด a

V_b คือศักย์ไฟฟ้าที่จุด b

ค่าความต่างศักย์มีหน่วยเป็น Joule/coulomb หรือ Volt ซึ่งก็คือ 1 Volt มีค่าเท่ากับ 1 joule/coulomb ถ้าคิดเทียบว่าจุด a อยู่ในระยะไกลจาก b มาก เพราะฉะนั้นศักย์ไฟฟ้า ณ จุด a ในขณะนั้นมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$V_b = V = \frac{W}{Q_0} \quad \dots\dots\dots(15)$$

เมื่อ W เป็นงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุจากระยะอนันต์มายังจุด b ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงความต่างศักย์ไฟฟ้าต้องมีจุดอ้างอิง 2 จุดเสมอ ความต่างศักย์นี้สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของประจุไฟฟ้า และเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น

ปริมาณกระแสไฟฟ้า (I) คืออัตราการไหลของประจุไฟฟ้า (Q) ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งในหนึ่งหน่วยเวลา

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \dots\dots\dots(16)$$

กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์ หรือคูลอมบ์ต่อวินาที (C/s) ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ามีทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของประจุลบ หรือมีทิศเดียวกับทิศการเคลื่อนที่ของประจุบวก

ความหนาแน่นกระแส ($\vec{J}$) คือค่ากระแสที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยในแนวตั้งฉากกับพื้นที่นั้น

$$\vec{J} = \frac{I}{A} \hat{a}_j = \frac{dI}{ds_n} \hat{a}_j \quad \dots\dots\dots(17)$$

23185
77

โดยที่ $\vec{J}$ เป็นความหนาแน่นของกระแสที่ผิว $d\vec{S}_n$
 $d\vec{S}_n$ เป็นพื้นที่เล็ก ๆ ในแนวตั้งฉากกับกระแส
 dI เป็นกระแสที่ผ่านพื้นที่
 ∂_j เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศของ $\vec{J}$

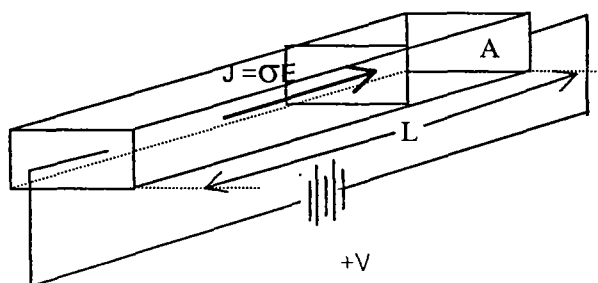
หน่วยของค่าความหนาแน่นกระแสเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร (A/m^2) จากสมการที่ 18 จะได้

$$dI = \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad \dots\dots\dots(18)$$

เพราะฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่า กระแสที่ผ่านพื้นที่ S ใด มีค่าเป็น

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad \dots\dots\dots(19)$$

ส่วนสภาพนำไฟฟ้าจะเป็นปริมาณที่เป็นส่วนกลับของความต้านทาน ความต้านทานไฟฟ้าเป็นปริมาณที่สัมพันธ์กับความยาวพื้นที่หน้าตัดในการนำกระแส วัสดุที่มีความต้านทานสูงจะนำไฟฟ้าได้น้อยกว่าวัสดุที่มีความต้านทานต่ำ พิจารณาแท่งตัวนำสม่ำเสมอ ยาว L และมีพื้นที่ภาคตัดขวาง A คงตัวตลอดตามความยาว



ภาพประกอบ 6 แท่งตัวนำต่อความต่างศักย์ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสในตัวนำ จะสัมพันธ์กับสมการ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \dots\dots\dots(20)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า

$\vec{J}$ คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$\vec{E}$ คือสนามไฟฟ้า

จาก $\vec{E} = -\nabla V$

ในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ขนาดสนามไฟฟ้าคือ

$$E = \frac{V}{L} \dots\dots\dots(21)$$

และขนาดความหนาแน่นกระแส

$$|\vec{J}| = \frac{I}{A} \dots\dots\dots(22)$$

แทนขนาดของ $\vec{J}$ จากสมการที่ 22 และ E สมการที่ 21 ลงใน 20 จะได้

$$I = \left(\frac{\sigma A}{L}\right)V \dots\dots\dots(23)$$

จากกฎของโอห์ม $V = IR$ หรือ $I = \frac{V}{R}$ เมื่อเทียบกับสมการ 24 จะได้ ค่าความต้านทานของแท่งตัวนำยาว L คือ

$$R = \frac{L}{(\sigma A)} \quad \Omega \text{ (โอห์ม)} \dots\dots\dots(24)$$

เมื่อ $\frac{1}{\sigma}$ เป็นสภาพต้านทาน (Resistivity) ของวัสดุตัวกลางที่นำไฟฟ้า

ดังนั้นความนำไฟฟ้า (G) ซึ่งเป็นส่วนกลับของความต้านทาน คือ

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\sigma A}{L} \dots\dots\dots(25)$$

มีหน่วยเป็น ต่อโอห์ม ($1/\Omega$) หรือ โม (mho) หรือ ซีเมนซ์ (siemens)

สภาพนำไฟฟ้า σ ของวัสดุ มีหน่วยเป็น ซีเมนส์ต่อเมตร (siemens/m = s/m) สามารถหาได้จาก¹

$$\sigma = -\rho_e \mu_e \quad \dots\dots\dots(26)$$

เมื่อ ρ_e เป็นความหนาแน่นประจุของอิเล็กตรอนอิสระ (C/cm³)

μ_e เป็นค่าคงตัวเชิงสัดส่วน เรียกว่า “ความคล่องตัว” (Mobility) ของอิเล็กตรอนมีหน่วยเป็น ตารางเมตรต่อโวลต์วินาที (m²/V.s)

ส่วนเครื่องหมายลบ (-) เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า

สำหรับในกรณีที่วัสดุตัวนำไฟฟ้าไม่ใช่ของแข็ง แต่เป็นของเหลวหรือแก๊ส จะพบว่าพาหะที่นำประจุเคลื่อนที่ไปนั้นมีทั้งที่เป็นประจุลบและประจุบวก เพราะฉะนั้นสภาพนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปเป็น

$$\sigma = -\rho_- \mu_- + \rho_+ \mu_+ \quad \dots\dots\dots(27)$$

เมื่อ $\rho_{+(-)}$ เป็นความหนาแน่นของประจุบวก และประจุลบ

$\mu_{+(-)}$ เป็นความคล่องตัวของพาหะนำประจุบวกและประจุลบ

4.2 ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแกรไฟต์ (Graphite)

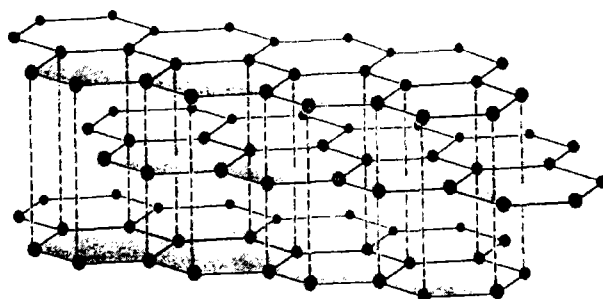
คุณสมบัติของแกรไฟต์

แกรไฟต์เป็นคาร์บอน ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ 6 เหลี่ยมด้านเท่าหรือ Hexagonal ระนาบของผลึกจัดเรียงเป็นชั้น ๆ ระยะห่างระหว่างระนาบแต่ละชั้นเท่ากับ 335 pm ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 142 pm ดังภาพประกอบที่ 7

แกรไฟต์มีความอ่อน สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี การที่แกรไฟต์มีสีดำ มีลักษณะโครงสร้างที่เรียงกันเป็นชั้น ๆ ทำให้มีแนวโน้มที่จะหลุดออกเป็นชั้น ๆ ได้ แกรไฟต์จึงถูกนำมาทำเป็นไส้ดินสอ เพราะเขียนบนกระดาษและลบด้วยยางลบไม่เกิดรอยบนกระดาษ โดยที่ส่วนผสมของไส้ดินสอจะมีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบเพื่อให้เกิดการเกาะกันแน่นเป็นแท่ง

¹ มงคล เดชนครินทร์. (2524). สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก. หน้า 178.

และไม่หักง่าย นอกจากนั้นแกรไฟต์ยังใช้ประโยชน์ในการทำเบ้าสำหรับหลอมโลหะ ทำภาชนะเผา (Crucible) และเป็นส่วนผสมในสารหล่อลื่นแห้ง (Dry lubrication) สมบัติของแกรไฟต์ในธรรมชาติ แสดงไว้ในตาราง 2



ภาพประกอบ 7 แสดงการจัดเรียงตัวแบบ Hexagonal ของแกรไฟต์

ที่มา: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2532). *เคมีทั่วไป เล่ม 2*. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

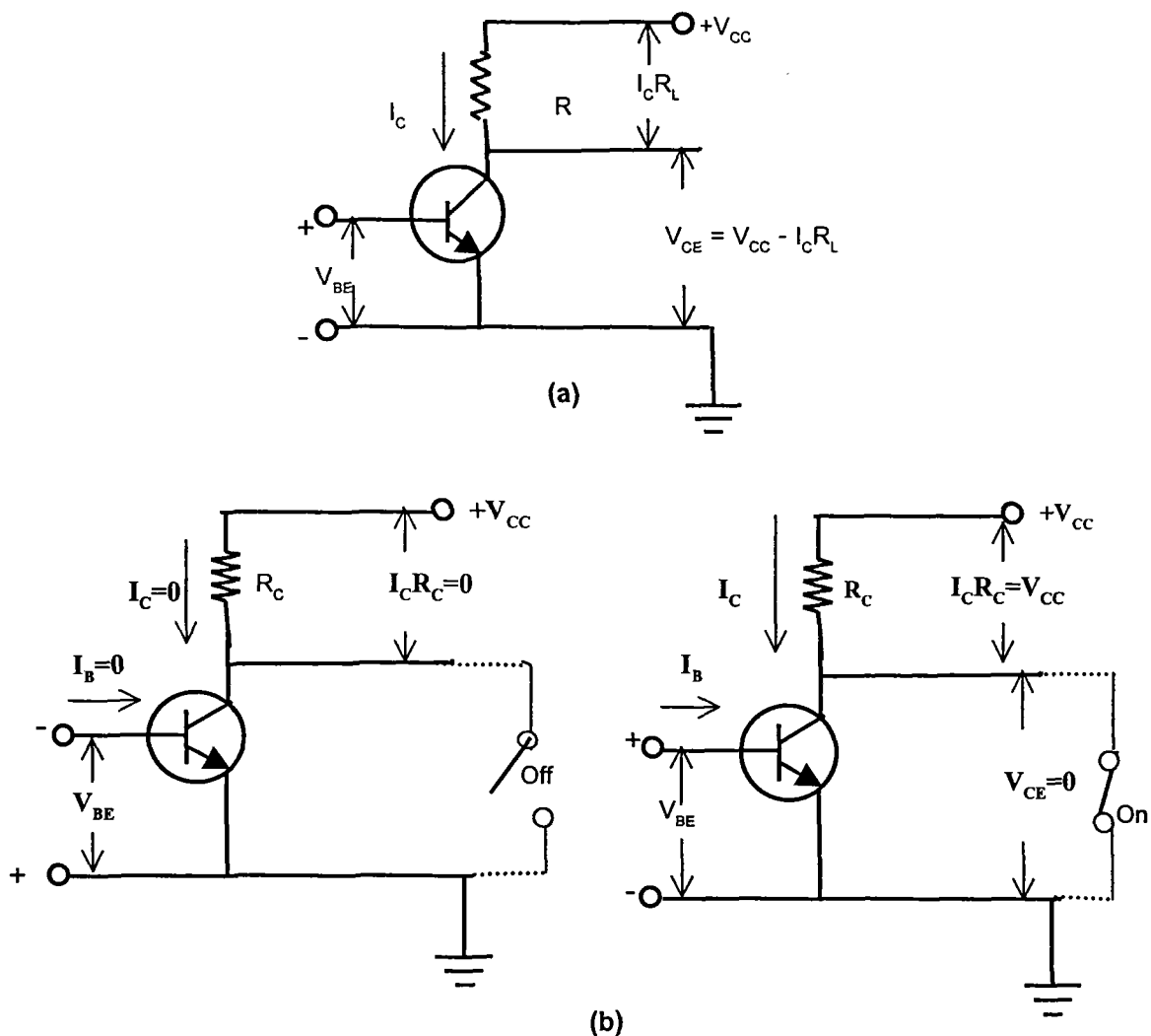
ตาราง 2 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนโครงสร้างของแกรไฟต์

สมบัติ	แกรไฟต์ธรรมชาติ
ความหนาแน่น (g/ml)	2.26
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	4200
จุดระเหิด ($^{\circ}\text{C}$)	3620 ± 10
ความร้อนจำเพาะ (cal/mol $^{\circ}\text{C}$)	2.038
ความแข็ง (Mohs)	0.5 – 1.5
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Kcal/mol)	170
Conductivity (σ) (mho / meter)	1.0×10^6
Electrical Resistivity (microhm - cm)	65 at room temp.
Relative Permeability (μ_r)	1.00

ที่มา : ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. (2525). *สารานุกรมธาตุ*. หน้า106.

4.3 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์

วงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ มีลักษณะของการทำงานคือ เมื่อป้อนกระแสเข้าทางขาเบส (I_B) จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสไฟฟ้า ปริมาณกระแสเบส (I_B) ที่มากเพียงพอ จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสในสภาวะอิ่มตัว ในสภาวะนี้ทรานซิสเตอร์จะเหมือนสวิตช์ปิดวงจร เมื่อหยุดป้อนกระแสทางขาเบส (I_B) ทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสภาวะคัทออฟ ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ในสภาวะเปิด



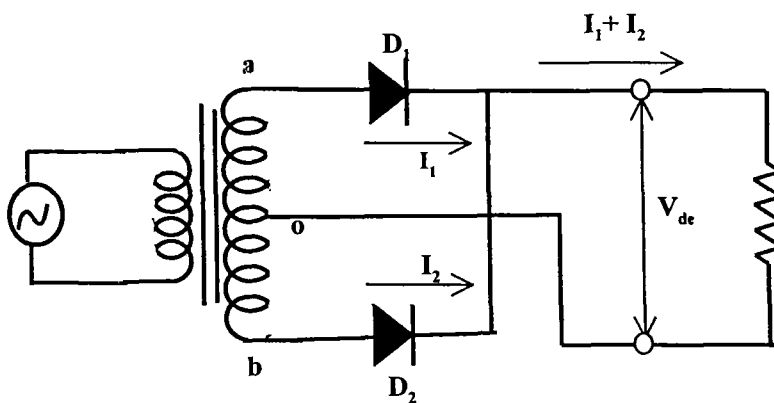
ภาพประกอบ 8 แสดงลักษณะการทำงานเป็นสวิตช์ของทรานซิสเตอร์

ในวงจรตามภาพประกอบนี้เป็นวงจรแบบอิมิตอร์ร่วม (CE) โดยทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ปิดเปิดวงจรที่ประกอบด้วย R_C กับ V_{CC} การนำกระแสระหว่างคอลเลคเตอร์กับ

อิมิตเตอร์จะเป็นเหมือนการนำกระแสของสวิตช์ ส่วนค่าความศักย์ทางเข้าที่ขาเบส ทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมการทำงานของสวิตช์

4.4 วงจรเรกติไฟเออร์ชนิดเต็มคลื่น

วงจรเรกติไฟเออร์เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ในวงจรเรกติไฟเออร์ชนิดเต็มคลื่นกระแสที่ไหลผ่านภาระ จะเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับทั้งทางด้านลบและบวก ซึ่งเป็นไปดังวงจรต่อไปนี้



ภาพประกอบ 9 วงจรเรกติไฟเออร์ชนิดเต็มคลื่น

วงจรนี้ประกอบไปด้วยไดโอดจำนวนสองตัว หม้อแปลงชนิดมีตำแหน่งกลางสำหรับแปลงค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับให้ได้ในระดับที่ต้องการ พิจารณาวงจรขณะที่ a มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเทียบกับ o ซึ่งได้แสดงด้วยภาพประกอบที่ 10 (ก)จะเห็นว่าในขณะนี้ ไดโอด D1 จะได้รับการไบแอสตรง ทำให้ไดโอดนำกระแส เกิดกระแส I_1 ไหลผ่าน R_L และไดโอด D2 ไม่นำกระแส เนื่องจากการไบแอสกลับทาง เมื่อเวลาเปลี่ยนไป ศักย์ไฟฟ้าที่ a จะเปลี่ยนไปเป็นลบเมื่อเทียบกับ o และที่ b จะเปลี่ยนเป็นบวกเทียบกับ o ในขณะนี้ ไดโอด D2 จะได้รับไบแอสตรง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า I_2 ไหลผ่านภาระ R_L ทำให้กระแสไฟฟ้า I_1 และ I_2 ที่ไหลผ่าน R_L ในทิศทางเดียวกัน

ความต่างศักย์ที่คร่อมไดโอดในทิศกลับทางสูงสุด (PIV) มีค่าเท่ากับ $2V_p$ เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างจุด a และ b เท่ากับ

$$V_{ab} = V_{D1} + V_{D2} \quad \dots\dots\dots(28)$$

โดยที่ V_{ab} คือ ความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างจุด a และ b

V_{D1} คือ ความต่างศักย์ตกคร่อมไดโอดตัวที่ 1

V_{D2} คือ ความต่างศักย์ตกคร่อมไดโอดตัวที่ 2

เนื่องจาก V_{ab} มีค่าสูงสุดเท่ากับ $2V_p$ และขณะที่ความต่างศักย์ V_{ab} มีค่าสูงสุดนี้สมมุติว่า ไดโอด D_1 นำกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ที่คร่อมบน ไดโอด D_1 จะมีค่าประมาณ 0.7 โวลต์ ดังนั้นตามสมการ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนไดโอด D_2 เท่ากับ $2V_p$ ในอีกกรณีคือ V_{ab} มีค่าสูงสุดขณะที่ไดโอด D_2 นำกระแสไฟฟ้า กรณีนี้เมื่อพิจารณาด้วยวิธีการเดียวกัน จะได้ความต่างศักย์สูงสุดที่คร่อมบนไดโอด D_1 ในทิศทางกลับทางคือ $2V_p$ เช่นกัน

ปริมาณกระแสตรง I_{dc} ที่ไหลผ่านภาระ R_L เป็นค่าเฉลี่ยของกระแส $i_1 + i_2$ ในหนึ่งคาบเวลาของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับที่ทางเข้า

$$\begin{aligned} I_{dc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_p \sin \omega t \, d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_p \sin \omega t \, d\omega t \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_p \sin \omega t \, d\omega t \\ &= \frac{2I_p}{\pi} \dots\dots\dots(29) \end{aligned}$$

หาค่าความต่างศักย์กระแสตรงที่คร่อมบนความต้านทาน R_L โดยใช้กฎของโอห์ม คือ

$$V_{dc} = I_{dc} R_L = \frac{2I_p R_L}{\pi} = \frac{2V_p}{\pi} \dots\dots\dots(30)$$

เมื่อ V_p เท่ากับ $I_p R_L$

การแปลงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงในวงจรเรกติไฟเออร์ กำลังงานที่กระแสตรงจ่ายให้กับภาระ จะน้อยค่าน้อยกว่ากำลังงานกระแสสลับที่หม้อแปลงจ่ายให้กับวงจร หรือมีการสูญเสียกำลังงานในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง วงจรเรกติไฟเออร์ที่มีการสูญเสียกำลังงานในการแปลงไฟฟ้าน้อย จัดว่าเป็นเรกติไฟเออร์ที่มีประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพเรกติฟิเคชัน (η_R) เป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพของเรกติไฟเออร์ ซึ่งจะกำหนดเป็นอัตราส่วนของกำลังงานกระแสตรงที่วงจรเรกติไฟเออร์จ่ายให้กับภาระ ต่อ กำลังงานยังผลหรือกำลังงาน rms. ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับวงจร

$$\eta_R = \frac{P_{dc} (output)}{P_{ac} (input)} \times 100\% \dots\dots\dots(31)$$

กำลังงานที่หม้อแปลงซึ่งในที่นี้ถือว่าเป็นแรงเคลื่อนกระแสสลับ จ่ายให้กับวงจรคือ

$$P_{ac} = I_{rms}^2 R$$

ซึ่งกระแสยังผล

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i^2 d\omega t} \dots\dots\dots(32)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_p^2 \sin^2 \omega t d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_p^2 \sin^2 \omega t d\omega t}$$

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

เพราะฉะนั้น

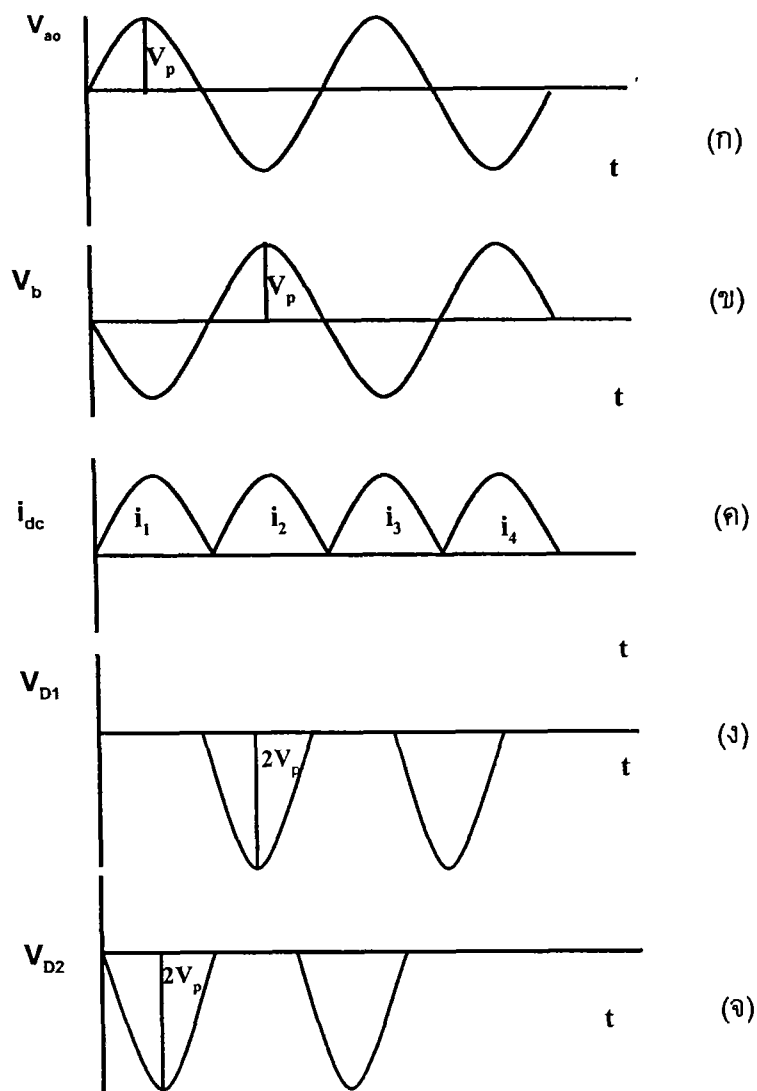
$$P_{ac} = \frac{I_p^2 R}{2} \dots\dots\dots(33)$$

ประสิทธิภาพเรกติไฟเคชั่น (η_R) จากสมการที่ 31

$$\eta_R = \frac{P_{dc}(output)}{P_{ac}(input)} \times 100$$

$$\eta_R = \frac{4I_p^2 R}{\pi^2} \times \frac{2}{I_p^2 R} \times 100$$

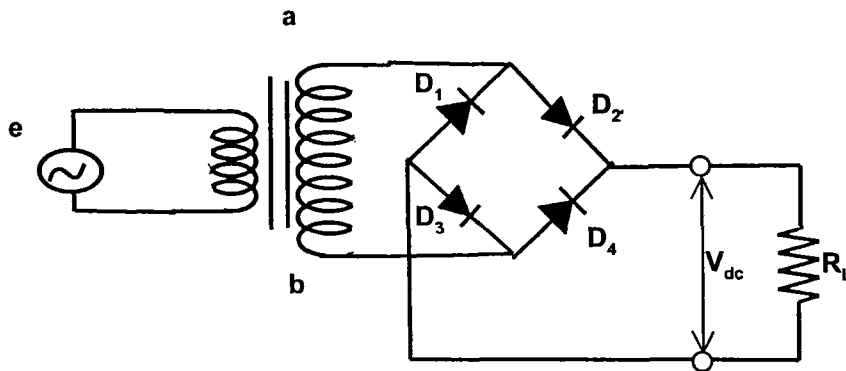
$$\eta_R = 81.2\%$$



ภาพประกอบ 10 รูปคลื่นความต้งศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ใน วงจรเรกติไฟเออร์ชนิดเต็มคลื่น

4.5 วงจรเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์

วงจรเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์เป็นวงจรเรกติไฟเออร์ชนิดเต็มลูกคลื่นอีกแบบหนึ่ง ซึ่ง จะใช้ไดโอดประกอบเป็นวงจรแบบบริดจ์ ดังภาพประกอบที่ 11



ภาพประกอบ 11 วงจรเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์และทิศทางการไหลของกระแส

วงจรนี้ประกอบด้วยหม้อแปลง และไดโอดสี่ตัวทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายให้กับภาระ พิจารณาการไหลของกระแสในวงจร จากจุด a ศักย์ไฟฟ้า ของหม้อแปลงในขณะนี้มีค่าเป็นบวกเทียบกับจุด b จะได้ว่าไดโอด D₂ และ D₃ จะนำกระแสได้ซึ่งอยู่ในภาวะการไบแอสตรง ส่วนไดโอด D₁ และ D₄ จะได้รับการไบแอสกลับทาง จึงไม่สามารถนำกระแสได้ ลักษณะการไหลของกระแสก็คือกระแสไหลจากจุด a ผ่านไดโอด D₂ ผ่านภาระ แล้วผ่านไดโอด D₃ เข้าสู่หม้อแปลงทางด้าน b ต่อมาเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่จุด a เปลี่ยนเป็นลบเทียบกับที่จุด b ขณะนี้ไดโอด D₁ และ D₄ จะสามารถนำกระแสได้ คือได้รับการไบแอสตรง ส่วนไดโอด D₂ และ D₃ ได้รับการไบแอสกลับทาง โดยกระแสจะไหลจากจุด b ผ่านไดโอด D₄ ผ่านเข้าภาระ และผ่านไดโอด D₁ เข้าสู่ขั้วของหม้อแปลงทางด้าน a สังเกตดูว่าไม่ว่าค่า a จะเป็นบวกหรือเป็นลบ ค่ากระแสที่ไหลผ่านภาระ (R_L)จะมีทิศทางเดียวกัน รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านภาระในวงจรเรกติไฟเออร์ชนิดบริดจ์นี้จะเหมือนกับของวงจรเรกติไฟเออร์ชนิดเต็มคลื่น

จากลักษณะของรูปคลื่นของวงจรเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่นมีลักษณะที่ไม่เรียบ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า กระแสไฟฟ้าจากวงจรเรกติไฟเออร์นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่เป็นกระแสตรงและส่วนประกอบที่เป็นกระแสสลับ ส่วนประกอบกระแสสลับเป็นตัวที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าไม่เรียบ ตัวประกอบริพเพิล คือค่าบ่งบอกถึงความเรียบของกระแสไฟฟ้า สามารถหาได้จากค่าอัตราส่วนของค่าศักย์ยังผลจากส่วนประกอบกระแสสลับต่อส่วนประกอบกระแสตรงคือ

$$\lambda = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \quad \text{ขององค์ประกอบของกระแสสลับ} \quad \dots\dots\dots(34)$$

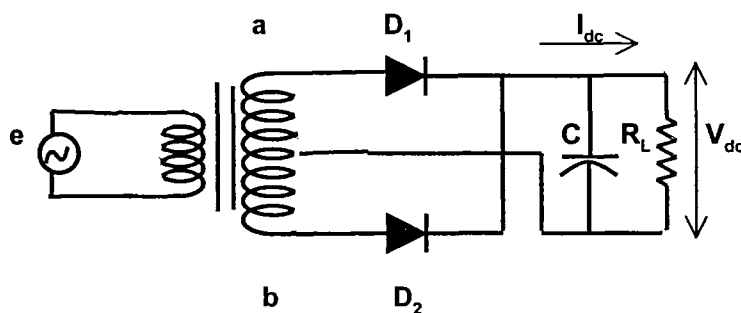
4.6 วงจรกรอง (Filters)

4.6 วงจรกรอง (Filters)

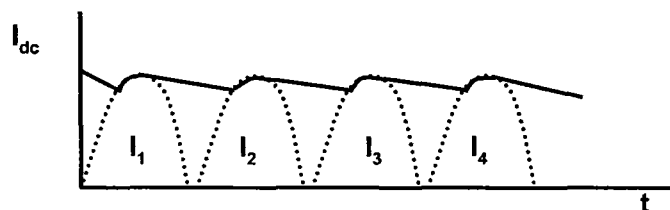
รูปคลื่นของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า จากวงจรเรกติไฟเออร์เป็นรูปคลื่นที่ไม่เรียบเกิดจากการรวมกันของกระแสไฟฟ้า 2 ชนิดคือกระแสตรงและกระแสสลับรูปซายน์ ซึ่งมีค่าความถี่ต่าง ๆ กันจำนวนมากซึ่งเป็นตัวทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าไม่เรียบ ส่วนประกอบกระแสสลับนี้สามารถทำให้ลดลงได้ โดยใช้วงจรกรองร่วมกับวงจรเรกติไฟเออร์ วงจรกรองนี้จะทำหน้าที่ผ่านกระแสสลับรอบ ๆ ภาวะ หรือทำหน้าที่ต้านทานการไหลของส่วนประกอบกระแสสลับ หรือทำหน้าที่ทั้งสองอย่างร่วมกัน เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าที่ออกมามีความเรียบขึ้น ตัวอย่างวงจรกรองกระแส คือ

วงจรกรองชนิดตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter)

วงจรกรองชนิดตัวเก็บประจุนี้จะใช้ตัวเก็บประจุหนึ่งตัว ต่อขนานกับขั้วทางออกของวงจรเรกติไฟเออร์ ถ้าใช้ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าขนาดความจุมาก จนทำให้ค่ารีแอแทนซ์ของตัวเก็บประจุมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับความต้านทานของภาระ (R_L) ส่วนประกอบกระแสสลับจะถูกลัดวงจรด้วยตัวเก็บประจุ คงเหลือแต่ความต่างศักย์กระแสตรงที่คร่อมบนภาระ (R_L) ค่าความต่างศักย์กระแสที่ได้จึงมีความเรียบมากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 12 วงจรกรองชนิดตัวเก็บประจุในวงจรเรกติไฟเออร์

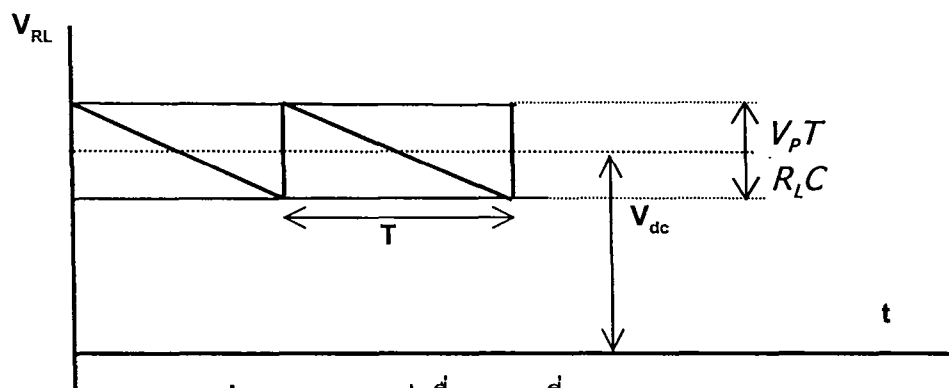


ภาพประกอบ 13 รูปคลื่นกระแส ที่ทางออกของวงจรที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรอง

ขณะไดโอดนำกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมบนตัวเก็บประจุ มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_p และหลังจากนั้น ไดโอดจะหยุดนำกระแส ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ a และ b ลดลงต่ำกว่าค่า V_p ทำให้ศักย์ไฟฟ้าด้านบนของตัวเก็บประจุสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ a และ b เป็น

ผลให้ไดโอดอยู่ในทิศไบแอสกลับทางและไม่มีการนำกระแส เมื่อไดโอดไม่นำกระแส ตัวเก็บประจุจะคายประจุออกมาผ่านภาระ (R_L) เมื่อตัวเก็บประจุคายประจุจึงทำให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงต่ำกว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ a และ b เมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นจนมากกว่าค่าความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุ ณ เวลานั้นไดโอดเริ่มนำกระแส ทำให้ได้ความต่างศักย์ที่คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นถึง V_p ไดโอดจึงหยุดนำกระแส จนกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ a และ b จะมีค่าสูงกว่าความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุ

คำนวณหาค่าตัวประกอบบริฟเฟิล โดยการประมาณรูปคลื่นที่ทางออกเป็นรูปสามเหลี่ยม ถ้าตัวคงค่าเวลาที่มากกว่าคาบเวลาของกระแสลับที่ทางเข้า ($R_L C \gg T$) ความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวเก็บประจุในหนึ่งคาบเวลา จะมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $V_p T / R_L C$ ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 รูปคลื่นสามเหลี่ยม

ความต่างศักย์ยังผล หาได้จาก

$$V_{rms}^2 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left(\frac{V_p T t}{R_L C T} \right)^2 dt$$

$$= \frac{1}{T} \frac{2V_p^2}{R_L^2 C^2} \int_0^{T/2} t^2 dt = \frac{V_p^2 T}{12 R_L^2 C^2}$$

เนื่องจาก V_{dc} มีค่าประมาณเท่ากับ V_p

$$\lambda \approx \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \approx \frac{T}{2\sqrt{3} R_L C}$$

หรือเขียนในรูปความถี่

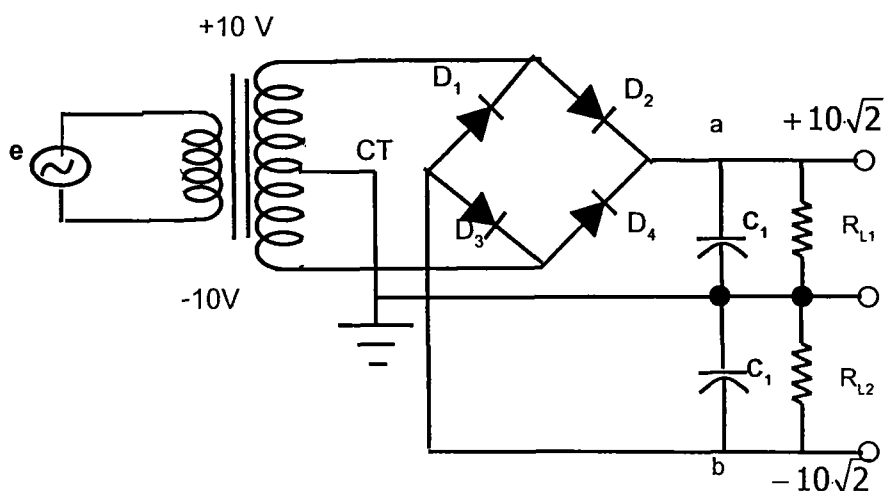
จากสมการที่ 35 ค่าตัวประกอบริฟเฟิลจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความจุของตัวเก็บประจุ หรือความต้านทานของภาระ (R_L) ในกรณีที่ภาระมีค่ามากเป็นอนันต์ หรือวงจรเปิดที่ R_L กระแสจะเท่ากับศูนย์ และค่าตัวประกอบริฟเฟิลมีค่าเท่ากับศูนย์ คือค่ากระแสตรงที่ได้เป็น กระแสที่เรียบที่สุด และเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น (R_L ลดลง) ค่าตัวประกอบริฟเฟิลจะสูงขึ้น แสดงว่า ส่วนประกอบกระแสสลับเพิ่มขึ้น หรือความเรียบของกระแสน้อย ความต่างศักย์ที่คร่อมบนภาระ (R_L) จะมีค่าประมาณว่าเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของความต่างศักย์ที่คร่อมบน ภาระ มีค่าเท่ากับ

$$V_{dc} = V_p - \frac{V_p T}{2R_L C} \quad \dots\dots\dots(36)$$

ความต่างศักย์กระแสตรงที่ทางออก จะมีค่าเปลี่ยนตามภาระ ความต่างศักย์กระแสจะ มีค่าลดลงเมื่อความต้านทานของภาระลดลง หรือเมื่อภาระต้องการกระแสมากขึ้น ความต่าง ศักย์กระแสตรงนี้มีค่าสูงสุดเท่ากับ V_p เมื่อกระแสที่จ่ายให้กับภาระเท่ากับศูนย์ หรือความต้าน ทานของภาระเท่ากับอนันต์

4.7 เรคตีไฟเออร์สองขั้ว

อุปกรณ์ไฟฟ้าจำนวนมากมีความต้องการไฟฟ้าที่ให้ทั้งบวกและลบ ซึ่งค่าความต่าง ศักย์นี้เป็นค่าความต่างศักย์ที่เทียบกับขั้วไฟฟ้าอีกขั้วหนึ่ง ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม หรือขั้วดินของ วงจร (Ground)

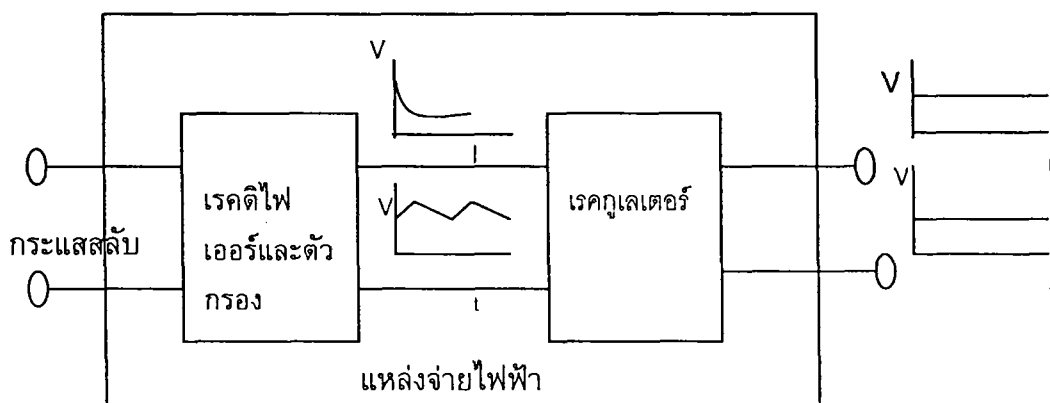


ภาพประกอบ 15 วงจรเรคตีไฟเออร์ที่ให้ความต่างศักย์สองขั้ว

จากภาพประกอบที่ 15 วงจรจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรองกระแสให้เรียบ หม้อแปลงที่มีตำแหน่งกลาง และไดโอดทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลกระแสไฟฟ้า ประกอบกันเป็นวงจรบริดจ์ซึ่งมีลักษณะการทำงานคล้ายกับการเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ โดยที่ไดโอด D_2 จะนำกระแสพร้อมกับ D_3 และไดโอด D_1 จะนำกระแสพร้อมกับ D_4 การนำไฟฟ้านี้ทำให้ขั้วไฟฟ้า a เป็นค่าบวกเทียบกับ CT ซึ่งเป็นตำแหน่งขั้วไฟฟ้ากลางของหม้อแปลง ตัวต้านทาน R_{L1} และ R_{L2} เป็นภาระของวงจร ศักย์ไฟฟ้าเมื่อความต้านทานของภาระมีเท่ากับอนันต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกมีค่าสูงสุดเท่ากับ $\sqrt{2} V_{rms}$ หรือเท่ากับ V_p และมีความเรียบมากที่สุด ถ้าค่าความต้านทานของภาระมีค่าลดลง ค่าความต่างศักย์นี้จะมีค่าลดลงและความเรียบน้อยลง ซึ่งค่า V_{rms} ในที่นี้เป็นค่าความต่างศักย์ของขั้วทางออกของหม้อแปลงเทียบกับตำแหน่งกลางของวงจร จากตัวอย่างวงจรนี้ ค่าความต่างศักย์ rms คือ 10 โวลต์ ขนาดความต่างศักย์กระแสตรงที่ทางออกแต่ละขั้วเท่ากับ $10\sqrt{2}$ โวลต์

4.8 ตัวควบคุมโวลเตจ (Voltage Regulator)

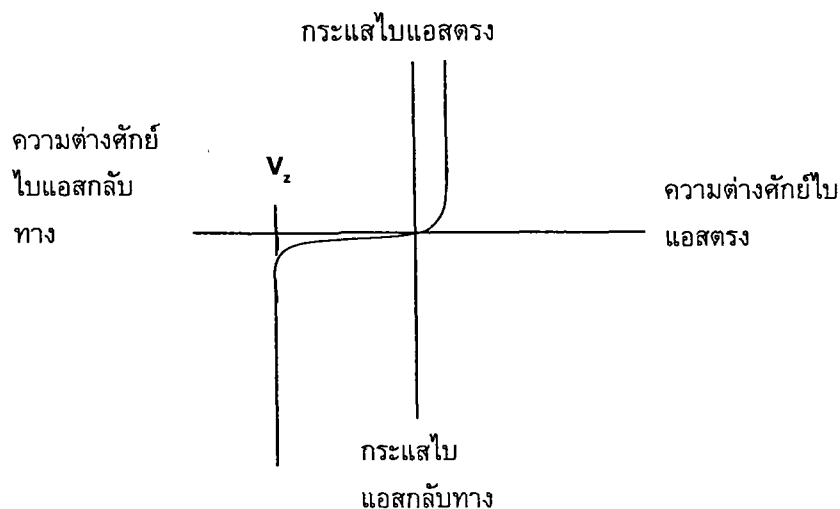
วงจรเรกติไฟเออร์ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ไม่ได้ควบคุมค่าความต่างศักย์ทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ทำให้ความต่างศักย์ที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลงตามภาระ เช่น ในเรกติไฟเออร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรอง ขณะที่ภาระมีความต้องการกระแสไฟฟ้ามาก ความต่างศักย์ที่ทางออกจะลดลงพร้อมกับลดความเรียบของกระแสไฟฟ้าด้วย ซึ่งเครื่องใช้ไฟฟ้าหลายชนิดต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์คงที่ ซึ่งวงจรเรกติไฟเออร์ที่ต่อกับตัวกรองชนิดต่าง ๆ สามารถให้ค่าความต่างศักย์ทางออกของวงจรคงที่ได้โดยการเพิ่มวงจร เรกกูเลเตอร์ความต่างศักย์ (Voltage Regulator) เข้าไป วงจรเรกกูเลเตอร์ความต่างศักย์ ทำหน้าที่ควบคุมความต่างศักย์ที่ทางออกให้คงที่ แม้ว่าสภาวะการนำกระแสไฟฟ้าของภาระจะมีการเปลี่ยนแปลง หรือเรียกว่าเป็นตัวควบคุมโวลเตจ



ภาพประกอบ 16 แสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเรกกูเลเตอร์

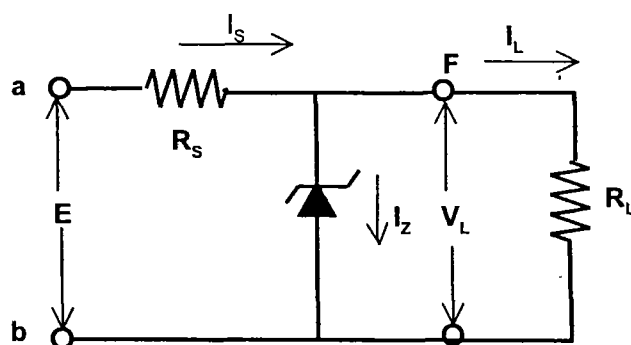
วงจรเรกจูเรเตอร์ชนิดซีเนอร์ไดโอด

ซีเนอร์ไดโอดเป็นไดโอดที่แสดงสมบัติ คือขณะที่ไบแอสในทิศกลับทางจะมีค่าความต่างศักย์เฉพาะค่าหนึ่ง ถ้าเป็นไดโอดจะไม่นำกระแสในทิศกลับทาง แต่ซีเนอร์ไดโอดจะนำกระแส กระแสนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ PN จนมีความเร็วสูงแล้วชนอะตอมทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนที่เกิดเพิ่มขึ้นนี้จะได้รับการเร่งและชนกับอะตอม ทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอีก กระบวนการนี้เรียกว่า อะวาแลนช์ (Avalanche) ความต่างศักย์ที่ทำให้ไดโอดเปลี่ยนจากการไม่นำกระแสมาเป็นนำกระแสเรียกว่า ความต่างศักย์พัง (Breakdown Voltage) หรือความต่างศักย์ซีเนอร์ ภาพประกอบ 17 คือกราฟแสดงลักษณะเฉพาะของซีเนอร์ไดโอด ซีเนอร์ไดโอดได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ความทนต่อกระแสได้มากในทิศไบแอสกลับทาง



ภาพประกอบ 17 ลักษณะเฉพาะของซีเนอร์ไดโอด

เรกจูเลเตอร์ชนิดซีเนอร์ไดโอด จะใช้ซีเนอร์ไดโอดทำหน้าที่ควบคุมความต่างศักย์ให้คงที่ ขณะที่กระแสที่จ่ายให้กับภาระ มีการเปลี่ยนแปลง จากภาพประกอบที่ 18 ความต่างศักย์กระแสตรงจากการเรกติไฟเออร์ที่ผ่านการกรองจากวงจรกรองแล้ว ต่อเข้าระหว่างขั้ว a b ความต่างศักย์จะต้องมีค่ามากกว่าความต่างศักย์ซีเนอร์ไดโอด ความต่างศักย์ตกคร่อมบนภาระ (R_L) จะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่เท่ากับค่าความต่างศักย์ซีเนอร์



ภาพประกอบ 18 วงจรเรกกูเลเตอร์ชนิดซีเนอร์ไดโอด

ความต่างศักย์ที่คร่อมบนตัวต้านทาน R_s จะเท่ากับผลต่างของความต่างศักย์ E กับ V_z ขณะที่ I_L เพิ่มขึ้น I_z จะลดลง และขณะที่ I_L ลดลง I_z จะเพิ่มขึ้น โดยที่ความต่างศักย์กระแสตรง V_L ที่คร่อมบนภาระ R_L จะมีค่าคงที่เท่ากับ V_z แม้ว่า E จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของภาระ

การควบคุมความต่างศักย์ให้คงที่ของซีเนอร์ไดโอด สามารถแสดงให้เห็นโดยการเขียนกราฟระหว่าง กระแส I_z กับความต่างศักย์ V_L ในภาวะการนำกระแสต่างกันของภาระ ลงบนกราฟลักษณะเฉพาะของซีเนอร์ไดโอด จากวงจรเรกกูเลเตอร์ จะได้ว่า

$$I_s = I_z + I_L$$

จากค่าความต่างศักย์ตกคร่อมบน R_s เป็นผลต่างของความต่างศักย์ V_{in} กับ V_L

$$I_s = \frac{E - V_L}{R_s}$$

จับค่าสมการทั้งสอง มาเท่ากันจะได้ว่า

$$I_z + I_L = \frac{E - V_L}{R_s} \dots\dots\dots(37)$$

กระแสที่ไหลผ่านภาระ (I_L) ตามกฎของโอห์ม คือ $\frac{V_L}{R_L}$ แทนลงในสมการที่ 37

จะได้

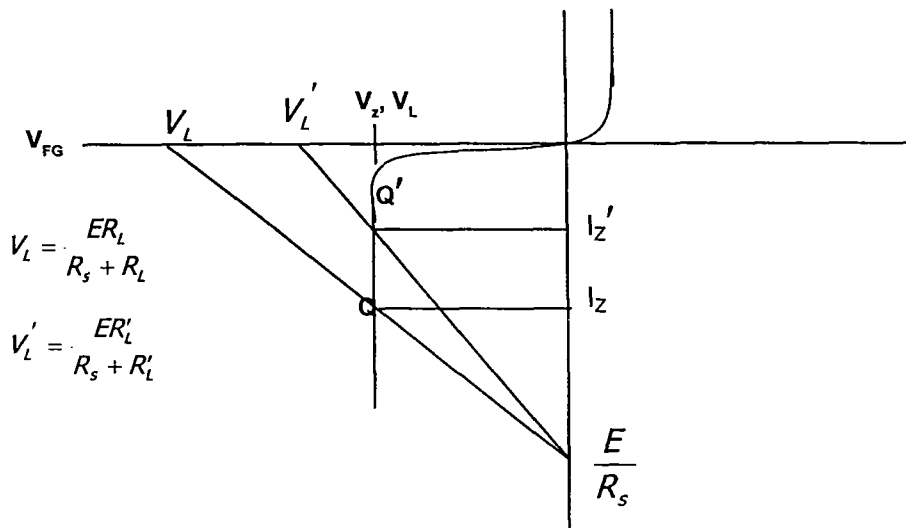
$$I_z + \frac{V_L}{R_L} = \frac{E - V_L}{R_s} \quad \dots\dots\dots(38)$$

หรือ

$$I_z = \frac{E}{R_s} - \frac{V_L}{R_s} - \frac{V_L}{R_L} \quad \dots\dots\dots(39)$$

$$= \frac{E}{R_s} - V_L \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_L} \right) \quad \dots\dots\dots(40)$$

จากสมการที่ 40 เมื่อนำมาลงจุดจะได้ค่าของ I_z กับ V_L ในลักษณะเฉพาะของซีเนอร์ไดโอดจุดของเส้นกราฟ ตามสมการที่ 38 กับเส้นกราฟลักษณะเฉพาะ จะตรงกับค่าศักย์ไฟฟ้า V_L ที่ตกคร่อมบน R_L ดังภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบ 19 จุดตัดของเส้นกราฟ I_z, V_L กับลักษณะเฉพาะของซีเนอร์ไดโอด

จากสมการที่ 40 เป็นสมการเส้นตรง มีจุดตัดแกนกระแสที่ $\frac{E}{R_s}$ และตัดแกนความต่างศักย์ $\frac{ER_L}{R_s + R_L}$ จุดตัดของเส้นกราฟ Q เป็นตำแหน่งที่ให้กระแส I_z และความต่างศักย์ V_L ที่สอดคล้องกับความต้านทานของภาระ (R_L) สมมุติว่ากรณีที่ภาระ R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น R_L' และถ้า E และ R_s คงเดิม จะได้เส้นกราฟเส้นใหม่ ซึ่งตัดแกนความต่างศักย์ $\frac{ER_L'}{R_s + R_L'}$ จุด

ตัดของเส้นกราฟจะเปลี่ยนไปเป็น Q' จะทำให้ค่ากระแสที่ผ่านซีเนอร์ไดโอดเท่ากับ I'_Z และความต่างศักย์ที่คร่อมภาระเท่ากับ V'_L จะเห็นว่าถ้าซีเนอร์ไดโอด มีเส้นกราฟลักษณะเฉพาะ ในช่วงความต่างศักย์พังของซีเนอร์ไดโอดขนานกับแกนของกระแส ' และทั้ง $\frac{ER_L}{R_s + R_L}$ และ $\frac{ER'_L}{R_s + R'_L}$ มากกว่า V_Z แล้ว V_L และ V'_L จะมีค่าเท่ากัน และเท่ากับ V_Z ซึ่งก็คือขณะที่ R_L เปลี่ยนไปเป็น R'_L ความต่างศักย์ที่คร่อมบนภาระจะคงเดิม

ในวงจรเรกกูเลเตอร์แบบนี้ กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดจะมีค่าสูงสุด เมื่อเปิดวงจรที่ภาระ (R_L) มีความต้านทานเท่ากับอนันต์ จะเห็นได้จากสมการ 40 เมื่อเปิดวงจร R_L กระแส I_L จะเท่ากับศูนย์ กระแส I_Z จะมีค่าสูงสุด ถ้าให้กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์สูงสุดเป็น I_{Zmax}

$$I_{Zmax} = \frac{E - V_L}{R_s}$$

พิจารณากรณีที่ ความต้านทานของภาระลดลง กระแสที่ไหลผ่านภาระจะเพิ่มขึ้น ขณะที่กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดจะลดลง การลดลงของกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดนี้จะมีขอบเขตอยู่ระดับหนึ่ง ซึ่งถ้าค่าของกระแสลดต่ำกว่านี้ ซีเนอร์ไดโอดก็จะไม่อยู่ในช่วงความต่างศักย์พัง ความต่างศักย์ที่คร่อมซีเนอร์ไดโอดก็จะไม่เท่ากับความต่างศักย์ซีเนอร์ ทำให้วงจรสูญเสียคุณสมบัติในการควบคุมความต่างศักย์ให้คงที่ วงจรจึงไม่สามารถควบคุมความต่างศักย์ให้คงที่ได้

ถ้าให้ I_{Zmin} เป็นกระแสต่ำสุดที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด แล้วซีเนอร์ไดโอดยังคงอยู่ในช่วงความต่างศักย์พัง กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายให้กับภาระในขณะนี้ จะเป็นกระแสสูงสุดที่จ่ายให้กับภาระ แล้วเรกกูเลเตอร์ยังคงควบคุมความต่างศักย์ V_L ให้คงที่อยู่ได้ ถ้าให้กระแสนี้เป็น I_{Lmax} จากสมการที่ 38 39 40 เมื่อแทนค่า I_L ด้วย I_{Lmax} แล้วแทนค่า I_Z ด้วย I_{Zmin} จะได้ว่า

$$I_{Lmax} = I_s - I_{Zmin}$$

หรือ

$$I_{Lmax} = \frac{E - V_L}{R_s} - I_{Zmin} \dots\dots\dots(41)$$

จากสมการที่ 41 เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่า R_s เมื่อทราบค่ากระแสสูงสุดที่ภาระต้องการ และเมื่อทราบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เหลือในสมการดังนี้

$$R_s = \frac{E_{\min} - V_L}{I_{Z\min} + I_{L\max}} = \frac{V_{in\min} - V_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}}$$

เมื่อ $E_{\min}$ เป็นค่าต่ำสุดของความต่างศักย์ E การที่ใช้ค่าต่ำสุดของ E ในการคำนวณ R_s เนื่องจากตัวต้านทานนี้เป็นตัวกำหนดกระแส I_s ซึ่งเป็นกระแสรวมที่จ่ายให้กับภาระ และ ซีเนอร์ไดโอด การใช้ค่า E ที่เป็นค่าต่ำในการคำนวณ ทำให้ได้ R_s ที่ให้กระแสไหลผ่านเท่ากับ I_s ตามที่กำหนด แม้ขณะที่ E ลดลงมาเป็นค่าต่ำสุด ซึ่งทำให้วงจรเรกกูเลเตอร์ยังคงสมบัติในการควบคุมความต่างศักย์ทางออกให้คงที่ได้ ในทางตรงกันข้ามขณะที่ E เพิ่มขึ้น กระแส I_s จะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแส I_s นี้จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด ยังคงนำกระแสในช่วงความต่างศักย์พัง และสามารถคุมให้ค่าความต่างศักย์คงที่ได้

กำลังงานที่เกิดขึ้นในตัวต้านทาน R_s คือ

$$P_R = I_s^2 R_s$$

กำลังงานนี้จะมีค่าสูงสุดเมื่อ กระแส I_s มีค่าสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ E เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดให้กำลังงานสูงสุดนี้เป็น $P_{R\max}$ และกระแส I_s สูงสุดเป็น $I_{s\max}$

$$P_{R\max} = I_{s\max}^2 R_s$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปของความต่างศักย์

$$P_{R\max} = \frac{(E_{\max} - V_Z)^2}{R_s} \dots\dots\dots(42)$$

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในซีเนอร์ไดโอดจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของความต่างศักย์ซีเนอร์กับกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด หรือ $P_Z = I_Z V_Z$ กำลังงานนี้ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในซีเนอร์ไดโอด และจะมีค่าสูงสุดเมื่อ กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมีค่าสูงสุด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อภาระ R_L มีความต้านทานสูง หรือเปิดวงจรที่ R_L ทำให้ไม่มีกระแส I_L ตามสมการ $I_s = I_Z + I_L$ กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด I_Z จะเท่ากับ I_s และเป็นกระแสสูงสุดที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด ถ้าแทนกระแสสูงสุดที่ผ่านซีเนอร์ไดโอดด้วย $I_{Z\max}$

$$I_{Z\max} = I_{S\max} = \frac{E_{\max} - V_L}{R_s} \quad \dots\dots\dots(43)$$

$E_{\max}$ เป็นค่าสูงสุดของความต่างศักย์ E ที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง ซึ่งอาจเป็นความต่างศักย์จากเรกติไฟเออร์ที่มีตัวเก็บประจุ $I_{S\max}$ เป็นกระแส I_s ขณะที่ E มีค่าสูงสุดเท่ากับ $E_{\max}$

กำลังงานสูงสุดที่เกิดขึ้นในซีเนอร์ไดโอด เกิดขึ้นเมื่อกระแสที่ไหลในซีเนอร์ไดโอดมีค่าสูงสุด ซึ่งจะมีค่า

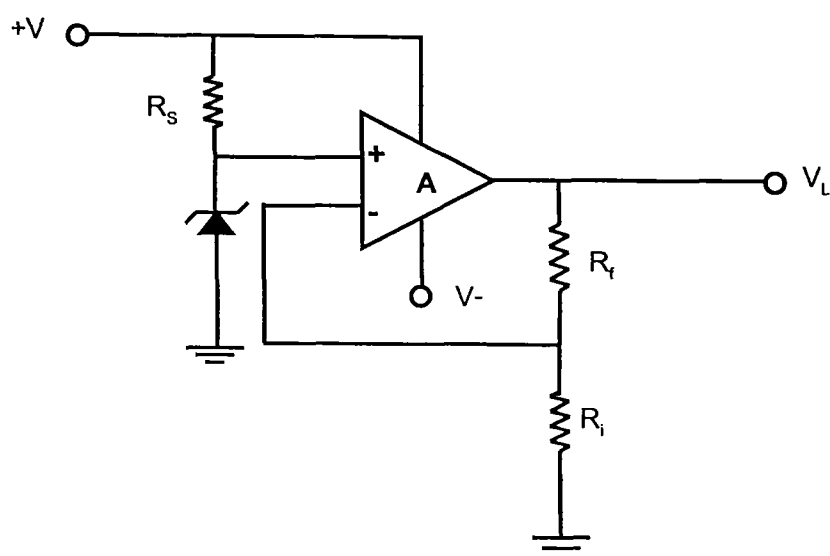
$$P_{Z\max} = V_Z I_{Z\max} \quad \dots\dots\dots (44)$$

เมื่อ $P_{Z\max}$ เป็นกำลังงานสูงสุดที่เกิดขึ้นในซีเนอร์ไดโอด กำลังงานสูงสุดเกิดขึ้นในซีเนอร์ไดโอด ขณะที่ภาระไม่ต้องการกระแสหรือในขณะที่เราถอดเอาความต้านทานที่เป็นภาระออกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซีเนอร์ไดโอดจะมีโอกาสชำรุดเสียหายได้มากที่สุด

ในวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการให้จ่ายกระแสได้มาก ถ้าเป็นเรกกูเลเตอร์ชนิดซีเนอร์ไดโอด จะต้องเลือกใช้ซีเนอร์ไดโอดที่ทนกำลังงานสูง เพื่อไม่ให้เกิดการชำรุดขณะที่ไม่มีกระแส

วงจรเรกกูเลเตอร์ออปแอมป์

เป็นวงจรควบคุมศักย์ไฟฟ้าทางออกให้ค่าคงที่ V_L



ภาพประกอบ 20 การใช้ออปแอมป์ในการควบคุมความต่างศักย์กระแสตรงให้มีค่าคงที่

การทำงาน โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นตัวสร้างค่าความต่างศักย์คงที่ ป้อนให้กับทางเข้าขาบวกของออปแอมป์ ตัวต้าน R_i และ R_f ส่วนออปแอมป์จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณ ไม่กลับทาง ที่มีค่าอัตราขยาย $\frac{(R_f + R_i)}{R_i}$ ลักษณะการทำงานของวงจร ตัวต้านทาน R_s ประกอบกับซีเนอร์ไดโอด ค่าความต่างศักย์ที่ได้จะถูกป้อนเข้าทางด้านบวกของออปแอมป์ การต่อวงจรนี้ทำให้ได้ค่าความต่างศักย์ทางออกของออปแอมป์ มีค่าเท่ากับอัตราขยายของวงจรคูณด้วยค่าความต่างศักย์ที่ทางเข้า ดังนั้นค่าของความต่างศักย์ทางออกมีค่าเท่ากับ

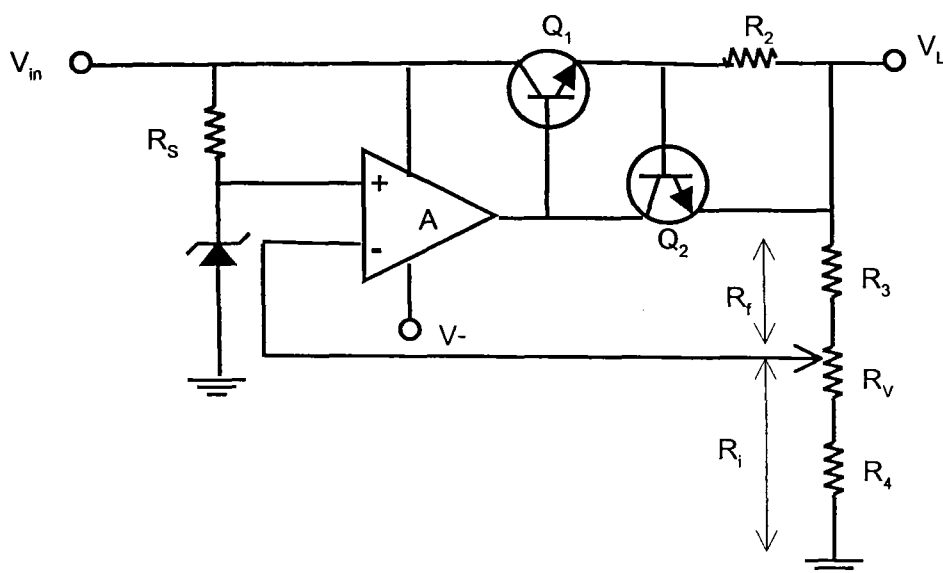
$$V_L = V_i \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)$$

หรือ

$$V_L = V_z \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \dots\dots\dots (45)$$

ค่าความต่างศักย์ที่ทางออกถูกกำหนดด้วยอัตราขยายของวงจรขยาย เนื่องจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด (V_z) มีค่าคงที่ ดังนั้นค่าความต่างศักย์ที่ทางออกต้องมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งค่าความต่างศักย์ทางออกจะถูกกำหนดด้วยอัตราส่วนความต้านทาน R_f และ R_i ดังนั้นเราสามารถปรับเปลี่ยนค่า R_f และ R_i เพื่อให้ได้ค่าความต่างศักย์ที่เราต้องการได้

ออปแอมป์มีขีดจำกัดในการเพิ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อเป็นการทำให้วงจรมีการจ่ายกระแสได้มากขึ้นโดยการต่อทรานซิสเตอร์สองตัวเข้ากับขาทางออกของออปแอมป์ ดังภาพประกอบที่ 21



ภาพประกอบ 21 วงจรควบคุมความต่างศักย์ ที่มีทรานซิสเตอร์เป็นตัวผ่านและจำกัดกระแส

ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสให้กับภาระ ส่วน Q_2 และ R_2 จะทำหน้าที่ จำกัดกระแสในกรณีกระแสเกินขีดจำกัด หรือเกิดการลัดวงจร การจำกัดกระแสของ Q_2 เมื่อมีกระแสไหลผ่านภาระเพิ่มขึ้น ซึ่งค่ากระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทาน R_2 ด้วย ทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมบนตัวต้านทาน R_2 ถ้ามีค่าเกิน 0.7 โวลต์ ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะนำกระแส ซึ่งการนำกระแสดังกล่าวนี้จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าขาเบสของ ทรานซิสเตอร์ Q_1 น้อยลง เป็นผลให้ค่าความต่างศักย์ ระหว่างขาคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของ Q_1 มีค่ามากขึ้น หรือศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก V_L ลดลง โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าจะไม่เพิ่มขึ้นอีก

กำลังงานสูงสุดที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์ Q_1 จะเกิดขึ้นต่อเมื่อ ค่าความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขาคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์มีค่าสูงสุด และกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์มีค่าสูงสุด

$$P_C = (E_{\max} - V_{L\min}) I_{L\max} \dots\dots\dots(46)$$

เมื่อค่า P_C เป็นค่า กำลังที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์

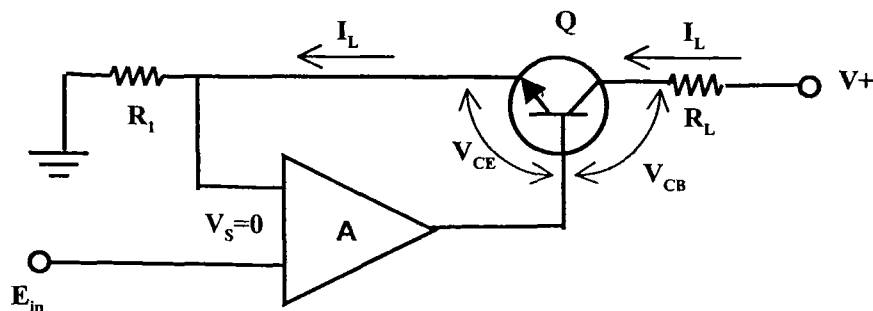
4.9 วงจรควบคุมกระแสคงที่ โดยใช้โอปแอมป์

อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์บางชนิดต้องการกระแสคงที่ในการใช้งาน วงจรที่ใช้ในการควบคุมกระแสให้คงที่ (Current regulator) จะต่างจากที่กล่าวมาซึ่งเป็นส่วนที่ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าทางออกให้คงที่

ในวงจรควบคุมกระแสที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโอปแอมป์ และทรานซิสเตอร์ โดยจะพิจารณาเพียงรูปแบบ 2 รูปแบบ

1. วงจรควบคุมกระแสด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าบวก

วงจรรูปแบบนี้ เป็นการให้ระดับศักย์ไฟฟ้าบวกที่ทางเข้าบวกของโอปแอมป์ ในการกำหนดปริมาณกระแสคงที่ ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 วงจรควบคุมกระแสด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าบวกของออปแอมป์

ที่มา: Walter G. Jung. (1977). *IC OP-AMP COOKBOOK*. p. 175.

จากคุณสมบัติของออปแอมป์อุดมคติที่ว่า ความต้านทานขาเข้ามีค่าอนันต์ จึงทำให้ ศักย์ตกคร่อมระหว่างทางเข้าของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์ ($V_s = 0$) และทำให้ไม่มีกระแสไหล ผ่านระหว่างขาของออปแอมป์ ($I_s = 0$) จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ค่าความต่างศักย์ตกคร่อมบน R_1 มีค่าเท่ากับศักย์ที่ป้อนให้กับขาบวกของออปแอมป์ นั่นคือ

$$V_{R_1} = E_{in}$$

กระแสที่ผ่าน R_1 จึงเท่ากับ

$$\frac{V_{R_1}}{R_1} = \frac{E_{in}}{R_1}$$

แต่เนื่องจากค่ากระแส I_L ที่ผ่านภาระแล้วออกมาทางขาอิมิตเตอร์ของวงจรคือกระแสที่ ผ่าน R_1 ด้วย ดังนั้น

$$I_L = \frac{E_{in}}{R_1}$$

ค่าความต่างศักย์ V_+ เป็นแรงเคลื่อน ที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระที่มีความต้านทาน R_L โดยมีทรานซิสเตอร์ เป็นวัสดุผ่านกระแสไฟฟ้า ทรานซิสเตอร์นี้จะถูกควบคุม ด้วยออปแอมป์ปรับกระแสให้คงที่ตลอดเวลา

ปริมาณศักย์ไฟฟ้า V_+ จะสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ในส่วนต่าง ๆ ของวงจร คือ

$$V_+ = I_L R_L + V_{CB} + V_{BE} + E_{in}$$

หรือ $V_+ = I_L R_L + V_{CE} + E_{in} \dots\dots\dots(47)$

เมื่อค่า $I_L R_L$ คือความต่างศักย์ตกคร่อมภาระ

V_{CB} คือความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขาคอลเลคเตอร์และเบส

V_{BE} คือความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขาเบสกับอิมิตเตอร์

V_{CE} คือความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขาคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์

E_{in} คือศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับทางเข้าบวกของออปแอมป์

สำหรับทรานซิสเตอร์แบบซิลิกอนค่า V_{BE} มีค่าเท่ากับ 0.7 โวลต์ขณะที่นำกระแสไฟฟ้าในการเลือกใช้วัสดุประกอบวงจร จะต้องพิจารณาถึงกำลังงานและขีดจำกัดด้านกระแส และความต่างศักย์ประกอบกัน ในวงจรนี้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ผ่านกระแสให้กับภาระ และเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนกระแส ซึ่งมีกำลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเป็นความร้อนในตัวทรานซิสเตอร์ ในการเลือกใช้ทรานซิสเตอร์สำหรับวงจรนี้จะต้องพิจารณาความต่างศักย์ V_{CB} สูงสุดที่ทรานซิสเตอร์รับได้ และกำลังงานสูงสุดที่ทรานซิสเตอร์รับได้ ซึ่งค่า V_{CB} สูงสุดจะเท่ากับ

$$V_{CB} = V_+ - I_L R_L - V_{BE} - E_{in} \approx V_+ - I_L R_L - E_{in}$$

ขณะที่ $I_L R_L$ และ E_{in} มีค่าน้อยที่สุด ส่วนกำลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ V_{CE} และ I_L มีค่าสูงสุด หรือค่ากำลังงานที่ตกคร่อมบนตัวทรานซิสเตอร์สูงสุด (Power dissipation, P_{Dmax})

$$P_{Dmax} = I_{max} V_{CEmax}$$

หรือ

$$P_{Dmax} = I_{max} (V_{+max} - E_{inmin}) \dots\dots\dots(48)$$

2. วงจรที่กำหนดปริมาณกระแสคงที่ด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ

ค่าศักย์ไฟฟ้า E_{in} ที่ทางเข้าถูกกำหนดให้เป็นลบขณะที่ทางเข้าลบของออปแอมป์มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ถ้าให้ความต่างศักย์คร่อมบน R_1 เท่ากับ E_{in} กระแสไฟฟ้าที่ผ่าน R_1 จะเท่า

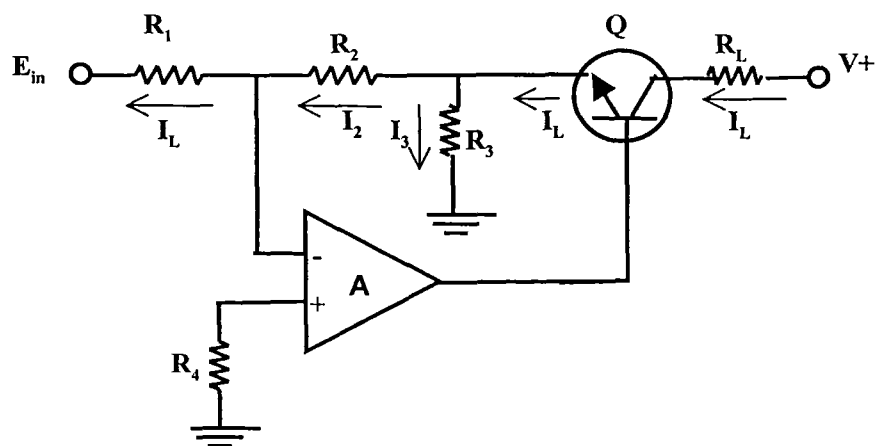
กับ $\frac{E_{in}}{R_1}$ แต่เนื่องจากกระแสที่ทางเข้าของออปแอมป์น้อยมากทำให้ กระแสที่ไหลผ่าน R_1 เท่ากับกระแสที่ผ่าน R_2 ส่งกระแสผ่าน R_3 จะเท่ากับความต่างศักย์คร่อมบน R_3 หาด้วยความต้านทานของ R_3

$$I_3 = \frac{V_{R_3}}{R_3} = \frac{I_2 R_2}{R_3}$$

กระแสที่ผ่านภาระ I_L จะเท่ากับ $I_2 + I_3$

$$I_L = I_2 + I_3 = I_2 + \frac{I_2 R_2}{R_3} = I_2 \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) = \frac{E_{in}}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) \dots\dots\dots(49)$$

ซึ่งจะเห็นว่ากระแส I_L ถูกควบคุมให้คงที่ด้วยการกำหนดค่า E_{in} , R_1 , R_2 และ R_3



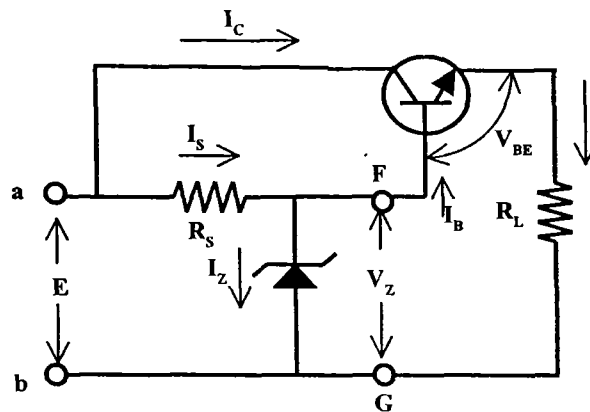
ภาพประกอบ 23 วงจรควบคุมกระแสโดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลบกับทางเข้าลบของออปแอมป์

ที่มา: Walter G. Jung. (1977). *IC OP-AMP COOKBOOK*. p. 177.

ลักษณะของวงจรคล้ายรูปแบบที่ 1 ทราานซิสเตอร์ในวงจรทำหน้าที่ผ่านกระแสไฟฟ้า และเป็นอุปกรณ์กำลังงาน การพิจารณาเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ในวงจร จะต้องคำนึงถึงกำลังงานและความต่างศักย์เช่นเดียวกับกรณีของรูปแบบที่ 1

4.10 การใช้ทรานซิสเตอร์ผ่านกระแสไฟฟ้า

การทำให้แหล่งจ่ายจ่ายไฟฟ้ากระแสมีค่ามากขึ้นอาจทำการต่อวงจร โดยใช้ ทรานซิสเตอร์กำลังต่อที่ทางออกของการการเรกกูเรเตอร์ ดังภาพประกอบที่ 24



ภาพประกอบ 24 วงจรเรกกูเรเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่ผ่านกระแสไฟฟ้า

การต่อทรานซิสเตอร์ตามรูปเป็นการต่อแบบ ตามความต่างศักย์ (Voltage Follower) ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก จะมีค่าเท่ากับ V_L โดย

$$V_L = V_Z - V_{BE}$$

เมื่อ V_{BE} เป็นความต่างศักย์ที่คร่อมระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ จากการที่ศักย์ที่เบสของ ทรานซิสเตอร์ ถูกควบคุมไว้ให้เท่ากับ V_Z ด้วยสมบัติของเรกกูเลเตอร์แบบซีเนอร์ไดโอด ดังนั้นจากสมบัติของวงจรขยายสัญญาณทรานซิสเตอร์แบบตามศักย์ไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก จะได้รับการควบคุมให้ต่ำกว่า V_Z อยู่ 0.7 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าความต่างศักย์ที่คงที่ ถ้าให้ I_L เป็น กระแสที่ไหลผ่านภาระ จะได้

$$I_L = I_E = I_C + I_B \approx I_C \quad \dots\dots\dots(50)$$

เมื่อ I_E I_C และ I_B เป็นกระแสอิมิตเตอร์ กระแสคอลเลคเตอร์ และกระแสเบสของ ทรานซิสเตอร์ตามลำดับ กระแสที่ไหลผ่านภาระจะเป็นกระแสอิมิตเตอร์ ซึ่งอาจประมาณว่าเท่ากับกระแสคอลเลคเตอร์ กระแสนี้เป็นกระแสที่จ่ายจากทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่

ทรานซิสเตอร์ตามลำดับ กระแสที่ไหลผ่านภาระจะเป็นกระแสอิมิตเตอร์ ซึ่งอาจประมาณว่าเท่ากับกระแสคอลเลคเตอร์ กระแสนี้เป็นกระแสที่จ่ายจากทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่ยังไม่ได้ควบคุมความต่างศักย์ให้คงที่ ผ่านทางทรานซิสเตอร์ไปยังภาระ ซึ่งในทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแส ซึ่งบางครั้งเรียกว่า เป็นวัสดุผ่าน (Pass Element) ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการกระแสของภาระ ทรานซิสเตอร์จะปรับระดับกระแส ให้เป็นไปตามความต้องการของภาระ โดยความต่างศักย์ V_L คงที่

กระแสที่ผ่านทรานซิสเตอร์ ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปในทรานซิสเตอร์ กำลังงานนี้จะเกิดความร้อนในทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นกำลังงานที่ไม่เป็นประโยชน์ ปริมาณกำลังงานนี้มีค่าคือ

$$P_D = V_{CE} I_C \quad \dots\dots\dots(51)$$

เมื่อ V_{CE} เป็นความต่างศักย์ระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์

I_C เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งในที่นี้เป็นกระแสที่จ่ายให้กับภาระ

จากสมการจะเห็นว่า กำลังงานที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์จะมีค่ามาก ถ้าความต่างศักย์ที่คร่อมระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์มีค่ามาก และกระแสที่จ่ายให้กับภาระมีค่ามาก ความต่างศักย์ V_{CE} จะเท่ากับ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้า E กับ V_L หรือ

$$V_{CE} = E - V_L \quad \dots\dots\dots(52)$$

กระแสคอลเลคเตอร์

$$I_C = I_L = \frac{V_L}{R_L}$$

จากการที่ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ $V_L - 0.7$ โวลต์ ขนาดของความต่างศักย์ V_{CE} จึงขึ้นกับขนาดของ E ในกรณีที่ E สูงกว่า V_L มาก V_{CE} ก็จะมีค่ามาก ดังนั้นถ้าพิจารณาขณะที่ทรานซิสเตอร์ผ่านกระแสไปให้กับภาระค่าหนึ่ง การใช้ E ที่มีค่าสูงกว่า V_L มาก จะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานในทรานซิสเตอร์ได้มากตามสมการ 51 กำลังงานที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์ จึงขึ้นกับการเลือกกำหนดค่า E

กำลังงานสูงสุดที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์ จะเกิดขึ้นเมื่อ V_{CE} และกระแสที่ภาระต้องการ I_L ตามสมการที่ 51 มีค่าสูงสุด ซึ่ง V_{CE} จะมีค่าสูงสุด เมื่อ E ตามสมการที่ 52 มีค่าสูง

สุด ดังนั้นจากการแทนสมการที่ 52 ลงในสมการที่ 51 ให้ E เท่ากับ $E_{\max}$ และกระแสสูงสุดที่ภาระต้องการ เป็น $I_{L\max}$ จะได้กำลังงานสูงสุดที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์ คือ

$$P_{D\max} = (E_{\max} - V_L)I_{L\max}$$

การใช้ทรานซิสเตอร์ในการผ่านกระแส ทำให้กระแสที่จ่ายจากทางออกของซีเนอร์ไดโอดเรกกูเลเตอร์ต่ำกว่ากระแสที่ภาระต้องการ เรกกูเลเตอร์จะจ่ายกระแสให้กับเบส ซึ่งกระแสนี้ จะได้รับการขยายตัวอัตราขยาย β ของทรานซิสเตอร์ แล้วจึงจ่ายให้กับภาระ ดังนั้นกระแสที่จ่ายจากทางออกของซีเนอร์ไดโอดเรกกูเลเตอร์ จึงเท่ากับ $\frac{I_L}{\beta}$ การลดลงของกระแสที่จ่ายจากซีเนอร์ไดโอดเรกกูเลเตอร์ ทำให้การกำหนดค่าตัวต้านทาน R_s ตลอดจนกำลังงาน ที่สูญเสียในตัวต้านทาน และในซีเนอร์ไดโอดเปลี่ยนไป จากวิธีการเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อเราเปลี่ยนกระแสที่จ่ายจากซีเนอร์ไดโอดเรกกูเลเตอร์ จาก I_L และ $\frac{I_L}{\beta}$ จะได้

$$R_s = \frac{(E_{\min} - V_Z)}{(I_{Z\min} + \frac{I_L}{\beta})}$$

$$I_{S\max} = \frac{(E_{\max} - V_Z)}{R_s}$$

$$P_{R\max} = I_{S\max}^2 R_s$$

$$P_D = (E_{\max} - V_L)I_{L\max} \dots\dots\dots(53)$$

เมื่อ $E_{\max}$ และ $E_{\min}$ เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด ที่ทางออกของเรกติไฟเออร์

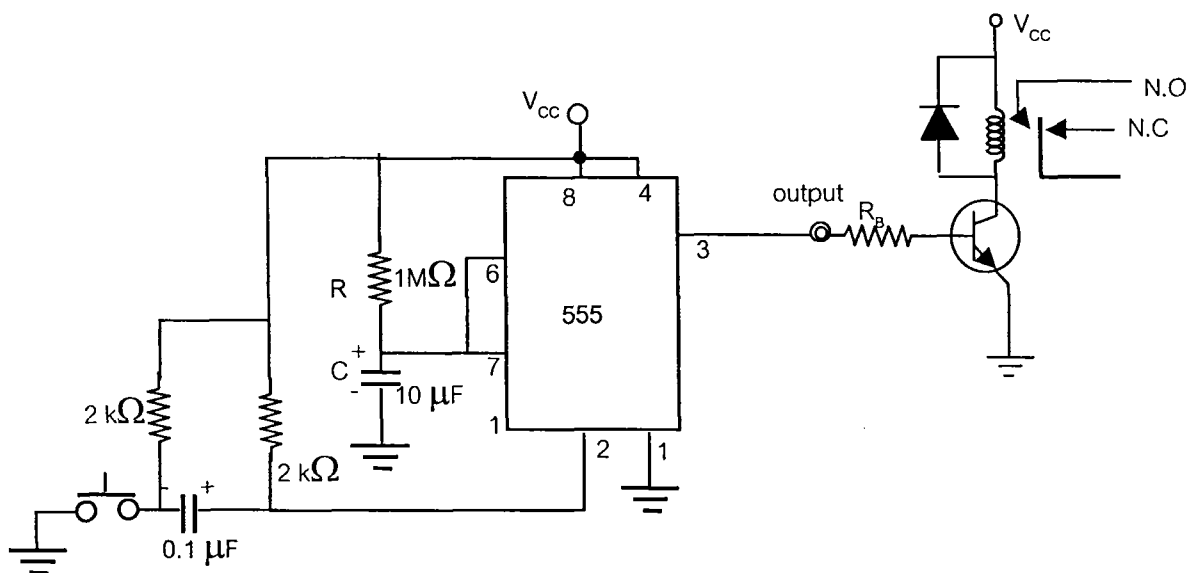
- $I_{\max}$ เป็นกระแสสูงสุดที่ไหลผ่าน R_L เกิดขึ้นเมื่อ $E = E_{\max}$
- $P_{R\max}$ เป็นกำลังงานสูงสุดที่เกิดขึ้นในซีเนอร์ไดโอด
- $P_{Z\min}$ เป็นกำลังงานสูงสุดที่เกิดขึ้นในซีเนอร์ไดโอด
- P_D เป็นกำลังงานสูงสุดที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์

4.11 วงจรตั้งเวลา เปิดปิดสวิตช์

วงจรนี้จะเป็นดังภาพประกอบ 25 วงจรนี้มีชื่อเรียกว่า monostable multivibrator เริ่มแรกศักย์ไฟฟ้าที่ขา 6,7 และ 2 จะเท่ากับ V_{CC} ทางออก(3)จะเป็นระดับศักย์ไฟฟ้าต่ำในที่นี้คือ 0 โวลต์ ทรานซิสเตอร์จะนำกระแสไฟฟ้าประจุบนตัวเก็บประจุจะคายออกผ่านทรานซิสเตอร์ทำ

ให้ระดับของศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า (6) ต่ำกว่า $2V_{CC}/3$ ซึ่งทางออกของวงจรจะคงสถานะเดิม เมื่อ กดสวิตช์ S ศักย์ไฟฟ้าที่ (2) จะลดลงเป็นศูนย์ชั่วขณะที่กดสวิตช์ ในช่วงเวลาสั้นๆ นี้ ระดับศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจะเปลี่ยนเป็นระดับสูง ขณะนี้ทรานซิสเตอร์จะหยุดนำกระแสไฟฟ้าประจุเริ่มสะสมประจุเพิ่มขึ้น จนศักย์ไฟฟ้าที่ (6) สูงกว่า $2V_{CC}/3$ อีกครั้งทำให้ทางออกของวงจรกลับมาเป็นศูนย์ ทรานซิสเตอร์จะนำกระแสไฟฟ้าประจุจนตัวเก็บประจุจะคายออกผ่านทรานซิสเตอร์ ทำให้ระดับของศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า (6) ต่ำกว่า $2V_{CC}/3$

ช่วงเวลาที่ศักย์ไฟฟ้าทางออก(3)คงค่าระดับสูงอยู่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับ (6) โดยช่วงเวลานี้จะเท่ากับ $1.1 RC$ ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกนี้ใช้ควบคุมสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยทรานซิสเตอร์ (ดูรายละเอียดเรื่องสวิตช์ ทรานซิสเตอร์) เราจึงสามารถใช้วงจรนี้เป็นสวิตช์ตั้งเวลาสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 25 วงจรตั้งเวลา สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์

บทที่ 3

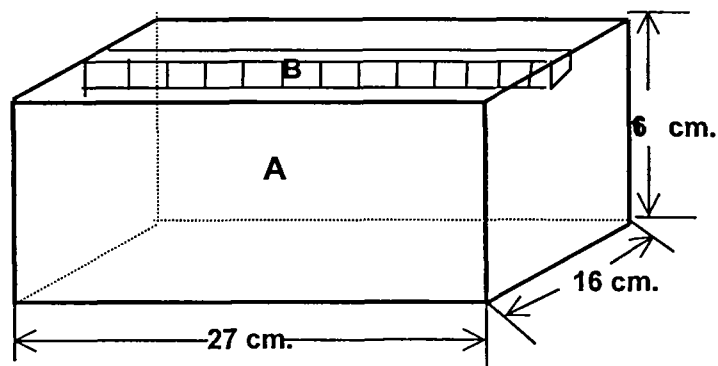
วิธีการวิจัย

การออกแบบสร้างชุดการทดลอง

อุปกรณ์ประกอบด้วย ภาชนะใส่ดินขาว ขั้วไฟฟ้าบวกและลบ โดยระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีสเกลบอกระยะติดกับอะคริลิก แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ขนาด 100 มิลลิแอมแปร์และ 100 โวลต์ เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าในการทดลอง รายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละส่วนเป็นดังนี้

1. ภาชนะใส่ดินขาว

เพื่อให้การทดลองเป็นไปด้วยความสะดวกจึงทำการออกแบบสร้างกล่องสำหรับใส่ดินขาวที่ทำมาจากแผ่นพลาสติกใสอย่างหนา ซึ่งเป็นฉนวนไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ มีความใสสามารถมองเห็นปริมาตรของดินได้อย่างชัดเจน มีลักษณะและรูปแบบดังรูป



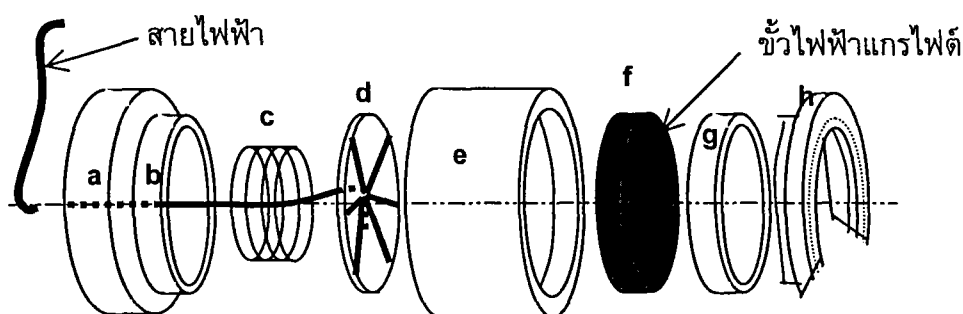
ภาพประกอบ 26 กล่องใส่ดินขาว

A เป็นกล่องพลาสติกใสที่ทำจากแผ่นอะคริลิกอย่างหนา ประกอบเป็นกล่องโดยไม่ให้น้ำซึมผ่านออกมานอกกล่อง มีขนาดความยาว 27 เซนติเมตร ความกว้าง 16 เซนติเมตร และความสูง 6 เซนติเมตร

B เป็นแท่งอาคริลิกอย่างหนา ตัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยม โดยที่ด้านหนึ่งติดกับไม้บรรทัด เพื่อเป็นสเกลสำหรับบอกระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยที่ปลายทั้งสองข้างของแท่งเจาะเป็นรู ผ่านตัวกล่องเพื่อให้ยึดติดกับกล่องได้ และสามารถถอดออกได้เมื่อต้องการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้า

2. ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าบวกที่ใส่ลงไปในน้ำดินนั้น จะบรรจุอยู่ในตัวเรือนซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อให้ขั้วไฟฟ้านำไฟฟ้าได้เพียงด้านเดียว ขั้วไฟฟ้านี้สามารถถอดออกเปลี่ยนได้ ซึ่งขั้วไฟฟ้านี้ทำขึ้นจากแกรไฟต์ผสมกับปูนพลาสเตอร์ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 1:2 และ 1:3 ตัวเรือนสำหรับใส่ขั้วไฟฟ้า ทำมาจากท่อ PVC ซึ่งเป็นฉนวน โดยออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ให้สามารถถอดออกเพื่อทำความสะอาดและ เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าได้สะดวก ดังรูป



ภาพประกอบ 27 ส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าบวก

จากภาพประกอบที่ 27 ประกอบด้วย

ส่วน **a** ของตัวเรือนทำจากฝาปิดท่อ PVC สำหรับปิดท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ที่มีปลายข้างหนึ่งปิด มีความยาวด้านข้างของทรงกระบอก 3 เซนติเมตร และเจาะรูด้านปลายปิดตรงกลางให้มีขนาดพอดีกับสายไฟที่ผ่านเข้าไปภายในขั้วไฟฟ้า

ส่วน **b** เป็นท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว มีความยาวด้านข้างทรงกระบอก 2 เซนติเมตร นำมาเชื่อมต่อกับส่วน **a** ด้วยน้ำยาประสานท่อ PVC โดยให้มีส่วนที่ยื่นออกมาประมาณ 1 เซนติเมตร

ส่วน **c** เป็นสปริงที่มีความยาวมากกว่า 3 เซนติเมตรเล็กน้อย เมื่อใส่ **c** เข้าไปในส่วนของ **a** และ **b** ที่ติดกันแล้ว จะมีสปริง **c** ยื่นออกมาเล็กน้อยในการทดลองนี้ สปริง **c** จะทำหน้าที่ดันให้แผ่นทองแดงและขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ติดกัน และทำให้ถอดขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ออกจากตัวเรือนได้ง่าย

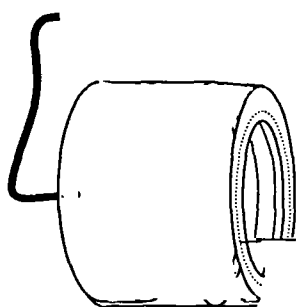
ส่วน d เป็นแผ่นทองแดงที่ตัดเป็นรูปวงกลมขนาดพอดีกับเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอกของ b ทำการร้อยสายไฟผ่าน a b c และเชื่อมต่อกับแผ่น d ด้านหลัง จากนั้นตัดลวดทองแดงขนาดเท่ากันจำนวน 6 เส้น แต่ละเส้นมีความยาวเท่ากับรัศมีของแผ่น d แล้วเชื่อมลวดทั้ง 6 เส้นกับด้านหน้าของ d โดยให้เส้นลวดแต่ละเส้นวางตัวตามแนวรัศมีของวงกลม d ลวดทองแดงเหล่านี้จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ติดกับแผ่นทองแดง ซึ่งหากขั้วแกรไฟต์ติดกับแผ่นทองแดงแล้ว จะทำให้ถอดขั้วไฟฟ้าได้ยาก และผู้ทดลองมีโอกาสดินที่มากาะอยู่กับแกรไฟต์นั้นเสียรูปไป แผ่นทองแดงจะทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับขั้วแกรไฟต์เพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอในขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์

ส่วน e เป็นข้อต่อ PVC ที่ใช้สำหรับต่อท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว ตัดให้มีความยาวด้านข้าง 3 เซนติเมตร ส่วน e นี้จะสวมกับ b ได้พอดี ทั้งนี้ตรงรอยต่อระหว่าง e กับส่วน b จะมีวงแหวนยาง (rubber O ring) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำเข้าสู่บริเวณด้านหลังของแผ่นทองแดง d

ส่วน f เป็นขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ การทำขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์นี้ทำได้โดยหล่อส่วนผสมระหว่างแกรไฟต์กับปูนปลาสเตอร์ และนำลงในแบบซึ่งเป็นข้อต่อ PVC ที่ใช้สำหรับต่อท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว มีความยาวด้านข้าง 1 เซนติเมตร นำแกรไฟต์ที่ได้ใส่ไปในส่วน e ต้องสามารถใส่ลงได้พอดี จนติดกับแผ่นทองแดงด้านใน

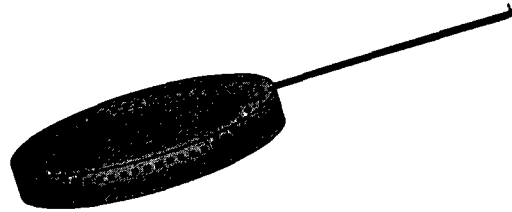
ส่วน g เป็นท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว มีความยาวด้านข้าง 1.5 เซนติเมตร ใส่ส่วน g ลงไปในส่วน e ต่อจากขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ หน้าที่ของ g คือ ทำให้ดินที่มากาะกับแกรไฟต์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกตามลักษณะของ g

ส่วน h มีลักษณะคล้ายกับ a และ b คือมีข้อต่อท่อ PVC ที่ใช้สำหรับต่อท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วปลายเปิดทั้งสองข้าง เชื่อมอยู่กับท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ทางด้านล่างของส่วน h ตัดเป็นช่องเปิดขนาด 1 นิ้ว เพื่อให้ น้ำดินส่วนเกินไหลออกมาได้ โดยไม่มีผลต่อการเกาะติดของดิน นอกจากนี้ส่วน h ยังทำหน้าที่ดันให้ส่วนของแกรไฟต์กับส่วน g เข้าไปอยู่ในกระบอก e โดยยึด h ติดกับ e ด้วยสกรูตรงด้านข้าง เมื่อประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าแล้วจะได้ลักษณะดังรูป ซึ่งเป็นขั้วบวกของวงจร



ภาพประกอบ 28 ส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่เป็นขั้วบวกของวงจร

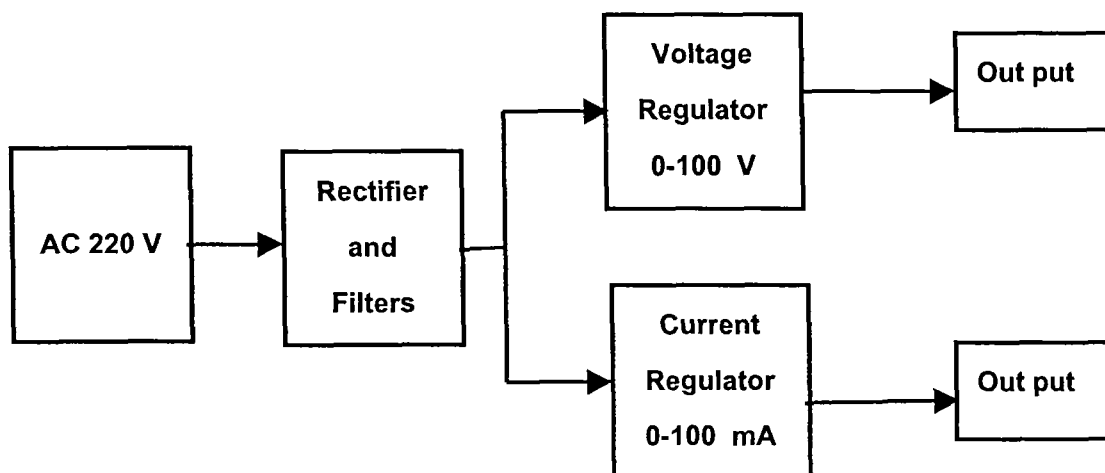
ส่วนขั้วลบของวงจร เป็นทรงกระบอกที่ทำด้วยแกรไฟต์ผสมปูนพลาสติกเช่นเดียวกับขั้วบวก โดยในระหว่างการหล่อขั้วลบ ได้นำลวดทองแดงมาขดเป็นวงที่ปลายข้างหนึ่ง แล้วนำส่วนที่ขดเป็นวงนี้ ผึงอยู่ในขั้วแกรไฟต์ ส่วนที่เหลือของลวดทองแดง จะทำหน้าที่เชื่อมต่อกับส่วนอื่นของวงจรต่อไป ดังภาพประกอบที่ 29



ภาพประกอบ 29 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่เป็นขั้วลบของวงจร

3.1.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์กับดินขาว จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังภาพประกอบที่ 30



ภาพประกอบ 30 แผนผังวงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC Powersupply)

จากภาพเป็นองค์ประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งประกอบด้วยวงจรการแปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิดเต็มคลื่น (Full wave Rectifier) พร้อมด้วยวงจรกรองกระแส (Filter) เพื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มีค่าความเรียบ

มากขึ้น แต่ค่ากระแสที่ได้จากการกรองเพียงครั้งเดียว มีค่าความต่างศักย์ตรงทางออกไม่คงที่ จึงต้องใช้วงจรควบคุมความต่างศักย์คงที่ (Voltage Regulator) เพื่อจ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ให้กับ การทดลอง ในการทดลองนี้ให้ค่าความต่างศักย์คงที่ปรับได้อยู่ระหว่าง 0 - 100 โวลต์ นอกจากนี้ ยังต้องทำให้กระแสมีความคงที่เช่นกัน โดยได้ต่อวงจรควบคุมความคงที่ของกระแส (Current Regulator) เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้การทดลองโดยเครื่องมือที่สร้างขึ้น สามารถให้ ค่าความคงที่ของกระแสในช่วง 0 - 100 มิลลิแอมแปร์ โดยต่อออกมาจากวงจรกรองกระแสอีกครั้งหนึ่ง แล้วต่อให้กับภาระหรือชุดทดลอง

การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนั้นจะแยกออกเป็นตอน ตามสิ่งที่ต้องการจะศึกษา คือ

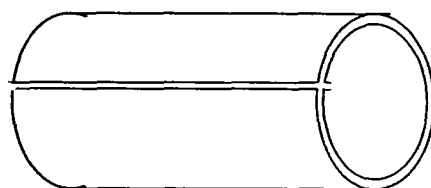
1. การทดสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์

ในการใช้แกรไฟต์ผสมปูนปลาสเตอร์เป็นขั้วไฟฟ้า จำเป็นต้องทราบสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุดังกล่าว ซึ่งสามารถดำเนินการได้เป็นขั้นตอนดังนี้

1.1 การเตรียมแท่งแกรไฟต์

ทำการทดสอบสมบัติของความนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่อัตราส่วนผสมระหว่างแกรไฟต์ต่อปูนปลาสเตอร์โดยน้ำหนักที่อัตราส่วน 1:1 1:2 และ 1:3 โดยจะให้อัตราส่วนน้ำเท่ากับน้ำหนักแกรไฟต์บวกกับน้ำหนักปูนปลาสเตอร์

ในการทดสอบคุณสมบัติความนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ผสมปูนปลาสเตอร์นี้ จะทำการหล่อแกรไฟต์ผสมปูนปลาสเตอร์ เป็นรูปทรงกระบอก โดยจะทำทรงกระบอกนี้ทุกอัตราส่วนอัตราส่วนละ 10 ชิ้น ในการหล่อใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{4}$ นิ้ว ตัดเป็นท่อน ยาว 6 เซนติเมตร แล้วผ่าด้านข้างออกเพื่อถอดแบบออกได้ง่าย



ภาพประกอบ 31 แบบหล่อขั้วไฟฟ้า

1.2 วิธีการหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของแท่งแกรไฟต์

1. ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่าความต้านทานระหว่างปลายทั้งสองข้างของแกรไฟต์
2. นำค่าความต้านทานที่อ่านได้จากการวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์มาคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าจากสมการ

$$G = \frac{1}{R} = \sigma \frac{A}{L}$$

และ

$$\sigma = G \frac{L}{A}$$

โดยที่ G คือ ค่าความนำไฟฟ้า (Conductance)

L คือ ความยาวของแท่งตัวนำ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวนำ

σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)

2. การทดสอบหาขอบเขตการใช้งานของอุปกรณ์

2.1 การเตรียมน้ำดินขาว

ได้เตรียมน้ำดินขาวที่มีอัตราส่วนของดินต่อน้ำโดยน้ำหนักไว้ 3 อัตราส่วน โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. นำดินขาวมาบดให้ละเอียดไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ดินแห้ง
2. นำดินขาวที่ผ่านการอบจำนวน 1000 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 1000 CC ในอัตราส่วน 1:1 ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำดินขาวที่อบแล้วมาชั่งจำนวน 1000 กรัม ผสมน้ำกลั่น 2000 CC คนให้เข้ากัน ซึ่งเป็นอัตราส่วน 1:2 ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำดินขาวที่อบแล้วมาชั่งจำนวน 1000 กรัม ผสมน้ำกลั่น 3000 CC คนให้เข้ากันซึ่งเป็นอัตราส่วน 1:3 ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำน้ำดินขาวที่ผสมแล้วทั้งสามอัตราส่วนมาหาค่าความหนาแน่นของน้ำดินในแต่ละอัตราส่วน โดยใช้ปิเกตอร์ขนาด 100 mL มาชั่งน้ำหนักก่อน แล้วเติมน้ำดินขาวลงไป 60 mL แล้วนำไปชั่งอีกครั้งหนึ่ง คำนวณหาค่าความหนาแน่นของน้ำดินขาว ตามสมการ

$$\rho = \frac{M}{V}$$

โดยที่ M เป็นน้ำหนักของน้ำดินขาว
 V เป็นปริมาตรของน้ำดินขาว

2.2 วิธีทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่กับภาระที่ทราบค่าความ

ต้านทาน

ก่อนที่จะทำการทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ในน้ำดิน ได้มีการทดสอบกับตัวต้านทานที่ทราบค่าต่างๆ กัน คือ $200\ \Omega$ $400\ \Omega$ $600\ \Omega$ $800\ \Omega$ และ $1\ \text{k}\Omega$ โดยการกำหนดขนาดของความต้านทาน พิจารณาจากกระแสสูงสุดที่ใช้ในการทดลองจะต้องให้ค่าความต่างศักย์คร่อมบนตัวต้านทานไม่เกิน 100 โวลต์ หลังจากการทดสอบกับตัวต้านทานที่ทราบค่าแล้วจึงทำการทดสอบกับน้ำดินขาว ซึ่งรายละเอียดและขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

ทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ 0-100 มิลลิแอมป์ โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 25 50 75 และ 100 มิลลิแอมป์ ให้กับตัวต้านทานที่มีความต้านทานแตกต่างกัน

1. เริ่มจากจ่ายกระแสคงที่ 25 มิลลิแอมป์ ให้กับตัวต้านทาน $200\ \Omega$ แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานนั้น
2. ทำเช่นเดียวกับในข้อ 1 โดยเปลี่ยนความต้านทานเป็น $400\ \Omega$ ถึง $600\ \Omega$ ถึง $800\ \Omega$ และ $1\ \text{k}\Omega$ ตามลำดับ
3. ทำการทดสอบด้วยวิธีตามข้อ 1 และ 2 กับกระแสคงที่ 50 มิลลิแอมป์ 75 มิลลิแอมป์ และ 100 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ
4. คำนวณปริมาณร้อยละของการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าจากการแปรค่าความต้านทานที่เป็นภาระ

2.3 วิธีทดสอบการจ่ายความต่างศักย์คงที่กับภาระที่ทราบค่าความ

ต้านทาน

การทดสอบการจ่ายค่าความต่างศักย์คงที่นี้ ได้ทดสอบกับตัวต้านทานที่ทราบค่าต่างๆ กัน คือ $1\ \text{k}\Omega$ - $4\ \text{k}\Omega$ โดยการกำหนดขนาดของความต้านทาน พิจารณาจากความต่างศักย์สูงสุดที่ใช้ในการทดลองจะต้องให้ค่ากระแสผ่านตัวต้านทานไม่เกิน 100 มิลลิแอมป์ หลังจากการทดสอบกับตัวต้านทานที่ทราบค่าแล้วจึงทำการทดสอบกับน้ำดินขาว ซึ่งรายละเอียดและขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

ทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0-100 โวลต์ โดยทำการจ่ายความต่างศักย์คงที่ 25 50 75 และ 100 โวลต์ ให้กับตัวต้านทานที่มีความต้านทานแตกต่างกัน

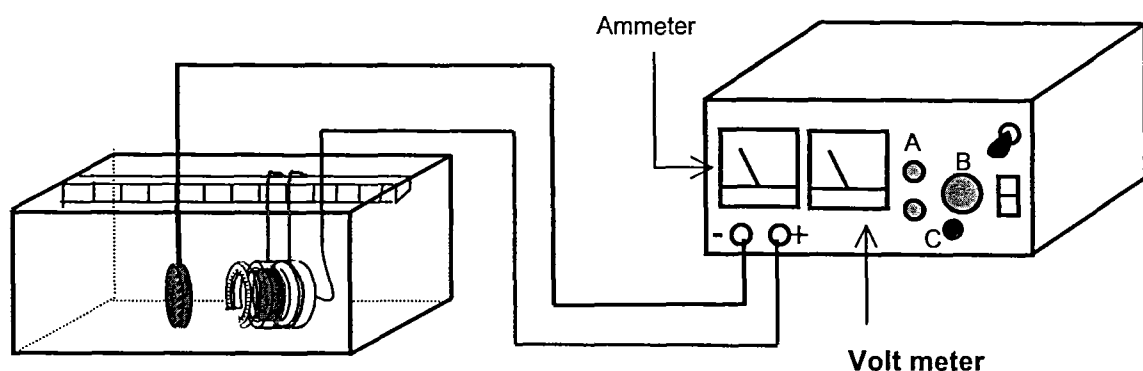
1. เริ่มจากจ่ายความต่างศักย์คงที่ 25 โวลต์ ให้กับตัวต้านทาน $1\ \text{k}\Omega$ แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทานนั้น

2. ทำเช่นเดียวกับในข้อ 1 โดยเปลี่ยนความต้านทานเป็น $1.5\text{ k}\Omega$ $2.0\text{ k}\Omega$ $3.0\text{ k}\Omega$ และ $4\text{ k}\Omega$ ตามลำดับ
3. ทำการทดสอบด้วยวิธีตามข้อ 1 และ ข้อ2 กับความต่างศักย์คงที่ 50 โวลต์ 75 โวลต์ และ 100 โวลต์ ตามลำดับ
4. คำนวณปริมาณร้อยละของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จากการแปรค่าความต้านทานที่เป็นภาระ

2.4 การทดสอบหาค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่ระยะต่าง ๆ

การทดสอบนี้จะให้ค่าสูงสุดของกระแสหรือความต่างศักย์ เมื่อจัดวางขั้วบวกและลบที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน โดยที่ระยะใกล้สุดระหว่างขั้วบวกและลบ ถูกจำกัดด้วยขนาดของตัวเรือนของขั้วบวก ซึ่งพบว่าระยะดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 5 เซนติเมตร และระยะห่างที่ไกลที่สุดจำกัดโดยขนาดของภาชนะ การทดสอบจะกระทำกับน้ำดินที่มีอัตราส่วนดินต่อน้ำ ที่ต่างกัน 3 อัตราส่วน คือ 1:1 1:2 และ 1:3 และขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนผสมแกรไฟต์ต่อปูนปลาสเตอร์ต่างกัน 3 อัตราส่วน ซึ่งผลการทดลองจะบ่งชี้ให้เห็นถึงขอบเขตสูงสุดของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ ในการเคลือบดินที่มีความหนาแน่นน้ำดินและระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยมีวิธีการทดสอบตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำดินขาว ทั้งสามอัตราส่วนเหมือนในหัวข้อ 2.1 ให้มีปริมาตรประมาณ 3000 ลูกบาศก์เซนติเมตรทุกอัตราส่วน เพื่อให้ น้ำดินท่วมขั้วไฟฟ้า
2. จัดอุปกรณ์ดังรูป



ภาพประกอบ 32 การต่อชุดอุปกรณ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ความต่างศักย์ไฟฟ้า กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 7 9 11 13 และ 15 เซนติเมตร

3. ปรับสวิตช์ เลือกใช้วงจรควบคุมความต่างศักย์คงที่จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า จัดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็น 5 เซนติเมตร ที่ระยะนี้จะค่อย ๆ เพิ่มความต่างศักย์จากปุ่มปรับ B อันมีผลทำให้กระแสในวงจรค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จดบันทึกทั้งค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ เมื่อความต่างศักย์มีค่าถึง 100 โวลต์หรือกระแสมีค่าถึง 100 มิลลิแอมแปร์ ทำซ้ำข้อ 3 โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าครั้งละ 2 เซนติเมตร จนถึงระยะไกลที่สุดคือ 15 เซนติเมตร

5. เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสติก 1:2 ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 และข้อ 4

6. เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสติก 1:3 ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 และข้อ 4

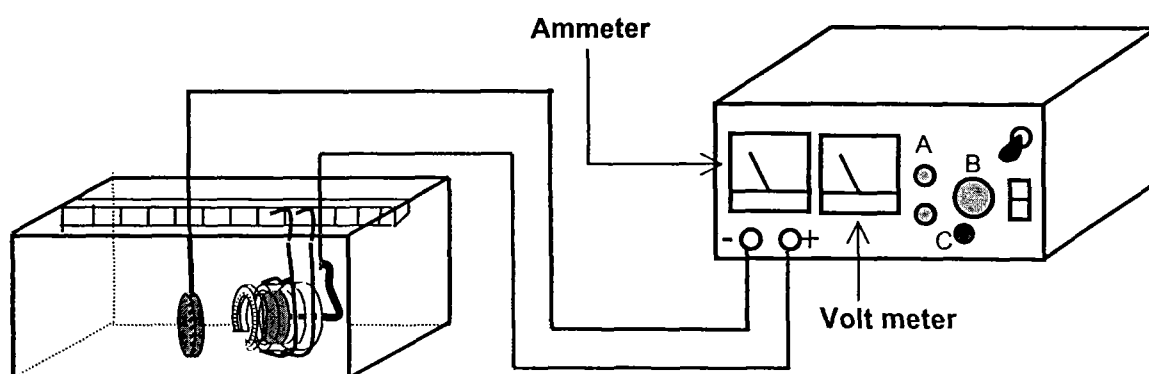
7. เปลี่ยนน้ำดินขาวเป็นอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:2 แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึงข้อ 6

8. เปลี่ยนน้ำดินขาวเป็นอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:3 แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึงข้อ 6

2.3 ทดสอบการจ่ายกระแสคงที่ โดยการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเพิ่มของมวลบนขั้วแกรไฟต์ กับกระแสไฟฟ้าในช่วง 10 -100 มิลลิแอมแปร์

ในการหาความสัมพันธ์ของอัตราการเพิ่มมวลดินขาวบนขั้วไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า เตรียมน้ำดินขาวโดยทำเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.1 โดยในกรณีนี้จะใช้อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 ในการทำการทดลอง ผสมกันแล้วให้มีปริมาตรประมาณ 6,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูป



ภาพประกอบ 33 การต่อชุดอุปกรณ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับมวลของดิน

2. ทำการทดลองโดย ใช้อัตราส่วนแกรไฟต์กับปูนพลาสเตอร์เริ่มที่อัตราส่วน 1:1 จัดให้ระยะห่างระหว่างขั้วใกล้สุดคือ 5 เซนติเมตร แล้วเลือกใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ จากนั้นเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าจากปุ่มปรับ A ให้จ่ายกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์โดยดูจากแอมมิเตอร์ พร้อมทั้งบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วกดปุ่ม C เพื่อทำการตั้งเวลาอัตโนมัติในการทดลองเป็นเวลา 2 นาที

3. นำขั้วไฟฟ้าที่มีดินขาวเกาะติดอยู่ คือขั้วบวกของวงจรออกจากตัวเรือนขั้วไฟฟ้า ดังพักไว้

4. เปลี่ยนขั้วแกรไฟต์อัตราส่วน 1:1 ใส่ลงในขั้วบวกแทนขั้วแกรไฟต์ชิ้นแรกที้นำออกมาพักไว้พร้อมดิน แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2 และข้อ 3 โดยเพิ่มค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าครั้งละ 10 มิลลิแอมป์ จนถึง 100 มิลลิแอมป์หรือ 100 โวลต์

5. เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เป็นอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์เป็น 1:2 แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึงข้อ 4

6. เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เป็นอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์เป็น 1:3 แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึงข้อ 4

7. นำดินที่ติดอยู่บนแกรไฟต์พร้อมทั้งขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ ไปอบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำดินออกจากแผ่นแกรไฟต์แล้วนำไปชั่งหามวล

8. ทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและมวลของดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าทั้งสามอัตราส่วน

2.4 ทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์คงที่ และทำการทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวจากการขึ้นรูป

การหาความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาว โดยการจ่ายค่าความต่างศักย์คงที่ ซึ่งในการทดลองนี้แบ่งเป็น การทดลองหาความหนาแน่นของพาราฟินและการทดลองหาความหนาแน่นของดินที่ได้จากการเกาะติดบนขั้วไฟฟ้า โดยมีวิธีการดังนี้

2.4.1 การหาความหนาแน่นของพาราฟิน

1. นำพาราฟินแบบก้อนมาหาค่าความหนาแน่นก่อน โดยนำก้อนพาราฟินมาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่งแบบดิจิตอล

2. นำเหล็กมาหาปริมาตรโดยการแทนที่น้ำ

3. นำเหล็กในข้อ 2 มาผูกติดกับก้อนพาราฟินในข้อ 1 แล้วนำไปหาปริมาตรโดยวิธีการแทนที่น้ำ จะได้ปริมาตรของเหล็กรวมกับพาราฟิน

4. นำค่าปริมาตรของพาราฟินรวมกับเหล็กในข้อ 3 ลบด้วยค่าปริมาตรของเหล็กในข้อ 1 จะได้ปริมาตรของก้อนพาราฟิน แล้วนำไปคำนวณหาความหนาแน่นของพาราฟิน จาก

$$\rho = \frac{M}{V}$$

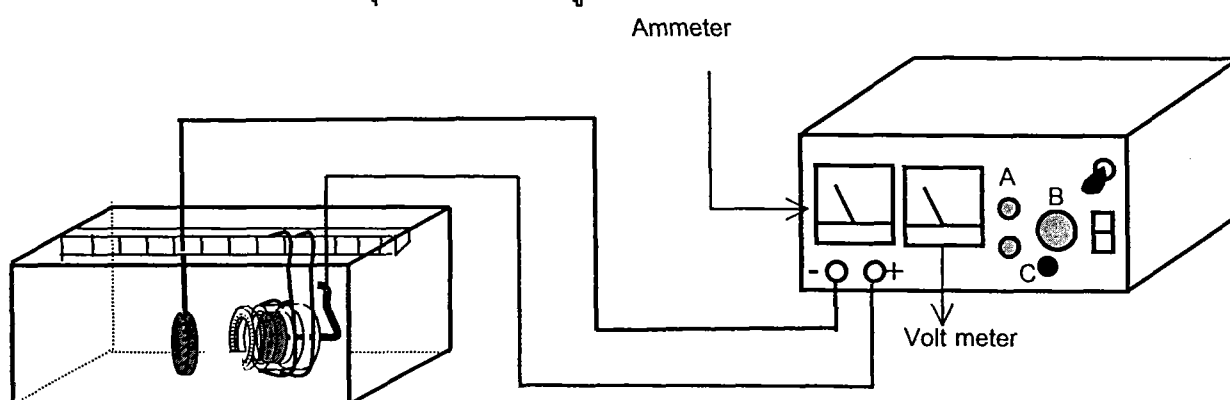
โดยที่ M คือมวลของพาราฟิน

V คือปริมาตรของพาราฟิน

2.4.2 การหาการเกาะติดดินขาวและหาความหนาแน่นของดิน

เตรียมน้ำดินด้วยวิธีการเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.1 โดยในกรณีนี้จะใช้เฉพาะอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 โดยให้มีปริมาตรประมาณ 6,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1. จัดอุปกรณ์ทดลองดังรูป



ภาพประกอบ 34 การต่อชุดอุปกรณ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่นรวมของดิน

2. ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนแกรไฟต์กับปูนพลาสเตอร์เริ่มที่อัตราส่วน 1:1 จัดให้ระยะห่างระหว่างขั้วใกล้สุดคือ 5 เซนติเมตร แล้วเลือกใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ เพิ่มค่าความต่างศักย์คงที่จากปรับปุ่ม B ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่า 10 โวลต์โดยดูจากโวลต์มิเตอร์ แล้วกดปุ่ม C เพื่อตั้งเวลาอัตโนมัติเท่ากับ 2 นาที

3. นำขั้วไฟฟ้าที่มีดินขาวเกาะติดอยู่ คือขั้วบวกของวงจร ออกจากตัวเรือนขั้วไฟฟ้า ดังพักไว้

4. เปลี่ยนขั้วแกรไฟต์อัตราส่วน 1:1 ใส่ลงในขั้วบวกแทนขั้วแกรไฟต์ชิ้นแรก

ที่นำออกมาพักไว้พร้อมดิน แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2 และข้อ 3 โดยเพิ่มค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าครั้งละ 10 โวลต์จนถึง 100 โวลต์ หรือ เมื่อกระแสถึง 100 มิลลิแอมป์แปร์

5. เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เป็นอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์เป็น 1:2 แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึงข้อ 4

6. เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เป็นอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์เป็น 1:3 แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึงข้อ 4

7. นำดินที่ติดอยู่บนแกรไฟต์พร้อมทั้งขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ ไปอบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

8. นำดินที่ผ่านการอบแห้งไปชั่งในอากาศ ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 5 ตำแหน่ง ในหน่วยกรัม บันทึกค่าไว้เป็น m_1

9. นำพาราฟินที่ทราบค่าความหนาแน่นแล้ว มาต้มให้เหลว จนมีอุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส

10. นำดินที่ชั่งแล้วในข้อ 8 มาจุ่มลงในพาราฟินเหลวที่เตรียมไว้ในข้อ 13 เป็นเวลาไม่เกิน 1 นาที แล้วยกขึ้นอยู่เหนือระดับพาราฟินเหลว รอจนพาราฟินเหลวหยดจากดินจนหมด ถ้าพาราฟินมีอุณหภูมิเท่ากับที่กำหนด เมื่อยกก่อนดินขึ้นจะแข็งตัวเร็ว

11. เมื่อพาราฟินเริ่มเย็นตัวลง สังเกตดูบริเวณรอบก้อนดินว่ามีพาราฟินเคลือบอยู่หรือไม่ และไม่มีรอยแตกหรือรอยร้าวของพาราฟินที่เคลือบอยู่บนก้อนดิน ถ้ามีรอยร้าวให้นำไปจุ่มลงในพาราฟินตามข้อ 14 อีกครั้งหนึ่ง เมื่อแน่ใจแล้วว่าไม่มีรอยร้าวแล้วจึงนำดินที่เคลือบด้วยพาราฟินไปชั่งในอากาศ บันทึกค่าเป็น m_2

12. นำก้อนดินที่เคลือบพาราฟินไปชั่งในน้ำ บันทึกค่าเป็น m_3

13. คำนวณหาค่าความหนาแน่นรวมของดิน จากสมการ¹

$$\rho_b = \frac{\rho_1 \rho_2 m_1}{[\rho_2 (m_2 - m_3) - \rho_1 (m_2 - m_1)]}$$

เมื่อ ρ_b คือ ความหนาแน่นรวมของดิน (g/cm^3)

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm^3)

ρ_2 คือ ความหนาแน่นของพาราฟิน (g/cm^3)

m_1 คือ มวลของก้อนดินหลังอบแห้งแล้วชั่งในอากาศ (g)

¹สำออง ศรีนิลทา. (2517). คู่มือปฏิบัติการปฐพีศาสตร์เบื้องต้น. หน้า 24

m_2 คือ มวลของก้อนดินเมื่อเคลือบพาราฟิน แล้วชั่งในอากาศ (g)

m_3 คือ มวลของก้อนดินเคลือบพาราฟินเมื่อชั่งในน้ำ (g)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์โพรีติก
2. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า และอัตราการเพิ่มมวลของดินขาว
3. ทราบความหนาแน่นรวมของดินขาวที่เกิดจากกระบวนการเกาะติดแบบอิเล็กทรอนิกส์โพรีติก
4. ได้เครื่องมือสำหรับใช้ในการทดลองกับคอลลอยด์อื่น ๆ ที่ต้องการความต่างศักย์และกระแส ในช่วงเดียวกัน

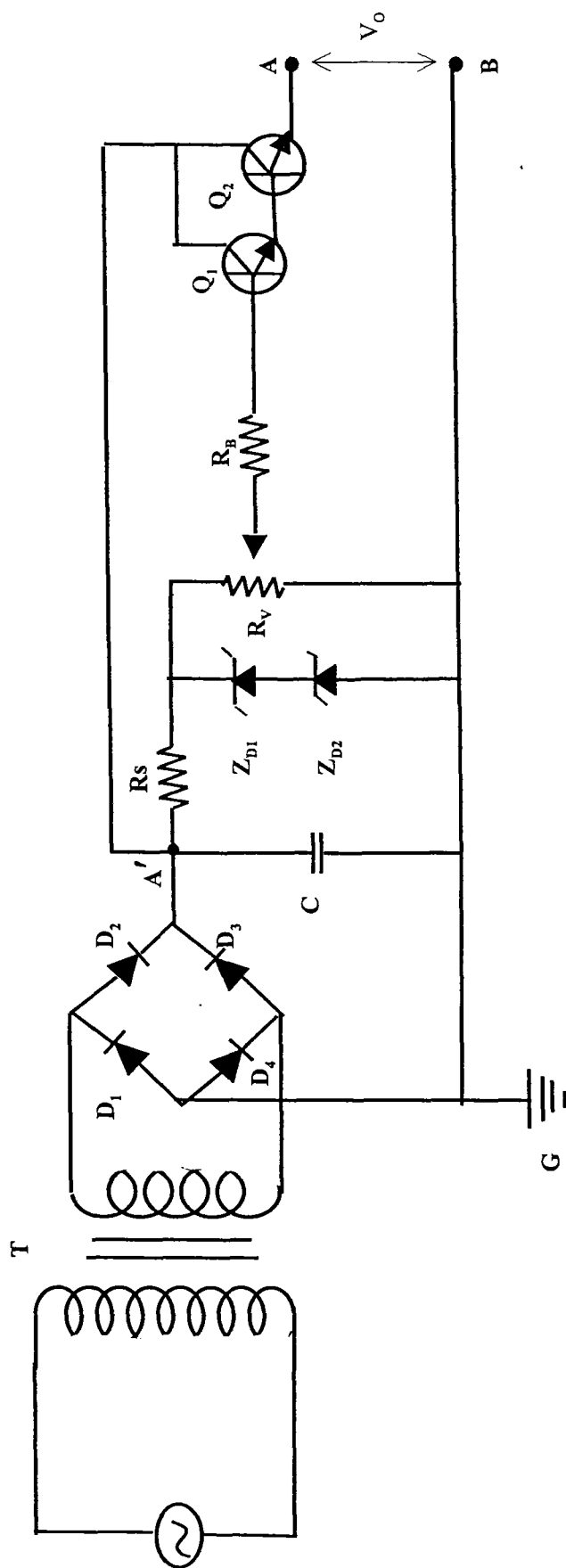
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้น มีสมบัติคือ มีความสามารถในการจ่ายแรงเคลื่อนความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วง 0 -100 โวลต์ กระแสคงที่ในช่วง 0 -100 มิลลิแอมแปร์ สามารถตั้งเวลาปิดด้วยวงจรตั้งเวลาในขณะที่ทำการทดลอง โดยมีส่วนประกอบของวงจรอธิบายดังต่อไปนี้คือ

1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0 - 100 โวลต์ ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้ความต่างศักย์คงที่ในช่วง 0 -100 โวลต์

จากภาพประกอบ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ในช่วง 0- 100 โวลต์ ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

T คือ หม้อแปลง ทางเข้า 220 โวลต์ ทางออก 110 โวลต์ 120 mA

D₁, D₂, D₃, D₄ คือ ไดโอดชนิดซิลิกอน หมายเลข 1N4006

C คือ ตัวเก็บประจุ ขนาด 12,000 ไมโครฟารัด 160 โวลต์

Z_{D1} คือ ซีเนอร์ไดโอด ขนาด 60 โวลต์ ½ วัตต์

Z_{D2} คือ ซีเนอร์ไดโอด ขนาด 60 โวลต์ ½ วัตต์

R_s คือ ความต้านทาน ขนาด 8 กิโลโอห์ม ½ วัตต์

R_B คือ ความต้านทานขนาด 20 กิโลโอห์ม ½ วัตต์

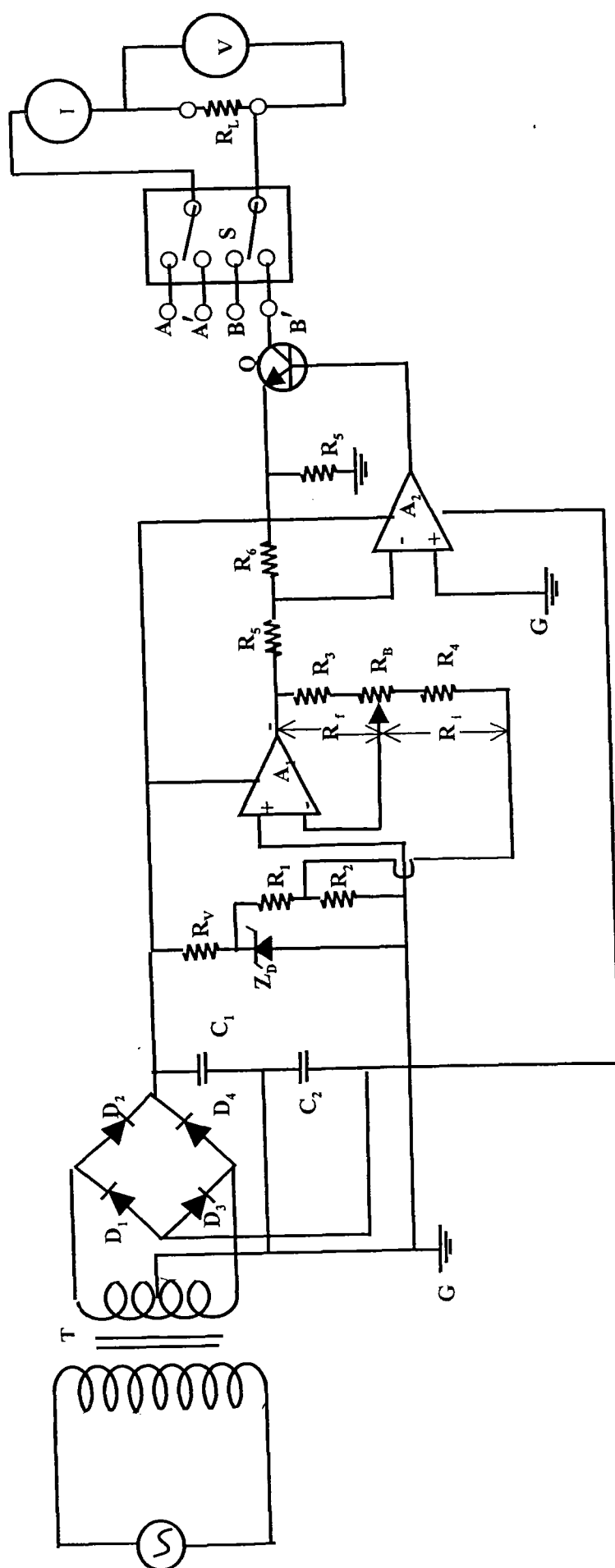
R_V คือ ความต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 100 กิโลโอห์ม

Q₁ คือ ทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN ซิลิกอน หมายเลข 2N 3439

Q₂ คือ ทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN ซิลิกอน หมายเลข D 401 A

หลักการการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ ประกอบด้วยวงจรหลักคือ วงจรเรกติไฟด์เออร์แบบบริดจ์ โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับแปลงระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 โวลต์ เป็น 100 โวลต์ ใช้ไดโอดเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของกระแสให้เป็นกระแสตรงโดยการต่อแบบบริดจ์ วงจรกรองจะใช้ชนิดตัวเก็บประจุเพื่อกรองกระแสและความต่างศักย์ให้มีความเรียบมากยิ่งขึ้น วงจรเรกกูเลเตอร์ชนิดซีเนอร์ไดโอด เป็นวงจรควบคุมความต่างศักย์คงที่ 120 โวลต์ ความต่างศักย์นี้ต่อคร่อมบนความต้านทานปรับค่าได้ ความต้านทานนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งศักย์ไฟฟ้า เพื่อเป็นการปรับระดับความต่างศักย์สำหรับการใช้งาน ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกของตัวแบ่งศักย์ไฟฟ้านี้จะต่อเข้ากับทรานซิสเตอร์สองตัวที่ทำหน้าที่เป็นตัวผ่านกระแส

2. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ 0 -100 มิลลิแอมแปร์ ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 36 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความดันกระแสคงที่ 0-100 มิลลิแอมป์

จากภาพประกอบที่ 36 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังต่อไปนี้คือ

T เป็นหม้อแปลงแบบมีตำแหน่งกลาง ทางเข้า 220 โวลต์ทางออก 12 โวลต์

D₁, D₂, D₃, D₄ คือ ไดโอดชนิดซิลิกอน หมายเลข 1N4006

C₁, C₂ คือตัวเก็บประจุ ขนาด 200 ไมโครฟารัด 50 โวลต์

Z₀ คือ ซีเนอร์ไดโอด ขนาด 1/2 วัตต์ 12 โวลต์

R_V, R₂, R₄, R₅ คือความต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม 1/2 วัตต์

R₁ คือความต้านทานขนาด 5 กิโลโอห์ม 1/2 วัตต์

R₃ คือความต้านทานขนาด 100 โอห์ม 1/2 วัตต์

R_B คือความต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 10 กิโลโอห์ม

R₆ คือความต้านทานขนาด 1.2 กิโลโอห์ม 1/2 วัตต์

R₇ คือความต้านทานขนาด 125 โอห์ม 1/2 วัตต์

A₁, A₂ คือ ออปแอมป์ หมายเลข HAI 7741

Q คือทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN ซิลิกอน หมายเลข D 401 A

V คือ โวลต์มิเตอร์ ขนาด 0 -150 โวลต์

I คือ แอมมิเตอร์ ขนาด 0 -100 มิลลิแอมป์

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสทางออกคงที่ 0 -100 มิลลิแอมป์จะประกอบด้วยวงจรหลัก 3 ส่วนคือ

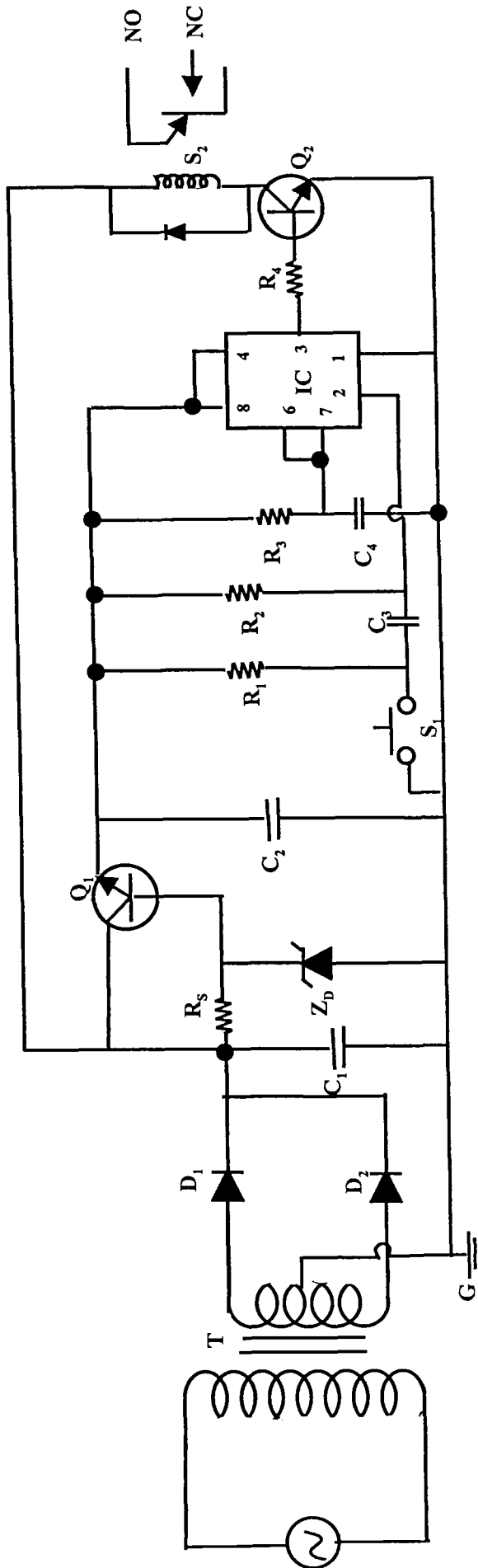
วงจรเรกติไฟด์เออร์สองขั้ว เป็นวงจรที่ประกอบด้วยหม้อแปลงที่มีตำแหน่งกลาง แปลงไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์ 220 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์ 12 โวลต์ มีไดโอด 4 ตัวทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าให้เป็นกระแสตรง และมีตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองกระแสและความต่างศักย์ให้มีความเรียบยิ่งขึ้น วงจรเรกติไฟด์เออร์สองขั้วจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับออปแอมป์

วงจรเรกูเลเตอร์ออปแอมป์ (A₁) เป็นวงจรที่ควบคุมความต่างศักย์ทางออกให้คงที่ โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นตัวสร้างระดับความต่างศักย์คงที่ แล้วป้อนให้กับทางเข้าชนิดกลับทางของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับทาง(inverting) ซึ่งออปแอมป์จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้ค่าความต่างศักย์ค่าลบให้มีขนาดเพิ่มมากขึ้น อัตราขยายของวงจรนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยการปรับอัตราส่วนของ R₁ และ R_f จากความต้านทานปรับค่าได้ R_B เพื่อให้ได้ระดับความต่างศักย์ทางออกของ A₁ ตามที่ต้องการ ระดับของศักย์ไฟฟ้านี้เป็นระดับศักย์ไฟฟ้าคงที่ ซึ่งกำหนดปริมาณกระแสที่ผ่านวงจรควบคุมกระแสคงที่

วงจรควบคุมกระแสคงที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A₂ ตัวต้านทาน R₃, R₄, R₅ และ ทรานซิสเตอร์ Q เป็นวงจรที่กำหนดปริมาณกระแสคงที่ด้วยระดับศักย์ไฟฟ้าลบ โดยศักย์ไฟฟ้าลบนี้ก็คือศักย์ไฟฟ้าจากทางออกของ A₁

สุดท้ายที่ทางออกของวงจร คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะต่อเข้ากับสวิตช์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเลือกวงจรใช้งาน ระหว่างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0 -100 โวลต์กับ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ 0 -100 มิลลิแอมป์ เมื่อเลื่อนสวิตช์ไปที่ A' และ B' แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากวงจรเรกติไฟเออร์ ดังภาพประกอบที่ 35 จะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดอุปกรณ์ทดลองซึ่งอนุกรมกับวงจรคุมกระแสคงที่ และเมื่อเลื่อนสวิตช์ไปที่ A และ B ชุดอุปกรณ์ทดลองจะถูกต่อเข้ากับทางออกของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ โดยชุดอุปกรณ์ทดลองประกอบด้วย R_L ซึ่งแทนความต้านทานของน้ำดีนอนุกรมกับแอมมิเตอร์ I และ ขนานกับโวลต์มิเตอร์ V เพื่อสามารถวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ขณะใช้งาน

4.1.3 วงจรตั้งเวลาสำหรับเปิดและปิดสวิตช์ (ON - OFF) วงจรจะทำหน้าที่ในการควบคุมเวลาในการทำการทดลองให้แต่ละครั้งใช้เวลาเท่ากัน วงจรภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 วงจรตั้งเวลา ปิดเปิดสวิตช์สำหรับตั้งเวลาการทดลอง

จากภาพประกอบ 37 วงจรตั้งเวลาเปิดปิดสวิตช์ ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังต่อไปนี้คือ

T คือหม้อแปลงแบบมีตำแหน่งกลาง ทางเข้า 220 โวลต์ทางออก 12 โวลต์

D₁, D₂ คือ ไดโอดชนิดซิลิกอน หมายเลข 1N4007

C₁ คือตัวเก็บประจุ ขนาด 100 ไมโครฟารัด 50 โวลต์

Z₀ คือ ซีเนอร์ไดโอด ขนาด 1/2 วัตต์ 12 โวลต์

R_s คือความต้านทานขนาด 220 โอห์ม

Q₁ คือทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN ซิลิกอน หมายเลข TIP 31

S₁ คือสวิตช์

R₁ , R₂ คือความต้านทานขนาด 2 กิโลโอห์ม 1/2 วัตต์

R₃ คือความต้านทานขนาด 1 เมกะโอห์ม 1/2 วัตต์

C₂ คือตัวเก็บประจุขนาด 220 ไมโครฟารัด 100 โวลต์

C₃ คือตัวเก็บประจุขนาด 0.1 ไมโครฟารัด 30 โวลต์

C₄ คือตัวเก็บประจุขนาด 33 ไมโครฟารัด 50 โวลต์

IC คือตัว IC timer หมายเลข 555

R₄ คือความต้านทานขนาด 50 กิโลโอห์ม 1/2 วัตต์

Q₂ คือทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN ซิลิกอน หมายเลข TIP 31

S₂ คือสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้า (Relay)

วงจรในภาพประกอบที่ 37 คือวงจรตั้งเวลาเปิดปิดสวิตช์ ซึ่งประกอบด้วยวงจร Monostable multivibrator ที่สร้างขึ้นจาก IC 555 นำมาประยุกต์เป็นวงจรตั้งเวลาเปิดปิดสวิตช์ วงจรนี้จะสามารถกำหนดช่วงเวลาการเปิดสวิตช์ (ON) ด้วยขนาดของ R₃ และ C₄ ของวงจร ซึ่งช่วงเวลามีค่าเท่ากับ $1.1 R_3 C_4$ ($T=1.1 RC$) และที่ขา 3 ของ IC 555 จะต่อเข้ากับทรานซิสเตอร์ที่ขับเคลื่อนสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเป็นตัวตัดต่อไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ วงจรนี้จะใช้ในการตั้งช่วงเวลาเปิดสวิตช์ในระหว่างทำการทดลองเพื่อให้ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองเท่ากันทุกครั้ง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจร ใช้วงจรเรกติไฟเออร์ชนิดเต็มรูปคลื่น ร่วมกับเรกูลเตอร์ชนิดซีเนอร์ไดโอด โดยวงจรเรกติไฟเออร์ประกอบด้วยหม้อแปลงที่มีตำแหน่งกลาง สำหรับแปลงระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ โดยมีไดโอด 2 ตัวทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วใช้ตัวเก็บประจุต่อรวมเป็นวงจรที่ใช้สำหรับกรองกระแสและความต่างศักย์ให้มีความเรียบมากยิ่งขึ้น เรกูลเตอร์ซีเนอร์ไดโอดประกอบด้วยซีเนอร์ไดโอดซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมความ

ต่างศักย์ไฟฟ้าทางออกให้มีค่าคงที่ ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายกระแสที่ผ่านไปยังภาระหรือเป็นตัวผ่านกระแสไฟฟ้า และตัวเก็บประจุที่ขนานกับภาระเป็นตัวกรองให้ศักย์ไฟฟ้าทางออกมีความราบเรียบยิ่งขึ้น

4. การทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0 -100 โวลต์และควบคุมกระแสคงที่ 0 -100 มิลลิแอมป์ที่สร้างขึ้น ได้รับการทดสอบเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปทดสอบด้วยการขึ้นรูปกับน้ำดินขาวตามแผนการทดลอง เพื่อเป็นการทดสอบในเบื้องต้นว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ โดยการนำตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม 0.5 วัตต์ จำนวน 20 ตัว มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ความต้านทานรวม 1 กิโลโอห์ม 10 วัตต์ ต่อตัวต้านทานนี้เข้ากับทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นภาระของวงจร ต่อมาตั้งสวิตช์เลือกใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ 0-100 มิลลิแอมป์ ปรับระดับกระแสไฟฟ้าให้ถึงขีดสูงสุดที่ต้องการใช้งานคือ 100 มิลลิแอมป์ โดยอ่านจากแอมมิเตอร์ เปิดทิ้งไว้ เป็นเวลา 20 นาที ต่อมาตั้งสวิตช์เลือกใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0 -100 โวลต์ ปรับระดับความต่างศักย์ให้ถึงขีดสูงสุดที่ต้องการใช้งานคือ 100 โวลต์ โดยอ่านจากโวลต์มิเตอร์เปิดทิ้งไว้ เป็นเวลา 20 นาที เมื่อวงจรไม่มีความเสียหายทั้งสองวงจรแล้วจึงทำการทดสอบต่อไปตามหัวข้อในบทที่ 3 เกี่ยวกับการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้น โดยได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ ทดสอบโดยการจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานที่ทราบค่าแต่ละค่า ซึ่งตัวต้านทานดังกล่าวทำหน้าที่เป็นภาระของวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังตาราง 3

ตาราง 3 ผลการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสคงที่ 0-100 มิลลิแอมป์ที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ

กระแส คงที่ (mA)	ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)					%การเปลี่ยนแปลง กระแสไฟฟ้า ตามค่าภาระในช่วง 200-1000โอห์ม
	200โอห์ม	400โอห์ม	600โอห์ม	800 โอห์ม	1000โอห์ม	
	กระแส (mA)	กระแส (mA)	กระแส (mA)	กระแส (mA)	กระแส (mA)	
25	25.0	25.0	24.9	24.9	24.9	0.40%
50	50.0	50.0	49.9	49.9	49.8	0.40%
75	75.0	74.9	74.8	74.7	74.6	0.53%
100	100.0	99.9	99.7	99.6	99.5	0.50%

จากตาราง 3 เมื่อจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับตัวต้านทาน ซึ่งทำหน้าที่เป็นภาระที่มีการเปลี่ยนแปลง จากค่าต่ำสุดคือ 200 โอห์มถึงค่าสูงสุดคือ 1000 โอห์ม พบว่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.4-0.5 จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ได้เป็นอย่างดีในช่วง 0-100 มิลลิแอมป์ ในสภาวะที่ภาระมีการเปลี่ยนแปลง

การทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0-100 โวลต์ เมื่อให้ความต่างศักย์คงที่คร่อมบนตัวต้านทานที่ทราบค่า ได้ผลการทดลองดังตาราง 4

ตาราง 4 ผลการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0-100 มิลลิแอมแปร์ที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ

ความต่าง ศักย์คงที่ (V)	ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)					%การเปลี่ยนแปลง ความต่างศักย์ไฟฟ้า ตามค่าภาระในช่วง 1000-4000โอห์ม
	1000โอห์ม	1500โอห์ม	2000โอห์ม	3000 โอห์ม	4000โอห์ม	
	ความ ต่างศักย์ (V)	ความ ต่างศักย์ (V)	ความ ต่างศักย์ (V)	ความ ต่างศักย์ (V)	ความ ต่างศักย์ (V)	
25	25.0	25.3	25.32	25.45	25.51	2.04%
50	50.0	50.5	50.8	51.0	51.2	2.40%
75	75.0	76.0	76.4	76.7	76.9	2.50%
100	100.0	101.3	101.7	102.2	102.5	2.50%

จากตาราง 4 เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์คงที่ให้กับตัวต้านทาน ซึ่งทำหน้าที่เป็นภาระที่มีการเปลี่ยนแปลง จากค่าต่ำสุดคือ 1000 โอห์มถึงค่าสูงสุดคือ 4000 โอห์ม พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2.04-2.50 จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ว่าวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ได้เป็นอย่างดีในสภาวะการเปลี่ยนแปลงของภาระ

2 ผลการทดสอบหาขอบเขตการใช้งานของอุปกรณ์

2.1 ขั้วไฟฟ้า

จากการออกแบบสร้างชุดทดลองในบทที่ 3 หัวข้อที่ 2 ได้ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว คือขั้วลบ และขั้วบวก ลักษณะของขั้วบวกที่ใช้ในการทำการทดลองมีลักษณะดังภาพประกอบที่ 38 และขั้วลบของวงจรมีลักษณะดังภาพประกอบที่ 39



ภาพประกอบ 38 ส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าวก ของวงจร



ภาพประกอบ 39 ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่เป็นขั้วลบของวงจร

2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์

การทดสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ ที่เป็นส่วนผสมกันระหว่างแกรไฟต์กับปูนพลาสเตอร์ในอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 1:2 และ 1:3 เพื่อทราบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ ตามบทที่ 3 หัวข้อที่ 1 ผลการทดลองให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของแกรไฟต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เป็นดังตาราง 5

ผลตาราง 5 เป็นผลการวัดค่าความต้านทานของแกรไฟต์ที่หล่อเป็นแท่งรูปทรงกระบอกโดยมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทุกชิ้นคือ 2.35×10^{-4} ตารางเมตร มีความยาวของแท่งแกรไฟต์เท่ากันคือ 6×10^{-2} เมตร โดยนำพื้นที่หน้าตัด ความยาวและความต้านทานที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าตามที่กล่าวในบทที่ 3 หัวข้อที่ 1.2 จากตารางแสดงให้เห็นว่าสภาพนำไฟฟ้าของแกรไฟต์มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยพบว่าอัตราส่วน แกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 มีค่าสภาพนำไฟฟ้ามากที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วน 1:2 ส่วนแกรไฟต์อัตราส่วน 1:3 มีค่าสภาพนำไฟฟ้าน้อยที่สุด

จากค่าสภาพนำไฟฟ้าเฉลี่ยนี้เมื่อนำมาคำนวณเป็นความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.08×10^{-2} เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 2.026×10^{-3} ตารางเมตร และมีความหนา 1×10^{-2} เมตร ซึ่งเป็นขนาดของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง จะได้ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าอัตราส่วน แกรไฟต์ต่อปูน 1:1 เท่ากับ 7.13×10^1 โอห์มอัตราส่วน 1:2 เท่ากับ 2.90×10^2 โอห์ม และอัตราส่วน 1:3 เท่ากับ 2.15×10^6 โอห์ม ซึ่งเป็นความต้านทานของขั้วไฟฟ้าขณะแห้ง

2.3 การหาค่าความหนาแน่นของน้ำดินขาว

จากบทที่ 3 หัวข้อที่ 2 เป็นการทดสอบหาขอบเขตการใช้งานของอุปกรณ์ โดยในหัวข้อย่อย 2.1 เป็นการเตรียมน้ำดินขาว เพื่อหาค่าความหนาแน่นของน้ำดินขาว ที่อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยทำการหาค่าความหนาแน่นตามที่กล่าวไว้แล้ว ได้ผลการทดลองดังตาราง 6

ตาราง 6 ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของน้ำดินขาวที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ครั้งที่	ปริมาตรน้ำดินขาว (cm ³)			มวลน้ำดินขาว (g)			ความหนาแน่นน้ำดินขาว (g/cm ³)		
	อัตราส่วนดินขาว : น้ำ			อัตราส่วนดินขาว : น้ำ			อัตราส่วนดินขาว : น้ำ		
	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
1	60	60	60	84.14	69.86	67.05	1.40	1.16	1.12
2	60	60	60	83.19	71.49	68.35	1.39	1.19	1.14
3	60	60	60	79.29	74.09	65.96	1.32	1.24	1.10
4	60	60	60	85.89	75.00	65.59	1.43	1.25	1.10
5	60	60	60	84.69	71.91	63.43	1.41	1.20	1.05
6	60	60	60	82.92	70.37	60.57	1.38	1.73	1.01
7	60	60	60	81.43	73.10	69.2	1.36	1.22	1.15
8	60	60	60	86.11	72.84	64.55	1.44	1.21	1.08
9	60	60	60	85.22	68.96	60.24	1.42	1.15	1.00
10	60	60	60	87.07	71.68	63.74	1.45	1.19	1.06
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น							1.40	1.20	1.10
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์							2.85%	2.50%	4.54%

ตาราง 6 แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของน้ำดินอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 มีค่าความหนาแน่นมากกว่าอัตราส่วน 1:2 และอัตราส่วน 1:3 ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงปริมาณของเนื้อดินขาวในแต่ละอัตราส่วน

2.4 ผลการทดสอบหาค่ากระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

จากการทดสอบหาขอบเขตการใช้งานของอุปกรณ์ในบทที่ 3 หัวข้อย่อยที่ 2.4 นั้น ได้ทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะต่าง ๆ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ต่อปูนพลาสติกทั้งสามอัตราส่วน และน้ำดินขาวที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำดินขาวทั้งสามอัตราส่วนเช่นกัน ผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 7 ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้ได้แสดงถึงสมบัติทาง

รวมของระบบที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขนาดของภาชนะ ความเข้มข้นของน้ำดิน และขั้วไฟฟ้าที่ใช้

ตาราง 7 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน

		อัตราส่วนแกรไฟต์ : ปูนพลาสเตอร์ (g : g)					
อัตราส่วน ดินขาว : น้ำ	ระยะห่าง ระหว่างขั้วไฟฟ้า	1:1		1:2		1:3	
		ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า
(g:cm ³)	(cm)	(V)	(mA)	(V)	(mA)	(V)	(mA)
1:1	5	1.00×10^2	0.90×10^2	1.00×10^2	0.90×10^2	1.00×10^2	0.84×10^2
	7	1.00×10^2	0.82×10^2	1.00×10^2	0.80×10^2	1.00×10^2	0.76×10^2
	9	1.00×10^2	0.74×10^2	1.00×10^2	0.78×10^2	1.00×10^2	0.72×10^2
	11	1.00×10^2	0.70×10^2	1.00×10^2	0.74×10^2	1.00×10^2	0.66×10^2
	13	1.00×10^2	0.64×10^2	1.00×10^2	0.66×10^2	1.00×10^2	0.64×10^2
	15	1.00×10^2	0.60×10^2	1.00×10^2	0.60×10^2	1.00×10^2	0.60×10^2
1:2	5	1.00×10^2	0.74×10^2	1.00×10^2	0.74×10^2	1.00×10^2	0.72×10^2
	7	1.00×10^2	0.64×10^2	1.00×10^2	0.66×10^2	1.00×10^2	0.64×10^2
	9	1.00×10^2	0.56×10^2	1.00×10^2	0.60×10^2	1.00×10^2	0.60×10^2
	11	1.00×10^2	0.52×10^2	1.00×10^2	0.56×10^2	1.00×10^2	0.58×10^2
	13	1.00×10^2	0.48×10^2	1.00×10^2	0.52×10^2	1.00×10^2	0.52×10^2
	15	1.00×10^2	0.46×10^2	1.00×10^2	0.48×10^2	1.00×10^2	0.50×10^2

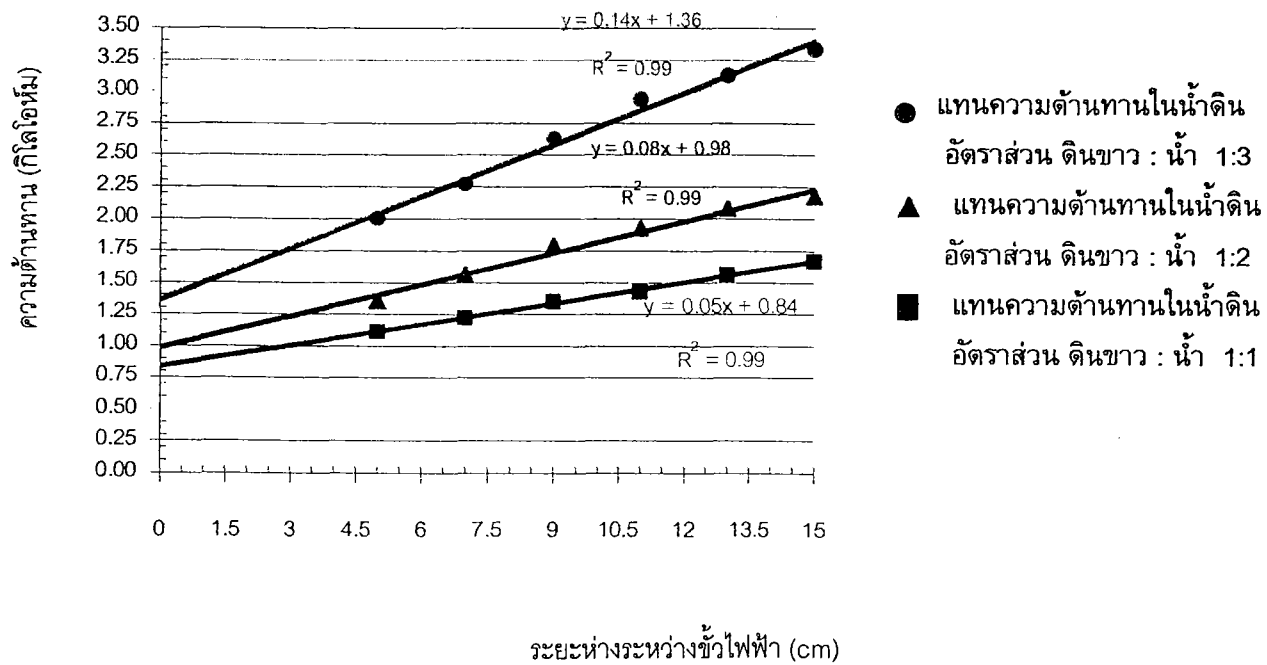
ตาราง 7 (ต่อ)

		อัตราส่วนแกรไฟต์ : ปูนพลาสเตอร์ (g : g)					
		1:1		1:2		1:3	
อัตราส่วน ดินขาว : น้ำ	ระยะห่าง ระหว่างขั้วไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า
(g:cm ³)	(cm)	(V)	(mA)	(V)	(mA)	(V)	(mA)
1:3	5	1.00×10^2	0.50×10^2	1.00×10^2	0.44×10^2	1.00×10^2	0.48×10^2
	7	1.00×10^2	0.44×10^2	1.00×10^2	0.40×10^2	1.00×10^2	0.44×10^2
	9	1.00×10^2	0.38×10^2	1.00×10^2	0.36×10^2	1.00×10^2	0.42×10^2
	11	1.00×10^2	0.34×10^2	1.00×10^2	0.34×10^2	1.00×10^2	0.40×10^2
	13	1.00×10^2	0.32×10^2	1.00×10^2	0.32×10^2	1.00×10^2	0.38×10^2
	15	1.00×10^2	0.30×10^2	1.00×10^2	0.30×10^2	1.00×10^2	0.36×10^2

จากตาราง 7 ได้นำข้อมูลมาทำการคำนวณ หาค่าความต้านทานไฟฟ้า ได้ตั้งตารางที่ 8 9 และ 10 ซึ่งผลการคำนวณสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ทั้งสามอัตราส่วน ในน้ำดินแต่ละอัตราส่วน ได้ผลดังภาพประกอบ 40 41 และภาพประกอบ 42

ตาราง 8 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 รวมกับน้ำดินขาว ในอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน

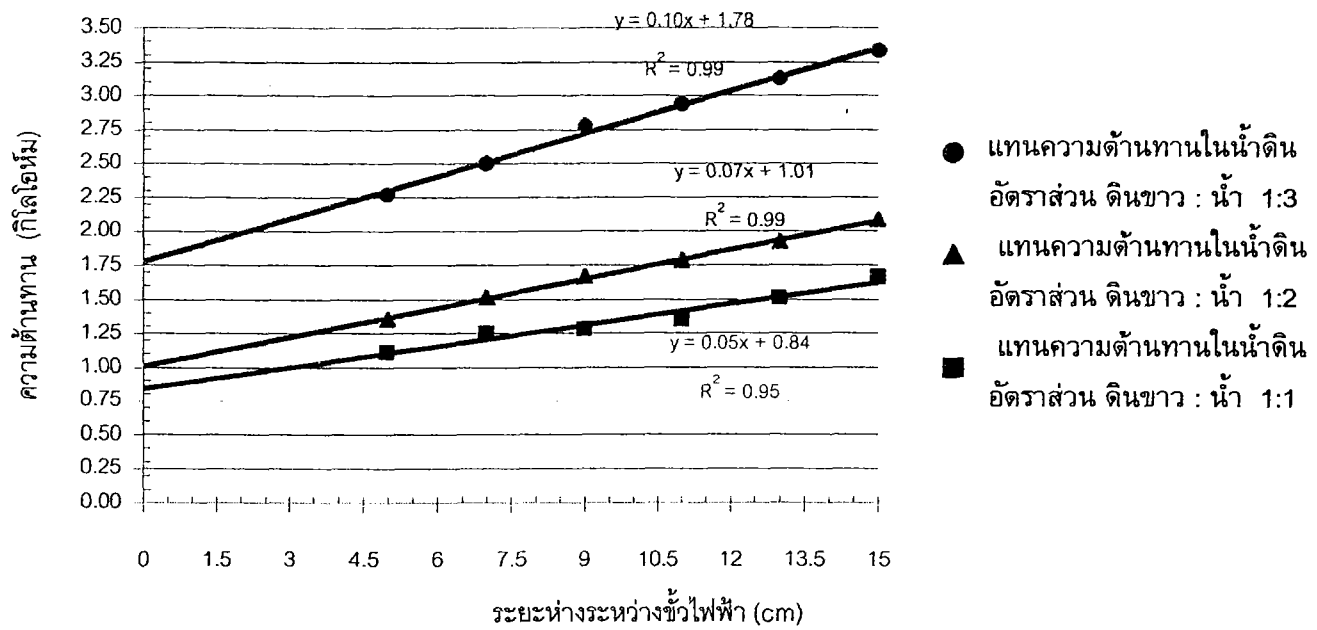
อัตราส่วน ดินขาว : น้ำ	ระยะห่าง ระหว่างขั้ว ไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแส ไฟฟ้า	ความต้าน ทานไฟฟ้า
(g : cm ³)	(cm)	(V)	(mA)	(k Ω)
1:1	5	1.00×10^2	0.90×10^2	1.11
	7	1.00×10^2	0.82×10^2	1.22
	9	1.00×10^2	0.74×10^2	1.35
	11	1.00×10^2	0.70×10^2	1.43
	13	1.00×10^2	0.64×10^2	1.56
	15	1.00×10^2	0.60×10^2	1.67
1:2	5	1.00×10^2	0.74×10^2	1.35
	7	1.00×10^2	0.64×10^2	1.56
	9	1.00×10^2	0.56×10^2	1.79
	11	1.00×10^2	0.52×10^2	1.92
	13	1.00×10^2	0.48×10^2	2.08
	15	1.00×10^2	0.46×10^2	2.17
1:3	5	1.00×10^2	0.50×10^2	2.00
	7	1.00×10^2	0.44×10^2	2.27
	9	1.00×10^2	0.38×10^2	2.63
	11	1.00×10^2	0.34×10^2	2.94
	13	1.00×10^2	0.32×10^2	3.13
	15	1.00×10^2	0.30×10^2	3.33



ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 ในน้ำดินขาว อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3

ตาราง 9 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:2 รวมกับน้ำดินขาว ในอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน

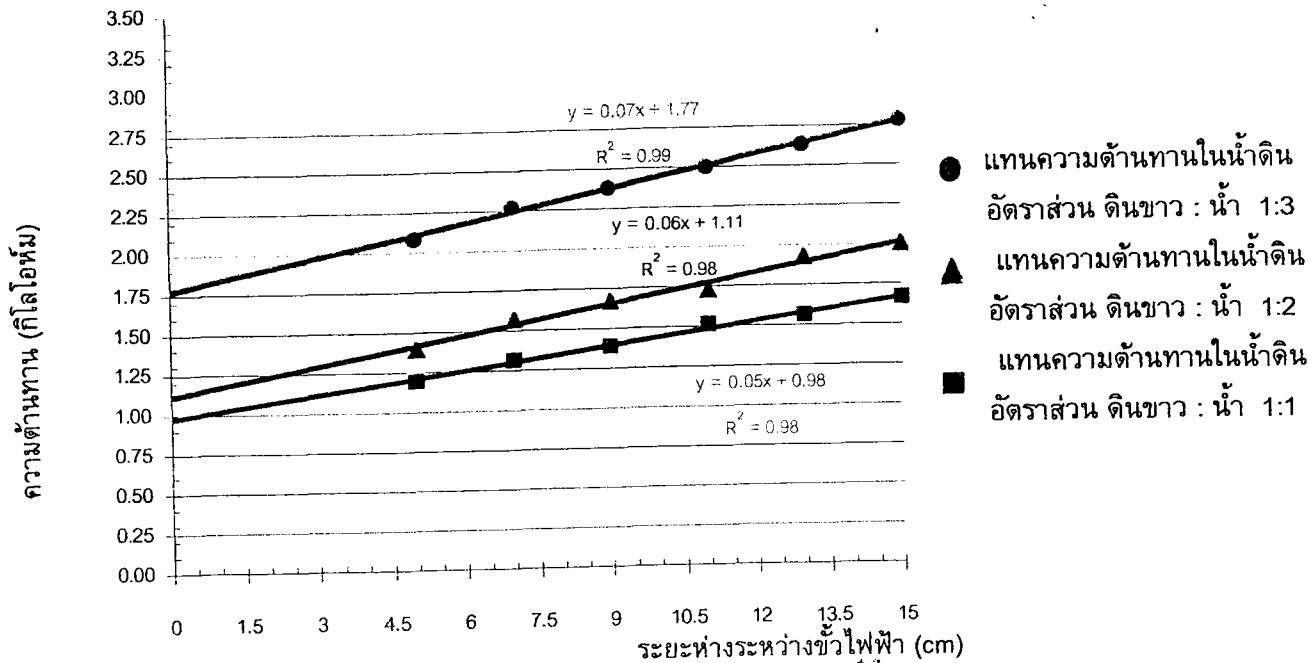
อัตราส่วน ดินขาว : น้ำ	ระยะห่าง ระหว่างขั้ว ไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแส ไฟฟ้า	ความต้าน ทานไฟฟ้า
(g : cm ³)	(cm)	(V)	(mA)	(k Ω)
1:1	5	1.00×10^2	0.90×10^2	1.11
	7	1.00×10^2	0.80×10^2	1.25
	9	1.00×10^2	0.78×10^2	1.28
	11	1.00×10^2	0.74×10^2	1.35
	13	1.00×10^2	0.66×10^2	1.52
	15	1.00×10^2	0.60×10^2	1.67
1:2	5	1.00×10^2	0.74×10^2	1.35
	7	1.00×10^2	0.66×10^2	1.52
	9	1.00×10^2	0.60×10^2	1.67
	11	1.00×10^2	0.56×10^2	1.79
	13	1.00×10^2	0.52×10^2	1.92
	15	1.00×10^2	0.48×10^2	2.08
1:3	5	1.00×10^2	0.44×10^2	2.27
	7	1.00×10^2	0.40×10^2	2.50
	9	1.00×10^2	0.36×10^2	2.78
	11	1.00×10^2	0.34×10^2	2.94
	13	1.00×10^2	0.32×10^2	3.13
	15	1.00×10^2	0.30×10^2	3.33



ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:2 ในน้ำดินขาว อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3

ตาราง 10 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูน
 พลาสเตอร์ 1:3 รวมกับน้ำดินขาว ในอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยใช้ระยะ
 ห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน

อัตราส่วน ดินขาว : น้ำ	ระยะห่าง ระหว่างขั้ว ไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	กระแส ไฟฟ้า	ความต้าน ทานไฟฟ้า
(g : cm ³)	(cm)	(V)	(mA)	(k Ω)
1:1	.5	1.00×10^2	0.84×10^2	1.19
	7	1.00×10^2	0.76×10^2	1.32
	9	1.00×10^2	0.72×10^2	1.39
	11	1.00×10^2	0.66×10^2	1.52
	13	1.00×10^2	0.64×10^2	1.56
	15	1.00×10^2	0.60×10^2	1.67
1:2	5	1.00×10^2	0.72×10^2	1.39
	7	1.00×10^2	0.64×10^2	1.56
	9	1.00×10^2	0.60×10^2	1.67
	11	1.00×10^2	0.58×10^2	1.72
	13	1.00×10^2	0.52×10^2	1.92
	15	1.00×10^2	0.50×10^2	2.00
1:3	5	1.00×10^2	0.48×10^2	2.08
	7	1.00×10^2	0.44×10^2	2.27
	9	1.00×10^2	0.42×10^2	2.38
	11	1.00×10^2	0.40×10^2	2.50
	13	1.00×10^2	0.38×10^2	2.63
	15	1.00×10^2	0.36×10^2	2.78



ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:3 ในน้ำดินขาว อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 1:2 และ 1:3

จากภาพประกอบ 40 41 และ 42 แสดงให้เห็นว่าในน้ำดินขาวอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าในน้ำดินขาวอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 โดยที่ความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์รวมกับน้ำดินขาวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ดังนั้นการนำกระแสสูงสุดของระบบนี้จะเกิดขึ้นกับอัตราส่วนน้ำดิน 1:1 ที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าไกลที่สุดคือ 5 เซนติเมตร โดยมีกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 84 ถึง 90 mA และนำไฟฟ้าได้น้อยที่สุดที่อัตราส่วนน้ำดิน 1:3 ที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าไกลที่สุด 15 เซนติเมตร โดยมีกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 30 ถึง 36 mA ดังแสดงในตาราง 7

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ถ้าลากเส้นกราฟต่อจุดไปจนตัดแกนของกราฟ ค่าความต้านทานที่ได้ ณ ตำแหน่งจุดตัดของกราฟคือตำแหน่งที่ขั้วไฟฟ้าอยู่ติดกัน หรือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นศูนย์ ค่าความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าจะเป็นความต้านทานของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่สัมผัสกับน้ำในน้ำดินไว้ รวมถึงความต้านทานระหว่างขั้วทองแดงกับแกรไฟต์ ซึ่งอาจประมาณว่าไม่มีดินอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าจากการพิจารณาจุดตัดแกนซึ่งเห็นได้จากสมการเชิงเส้นที่กำกับเส้นกราฟ พบว่าอัตราส่วนผสม

ของน้ำดินส่งผลต่อความต้านทานของขั้วแกรไฟต์ที่แช่อยู่ในน้ำดินนั้น โดยน้ำดินที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าต่ำลง ดังนี้

ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนปลาสเตอร์ 1:1 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0.83 k Ω ไปเป็น 0.98 k Ω และ 1.36 k Ω เมื่อน้ำดินเปลี่ยนแปลงจากอัตราส่วนผสม 1:1 ไปเป็น 1:2 และเป็น 1:3 ตามลำดับ

ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนปลาสเตอร์ 1:2 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0.84 k Ω ไปเป็น 1.01 k Ω และ 1.78 k Ω เมื่อน้ำดินเปลี่ยนแปลงจากอัตราส่วนผสม 1:1 ไปเป็น 1:2 และเป็น 1:3 ตามลำดับ

ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนปลาสเตอร์ 1:3 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0.98 k Ω ไปเป็น 1.10 k Ω และ 1.77 k Ω เมื่อน้ำดินเปลี่ยนแปลงจากอัตราส่วนผสม 1:1 ไปเป็น 1:2 และเป็น 1:3 ตามลำดับ

นอกจากนั้นความต้านทานของขั้วไฟฟ้ายังเปลี่ยนแปลงตามส่วนผสมของขั้วไฟฟ้า โดยความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของปูนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนความต้านทานตามส่วนผสมนี้จะไม่เด่นชัดเท่ากับการเปลี่ยนแปลงจากความเข้มข้นของน้ำดิน คือมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0.83 k Ω ถึง 0.98 k Ω ที่อัตราส่วนน้ำดิน 1:1 จาก 0.98 k Ω ถึง 1.11 k Ω ที่อัตราส่วนน้ำดิน 1:2 และ 1.36 k Ω ถึง 1.78 k Ω ที่อัตราส่วนน้ำดิน 1:3

2.5 ผลการทดสอบอุปกรณ์ โดยทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มมวลบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ กับกระแสไฟฟ้าคงที่ในช่วง 10 – 100 มิลลิแอมแปร์

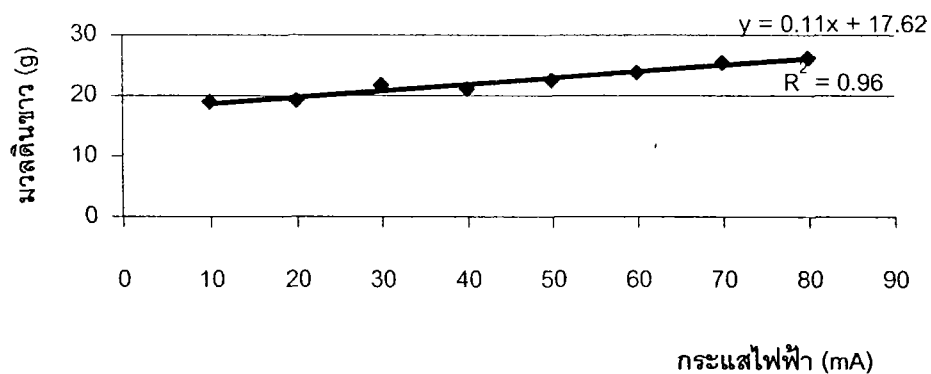
จากบทที่ 3 หัวข้อที่ 2.3 เป็นการทดสอบการจ่ายกระแสคงที่ ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้น โดยใช้ทำการทดลองหาค่ามวลที่เพิ่มขึ้นบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์กับกระแสไฟฟ้าคงที่ในช่วง 10 -100 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งจะใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ผสมปูนปลาสเตอร์ทั้งสามอัตราส่วนในน้ำดินอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 11

ตาราง 11 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ทั้งสามอัตราส่วนกับกระแสไฟฟ้า

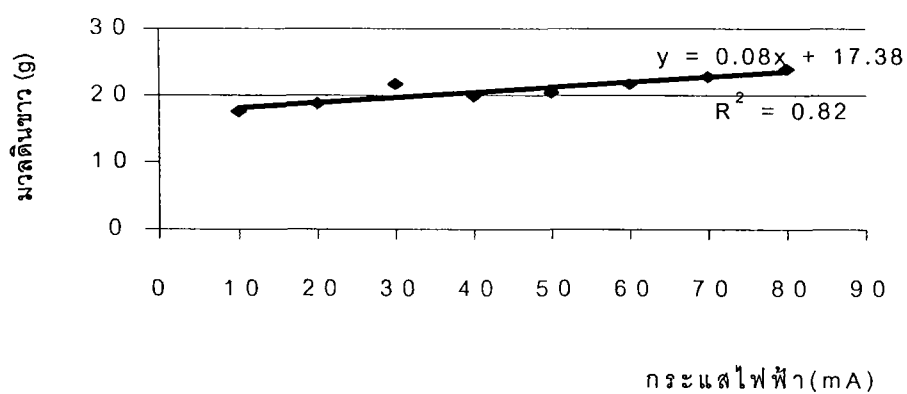
กระแสไฟฟ้า (mA)	มวลของดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้า (g)					
	1:1		1:2		1:3	
	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า	มวล ดินขาว	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า	มวล ดินขาว	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า	มวล ดินขาว
	(V)	(g)	(V)	(g)	(V)	(g)
10	15	19.0	15	17.6	15	13.7
20	30	19.3	25	18.8	30	13.7
30	40	21.7	35	21.7	40	16.9
40	50	21.1	45	19.9	60	16.7
50	65	22.6	55	20.4	75	17.4
60	80	23.8	70	21.7	85	18.9
70	85	25.4	80	22.8	90	19.7
80	95	26.2	95	23.9	100	21.1
90*	-	-	-	-	-	-
100*	-	-	-	-	-	-

* ไม่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากค่าความต่างศักย์เกิน 100 โวลต์ ซึ่งเกินขีดจำกัดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้น

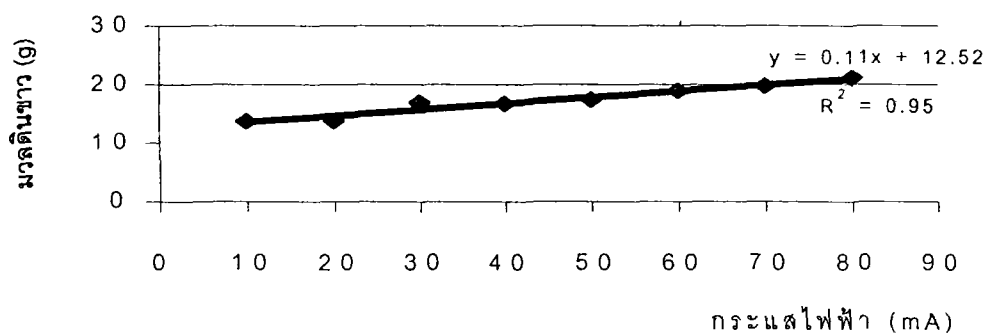
จากตาราง 11 เมื่อนำข้อมูลมาแสดงโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและน้ำหนักที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์แต่ละอัตราส่วน จะได้กราฟตามภาพประกอบที่ 43 44 และ 45



ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และมวลดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน แกรไฟต์ต่อปูนพลาสติก 1:1

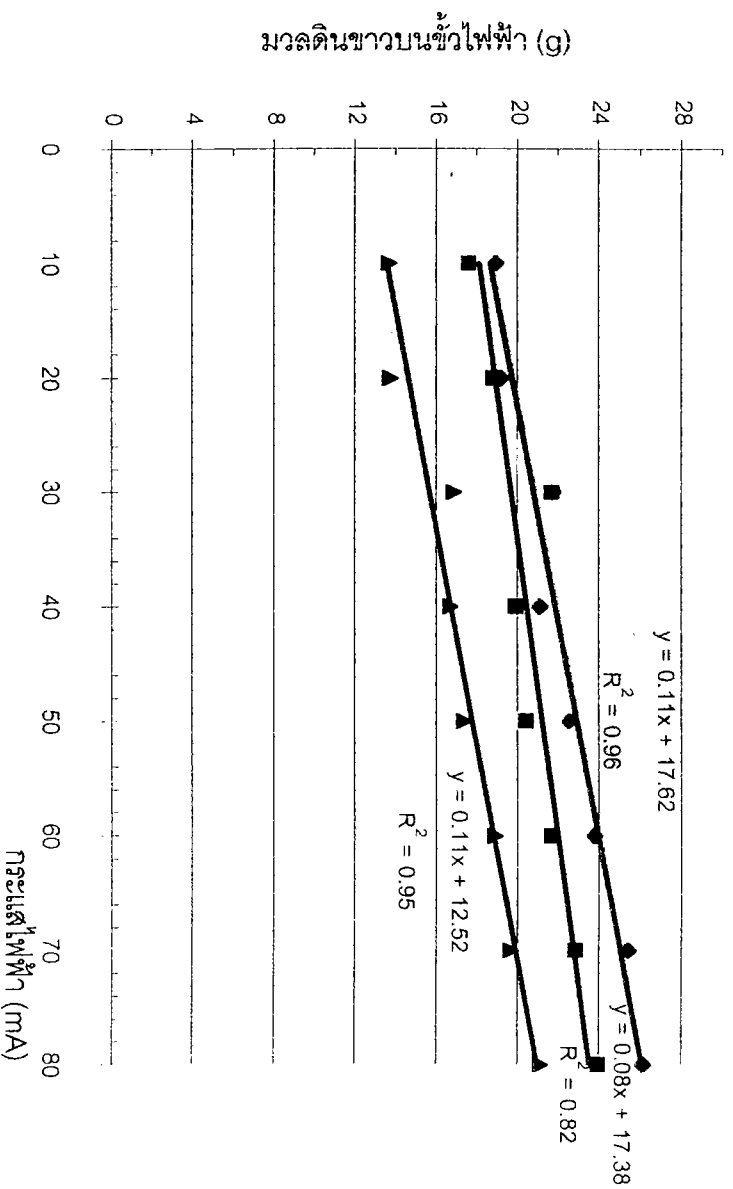


ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และมวลดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสติก 1:2



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และมวลดินขาวที่เกาะติดบน ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:3

จากตาราง 11 และภาพประกอบ 43 44 45 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มมวลของดินขาวบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์จะเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ และที่กระแสไฟฟ้าเท่ากัน แต่ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์แตกต่างกันจะมีค่ามวลดินขาวที่เกาะบนขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยที่ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 มวลดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบมวลของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ทั้งสามอัตราส่วนได้ดังภาพประกอบ 46



- ◆ แทนมวลลติษวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1
- แทนมวลลติษวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:2
- ▲ แทนมวลลติษวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:3

ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และมวลลติษวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนต่าง ๆ ในน้ำดินขาวอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1

2.6 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์คงที่ โดยการทดลองหาความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยความต่างศักย์ในช่วง 10 -100 โวลต์ จากการออกแบบการทดลองในบทที่ 3 หัวข้อ 2.4 เป็นการทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้า ด้วยความต่างศักย์คงที่ดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วนั้น ได้ใช้พาราฟินเพื่อเคลือบบนก้อนดินเพื่อหาความหนาแน่นของก้อนดิน ในการนี้ได้มีการหาความหนาแน่นของพาราฟินก่อนซึ่งความหนาแน่นของพาราฟินที่ได้จากการทดลองจะเป็นดังในตาราง 12

ตาราง 12 ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของพาราฟิน

ครั้งที่	ปริมาตร เหล็ก	ปริมาตรพาราฟิน รวมเหล็ก	ปริมาตร พาราฟิน	มวล พาราฟิน (g)	ความหนาแน่น พาราฟิน
	(cm ³)	(cm ³)	(cm ³)		(g/cm ³)
1	6.2	43.2	37.0	33.97	0.92
2	6.2	43.4	37.2	33.97	0.91
3	6.0	43.2	37.2	33.97	0.91
4	6.2	43.4	37.2	33.97	0.91
5	6.2	43.2	37.0	33.97	0.92
6	6.0	43.4	37.4	33.97	0.91
7	6.2	43.2	37.0	33.97	0.92
8	6.2	43.2	37.0	33.97	0.92
9	6.0	43.2	37.2	33.97	0.91
10	6.0	43.4	37.4	33.97	0.91
ค่าเฉลี่ยพาราฟิน					0.91
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์					0.28%

จากตาราง 12 เป็นวิธีการทดลองหาค่าความหนาแน่นของพาราฟินโดยวิธีการแทนที่น้ำ ได้ค่าความหนาแน่นของพาราฟินที่ใช้ในการทดลองคือ 0.91 g/cm³

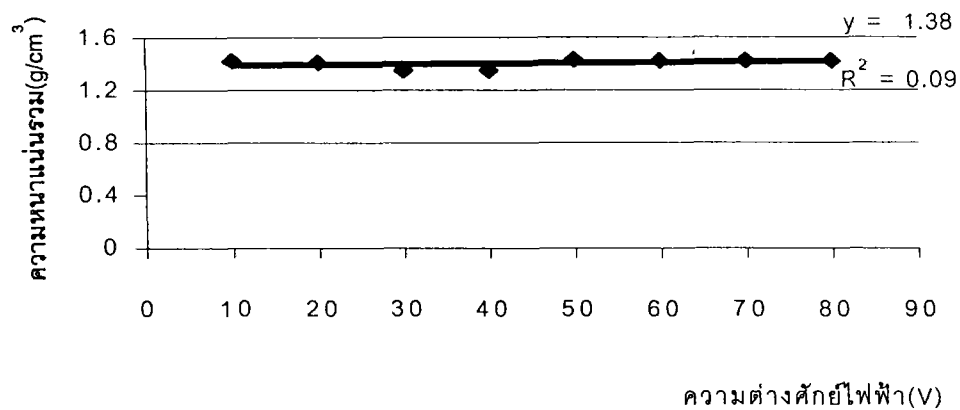
การทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่ได้จากการขึ้นรูป โดยใช้ความต่างศักย์คงที่ในช่วง 10 -100 โวลต์ บนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 1:2 และ 1:3 ในน้ำดินขาวอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 13

ตาราง 13 ผลการทดลองหาความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยความต่างศักย์คงที่ 10-100 โวลต์บนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ทั้งสามอัตราส่วน ในน้ำดินขาว 1:1

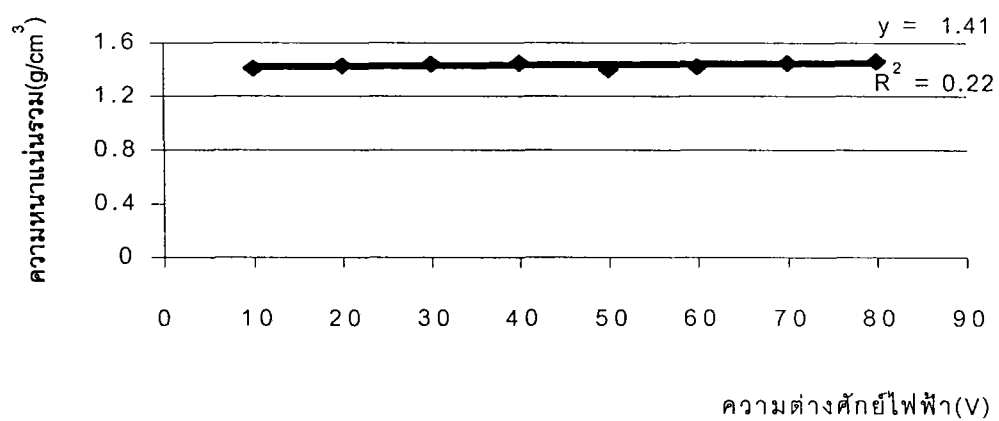
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	ความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาว (g/cm ³)		
	1:1	1:2	1:3
10	1.42	1.41	1.37
20	1.41	1.43	1.44
30	1.35	1.44	1.44
40	1.35	1.45	1.43
50	1.43	1.40	1.45
60	1.42	1.42	1.44
70	1.42	1.45	1.38
80	1.42	1.46	1.46
90*	-	-	1.39
100*	-	-	-

* ค่ากระแสไฟฟ้าเกิน 100 มิลลิแอมแปร์ ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:3 สามารถทำการทดลองได้กับค่าความต่างศักย์ 90 โวลต์

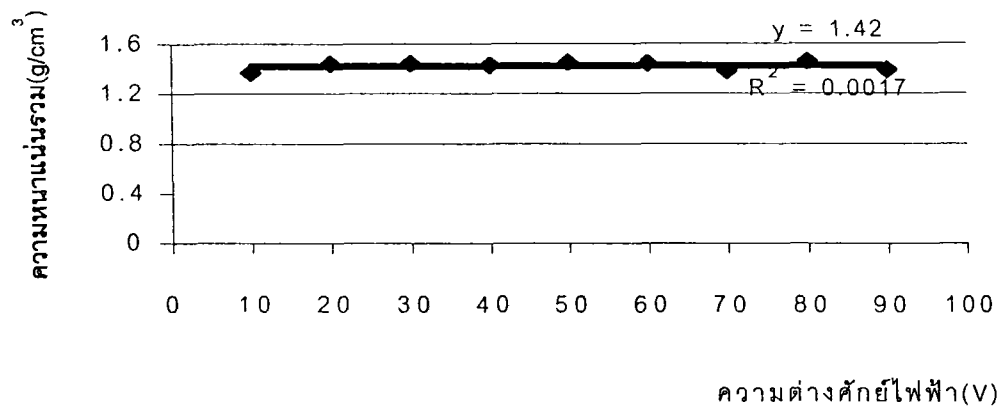
จากตารางแสดงผลการทดลองสามารถทำให้อยู่ในรูปกราฟ เพื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่ได้จากการขึ้นรูปกับความต่างศักย์ไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ได้ดังภาพประกอบต่อไปนี้



ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วน 1:1 โดยความต่างศักย์คงที่ 0 - 80 โวลต์



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:2 โดยความต่างศักย์คงที่ 0 - 80 โวลต์



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้า
แกรไฟต์อัตราส่วน 1:3 โดยความต่างศักย์คงที่ 0 – 90 โวลต์

จากตาราง 13 และภาพประกอบ 47 48 และ 49 แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ทั้งสามอัตราส่วนมีค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 10-90 โวลต์

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษาค้นคว้า

ในการออกแบบสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ไดโอดได้สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ 0 -100 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์คงที่ 0 -100 โวลต์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ไดโอด แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 0 -100 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์คงที่ 0-100 โวลต์ โดยทดสอบกับภาระที่เป็นตัวต้านทานก่อนที่จะนำมาทำการทดลองจริงกับน้ำดิน ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากแกรไฟต์ผสมปูนพลาสเตอร์อัตราส่วนต่าง ๆ คือ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 1:2 และ 1:3 และน้ำดินขาวที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ไดโอดนี้จะเป็นน้ำดินอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 โดยมวล ได้ผลสรุปของการทดลองดังต่อไปนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายกระแสคงที่ในช่วง 0 - 100 มิลลิแอมป์ โดยมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระในช่วง 200 Ω โอห์ม ถึง 1000 Ω เท่ากับ 0.5 และให้แรงเคลื่อนความต่างศักย์คงที่ 0 - 100 โวลต์ โดยมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของความต่างศักย์ เมื่อภาระเปลี่ยนระหว่าง 1 k Ω ถึง 4 k Ω เท่ากับ 2.5

2. ชุดทดลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เกาะติดดินขาวด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ในช่วง 0 – 100 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์คงที่ 0 -100 โวลต์ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 5 เซนติเมตร ถึง 15 เซนติเมตร ในน้ำดินอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 1:3 โดยมีขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับน้ำดินไม่เกิน 100 โวลต์หรือ 100 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ

ที่ความต่างศักย์คงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ปริมาณกระแสไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนผสมของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง และอัตราส่วนผสมของน้ำดินขาวกล่าวคือ

เมื่อเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าค่าเดียวกัน ในน้ำดินขาวที่มีปริมาณความเข้มข้นเดียวกัน และใช้ขั้วไฟฟ้าอัตราส่วนเดียวกัน จะพบว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีผลต่อการนำกระแสไฟฟ้า โดยที่ระยะใกล้ที่สุดคือ 5 เซนติเมตร สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุด และจะมีค่าการนำกระแสไฟฟ้าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากขึ้น สำหรับภาชนะและตัวเรือนใส่ขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ที่ระยะ 15 เซนติเมตรจะเป็นระยะไกลที่สุดและกระแสไฟฟ้าจะน้อยที่สุด

ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากัน ในน้ำดินที่มีปริมาณความเข้มข้นเดียวกัน แต่อัตราส่วนผสมของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์แตกต่างกัน การนำกระแสไฟฟ้าโดยรวมจะใกล้เคียงกัน

ส่วนอัตราส่วนของน้ำดินขาวก็จะส่งผลต่อค่าการนำกระแสไฟฟ้าเช่นกัน โดยเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากัน ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วนผสมเดียวกัน จะได้น้ำดินขาวอัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 มีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าดีที่สุดรองลงมาจะเป็นอัตราส่วนน้ำดินขาว 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ

3. มวลของดินขาวบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ หรือเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะในการทดลองได้ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทุกชิ้น โดยที่มวลดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 มีปริมาณสูงกว่าอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ดินในปริมาณเท่ากัน

4. ในการทดสอบกับการเกาะติดดินขาวด้วยชุดการทดลองที่สร้างขึ้นโดยใช้ความต่างศักย์คงที่ในช่วง 0-100 โวลต์ และทดลองหาความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวที่ได้จากการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโฟรีติก โดยใช้ค่าความต่างศักย์ที่คงที่ ในน้ำดินขาวอัตราส่วนเดียวกันคือ อัตราส่วนดินขาวต่อน้ำ 1:1 ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากันคือ 5 เซนติเมตรกับขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ผสมปูนพลาสเตอร์ทั้งสามอัตราส่วนพบว่า สามารถเกาะติดดินขาวที่ความต่างศักย์คงที่ 10 - 90 โวลต์ โดยที่ความหนาแน่นรวมของดินขาวที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ทั้งสามอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

อภิปรายผล

1. จากการออกแบบสร้างชุดการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโฟรีติกได้ทำการทดสอบความสามารถในการคงค่าของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ด้วยการจ่ายกระแสคงที่และความต่างศักย์คงที่ให้กับ ความต้านทานที่มีค่าความต้านทานแตกต่างกัน จากการทดสอบพบว่า ในการจ่ายกระแสคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระในช่วง 200 Ω โอห์มถึง 1000 Ω จะทำให้กระแสมีการเปลี่ยนแปลงได้สูงสุด 0.5 % ซึ่งหมายความว่าถ้าขณะที่เราจ่ายกระแสให้กับภาระเช่นในน้ำดิน ถ้าขณะทำการทดลองความต้านทานของน้ำดินเปลี่ยนแปลงในช่วง 200 Ω ถึง 1000 Ω การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจะไม่เกิน 0.5% และในการทดสอบการให้แรงเคลื่อนความต่างศักย์คงที่ 0 - 100 โวลต์ ด้วยวิธีการจ่ายความต่างศักย์คงที่ให้กับตัวต้านทานที่มีค่าแตกต่างกันพบว่าการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ เมื่อภาระเปลี่ยนระหว่าง 1 k Ω ถึง 4 k Ω เท่ากับ 2.5%

2. ในการทดลองการเกาะติดของดินขาว อัตราการเพิ่มมวลดินขาวที่เกาะติดบนขั้ว

ไฟฟ้าแกรไฟต์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยที่พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้งมีค่าเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ สำหรับกรณีที่ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เท่ากัน ขั้วไฟฟ้าที่มีแกรไฟต์เป็นส่วนผสมในปริมาณมากจะมีปริมาณดินขาวเกาะอยู่ในปริมาณมากกว่าขั้วไฟฟ้าที่มีส่วนผสมของแกรไฟต์อยู่น้อย หรืออัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1 มีดินขาวเกาะมากกว่าขั้วไฟฟ้าอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ การเกาะติดของดินอธิบายได้ด้วยกฎของฟาราเดย์ โดยปริมาณดินที่เกาะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้า ซึ่งเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟซึ่งแสดงถึงอัตราการเพิ่มของปริมาณดินบนขั้วไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่มีแกรไฟต์เป็นส่วนผสมในอัตราแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ที่แตกต่างกันในน้ำดินเดียวกัน พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลที่เกาะบนขั้วไฟฟ้าอัตราส่วนผสม 1:1 1:2 และ 1:3 มีค่าความชันเป็น 0.11 0.08 และ 0.11 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงมวลเป็นกรัมที่เพิ่มขึ้นต่อการเพิ่มขึ้นกระแส 1 มิลลิแอมป์ ในช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลองซึ่งในที่นี้คือ 2 นาที อย่างไรก็ตามจะเห็นว่ากรณีอัตราส่วนผสมของขั้วไฟฟ้า 1:1 และ 1:3 มีความสอดคล้องกับสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นจากชุดข้อมูลมากกว่ากรณีของอัตราส่วนผสมของขั้วไฟฟ้า 1:2 ซึ่งเห็นได้จากค่า R^2 ของสมการที่สร้างขึ้นจากชุดข้อมูลที่ได้จากขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วน 1:1 และอัตราส่วน 1:3 มีค่าใกล้กับ 1 มากกว่าข้อมูลจากขั้วไฟฟ้าอัตราส่วนผสม 1:2 ดังนั้นเราจึงอาจกล่าวได้ว่า อัตราการเกาะของดินบนขั้วไฟฟ้าน่าจะเท่ากับ 0.11 g/mA ในช่วงเวลาที่ใช้ในการเกาะ การที่มวลของดินที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ทั้งสามอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นกระแสที่ใช้จะเป็นในทางเดียวกับการกล่าวอ้างถึงการเคลือบดินในงานวิจัยของ M.Mihailescu ในเรื่อง "Electrophoretic Behavior of Ceramic Sanitaryware Slips"

3. การออกแบบสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโฟรีติก ในส่วนของการทดลองหาความหนาแน่นรวมกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ได้ข้อสรุปคือความหนาแน่นรวมของก้อนดินขาวมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กัค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยลักษณะกราฟระหว่างความหนาแน่นรวมกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนความต่างศักย์ ซึ่งเมื่อนำข้อมูลความหนาแน่นมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่าเท่ากับ 1.42 โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 2.19%

ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบการสร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการขึ้นรูปแบบอิเล็กโตรโฟรีติก ได้ทำการออกแบบ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความต่างศักย์คงที่ 0-100 โวลต์ และควบคุมกระแสคงที่ 0-100 มิลลิแอมป์ และออกแบบการทดลองโดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า โดยทำให้เป็นแผ่นกลมโดยการผสมกับปูนพลาสเตอร์ที่อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ 1:1

1:2 และ 1:3 นั้น จากการทำการทดลองผลที่ได้ก็คือ ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:1 สามารถทำให้ดินขาวมาเกาะติดที่ขั้วมากกว่าอัตราส่วนอื่น แต่มีข้อด้อยคือขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อัตราส่วน 1:1 มีความเปราะและยุ่ย เมื่อจะนำกลับมาใช้อีกครั้งจะเป็นปัญหาในการทดลอง ขณะเดียวกันก็มีข้อดีคือปริมาณดินที่ได้มีมากกว่าขั้วไฟฟ้าที่มีแกรไฟต์ผสมอยู่น้อย เมื่อใช้กระแสในปริมาณที่เท่ากัน ในส่วนนี้จึงอาจเป็นแนวทางทดลองต่อไป โดยศึกษาหาอัตราส่วนแกรไฟต์ต่อปูนพลาสเตอร์ที่มีการนำไฟฟ้าดีเหมือนกัน แต่มีความแข็งมากกว่าและไม่ยุ่ย เมื่อนำมาใช้งานหลาย ๆ ครั้ง

ในการทดลองเกาะติดดินขาวบนขั้วไฟฟ้า จะใช้น้ำดินขาวอัตราส่วน ดินขาวต่อน้ำ 1:1 โดยน้ำหนัก การทดลองจะทำกับขั้วไฟฟ้าทั้งสามอัตราส่วน เมื่อทำเสร็จสิ้นแล้วแต่ละอัตราส่วนต้องมีการเปลี่ยนน้ำดินขาว โดยการทำการทดลองจะต้องเตรียมน้ำดินขาวทั้งหมดสามชุด แล้วใช้แต่ละชุดกับแกรไฟต์แต่ละอัตราส่วน การที่ต้องเตรียมดินสามชุดเพื่อให้มีน้ำดินที่ใช้ในการทดลองทั้งสามครั้งเหมือนกัน

ส่วนการทดลองหาความหนาแน่นรวมกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า จากการทดลองความหนาแน่นรวมของดินขาวไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในช่วงความต่างศักย์คงที่ 10-100 โวลต์ อาจจะต้องออกแบบการทดลอง โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงมากขึ้น เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนว่าจะมีความเปลี่ยนแปลงอีกหรือไม่ถ้าทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ และอาจเพิ่มเวลาการเกาะติดของดินเพื่อให้ได้มวลที่มากขึ้นเพื่อเป็นการลดความคลาดเคลื่อนจากการชั่งน้ำหนักของก้อนดิน รวมทั้งอาจต้องพิจารณาถึงรูปทรงของก้อนดินโดยให้มีปริมาตรมากแต่มีพื้นผิวน้อยเพื่อลดผิวที่ต้องสัมผัสกับพาราฟินทำให้พาราฟินที่ใช้น้อยลงซึ่งเป็นการลดความคลาดเคลื่อนจากมวลพาราฟินและความคลาดเคลื่อนอื่นๆที่อาจเป็นผลจากผิวรอยต่อเช่นการซึมของพาราฟินเข้าสู่เนื้อดิน หรือช่องว่างอากาศที่อาจเกิดขึ้นเป็นต้น

จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่แห้งพบว่าขั้วไฟฟ้ามีสภาพนำไฟฟ้าแตกต่างกันมากสำหรับขั้วไฟฟ้าทั้งสามอัตราส่วน คือเท่ากับ 6.84×10^{-1} Siemens/m, 1.70×10^{-3} Siemens/m และ 2.30×10^{-6} Siemens/m, สำหรับขั้วไฟฟ้าอัตราส่วนผสม 1:1, 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ และเมื่อขั้วไฟฟ้านี้อยู่ในน้ำดินความต้านทานของขั้วไฟฟ้าทั้งสามอัตราส่วนกลับมีความแตกต่างกันไม่มากนักซึ่งเห็นได้จากจุดตัดแกนของกราฟความต้านทานกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า จึงเป็นไปได้ว่าในน้ำดิน น้ำที่แทรกเข้าระหว่างรูพรุนของขั้วไฟฟ้าทำให้ขั้วไฟฟ้านำไฟฟ้าได้ต่างไปจากเดิม ซึ่งการนำไฟฟ้านี้อาจมีส่วนเชื่อมโยงกับสารละลายในน้ำ เช่นสารกระจายดินที่ใช้ลดความหนืด ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่น่าสนใจและน่าที่จะทำการศึกษาต่อไป และจากผลค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ของการหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของแท่งแกรไฟต์แต่ละอัตราส่วนมีเปอร์เซ็นต์ค่อนข้างสูง อาจเกิดเนื่องจากการผสมส่วนผสมของแกรไฟต์กับปูนพลาสเตอร์ที่ไม่สม่ำเสมอก่อนที่จะผสมน้ำ และเมื่อผสมน้ำแล้วในการหล่อนั้นปูนพลาสเตอร์มีการแข็งตัวเร็ว ทำ

ให้เวลาที่ใช้การผสมระหว่างปูนพลาสเตอร์และแกรไฟต์กับน้ำมีเวลาน้อยเช่นกัน อาจทำให้ความสม่ำเสมอของเนื้อแกรไฟต์กับปูนพลาสเตอร์ในขณะหล่อแบบมีค่าน้อย เพราะฉะนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปถ้าต้องการให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยลง อาจต้องออกแบบวิธีการหล่อแท่งแกรไฟต์ใหม่ โดยทำให้เกิดได้ความสม่ำเสมอของเนื้อแกรไฟต์กับปูนมากยิ่งขึ้น

ปัญหาอีกประการหนึ่งที่พบในการออกแบบตัวเรือนสำหรับใส่ขั้วไฟฟ้าบวก ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ดินขามาเกาะจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์นั้น เมื่อทำการยกขั้วไฟฟ้าดังกล่าวขึ้นจากน้ำดินขาว จะมีส่วนของน้ำดินขาวบางส่วนไหลออกไม่หมด เมื่อทำการแกะขั้วไฟฟ้าออกจากตัวเรือน ซึ่งต้องหงายด้านบนขึ้น จึงอาจมีดินส่วนที่ตกค้างอยู่นี้ไหลไปรวมกับก้อนดินที่เกาะอยู่บนขั้วไฟฟ้า หรืออีกกรณีหนึ่งคือดินขาวที่เกาะติดอยู่ในตัวเรือนขั้วบวกของวงจร เมื่อยกตัวเรือนขั้วไฟฟ้าออกจากน้ำดินขาว ดินส่วนนี้อาจจะไหลออกมาพร้อมกับน้ำดินส่วนที่เหลือ จากทั้งสองกรณีดังกล่าวอาจเป็นผลทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนไปได้ ซึ่งในการศึกษาขั้นต่อไป อาจปรับปรุงรูปแบบตัวเรือนใส่ขั้วไฟฟ้าเพื่อลดปัญหาดังกล่าว

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กฤษณา ชูติมา. (2524). เนื้อดินเซรามิก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. (2525). สารานุกรมธาตุ. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ณรงค์ ขอนตะวัน. (2524). ไฟฟ้าเทคโนโลยี รหัส ขอฟ.2004. กรุงเทพฯ: เอราวิกรมการพิมพ์.
- นรินทร์ เนาวประทีป. (2535). ฟิสิกส์ ม.5 เล่ม 2 ว 023. กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซนเตอร์.
- นรินทร์ เนาวประทีป. (2539). รวมหลักฟิสิกส์ ม. 4 5 6. กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซนเตอร์.
- ปัญญา ศิลปสกุลสุข. (ม.ป.ป.). เอกสารประกอบการสอนวิชา อิเล็กทรอนิกส์ 1. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2532). เซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกอบ เอี่ยมสะอาด. (2515). การวิเคราะห์ (อินออแกนิก แคทชัน) *Inorganic cation* โดยอาศัย (อิเล็กโตรโฟเรติก เทคนิค) *Electrophoretic technique*. ปรินซ์นิพนธ์ กศ.ม. (เคมี). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสานมิตร. ถ่ายเอกสาร.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. (2539). เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพจิตร อิงศิริรัตน์. (2541). เนื้อดินเซรามิก. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2536). เคมีทั่วไป เล่ม 2. พิมพ์ ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มงคล เดชนครินทร์. (2524). สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์. (2540). เคมีเชิงฟิสิกส์ 1. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ศุภชัย ไขเทียมวงศ์. (2539). เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). (ม.ป.ป.). ความรู้เบื้องต้นด้านวัสดุ. กรุงเทพฯ: ม.ป.พ.
- สำออง ศรีนิลทา. (2517). คู่มือปฏิบัติการปฏิกิริยาเคมีเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ทำเนียบนายกรัฐมนตรี.
- สุรพงษ์ สุจิตตานนท์. (2531). ไฟฟ้าเคมี. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- โสภณ เรืองสำราญ และคณะ. (2535). เคมีทั่วไปสำหรับนักศึกษาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและพยาบาล. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- Densities of Various Materials. (online). (2003) Available: [http// www. Mcelweee. Net/html/densities of various materials.html](http://www.Mcelweee.Net/html/densities%20of%20various%20materials.html).
- Faraday's Laws of Electrolysis. (online).(2002).Available:[http//www. Plus2physics. com/current material.asp?chapter=2&page](http://www.Plus2physics.com/current%20material.asp?chapter=2&page).
- Floyd, T.L. (1977). *Electronic devices Third Edition*. New York : Macmillan Publishing Company.
- Hirata, Y., Nishimoto, A., & Ishihara,Y. (1991, November). "Forming of Alumina Powder by Electrophoretic Deposition," *Ceramic Society of Japan*. 1991(99) : 105-109.
- Johnson, J. R . (1970). *Electric circuits past I Direct current*. San Francisco : Holt, Rinehart and winston.
- Jung, W.G. (1977). *IC OP-AMP COOKBOOK*. Indianapolis : Howard W. Sam
- Mihailescu, M. and others. (1991, April). "Electrophoretic Behavior of Ceramic Sanitaryware Slips," *Inerceram*. 1991(40) : 165-170.
- Principle of Electrokinetics. (online). (2002, August). Available: Telnet : phychem. Kjist ac.ks/1332 pdf.
- Sarkar, P. & Nicholson, P.S. (1996, August). "Electrophoretic Deposition (EPD.): Mechanisms, Kinetics, and Application to Ceramics," *American Ceramic Society*. 1996(79) : 1987.
- Zeta Potential and Stability. (online). (2002. Janury). Available: [http// www. bic.com/ ztheory.htm](http://www.bic.com/ztheory.htm).
- Zeta Potential Theory. (online). (2001. December). Available: [http// www.malvern.co.uk/ zetttheo.htm](http://www.malvern.co.uk/zettheo.htm).

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวกมลวรรณ ชื่อสกุล อ่อนใจ

เกิดวันที่ 27 เดือน มกราคม พุทธศักราช 2518

สถานที่เกิด อำเภอ สามง่าม จังหวัด พิจิตร

สถานที่อยู่ปัจจุบัน 43 หมู่ 6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20210

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2533 มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสามง่ามชนูปถัมภ์ จังหวัดพิจิตร

พ.ศ. 2540 คบ. ฟิสิกส์ จากสถาบันราชภัฏ พิบูลสงครามพิษณุโลก

พ.ศ. 2546 กศ.ม. (สาขาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ