0566

วิชาฟิสิคส์เบื้องต้น
เล่ม ๕
แม่เหล็กไฟฟ้า (หัวข้อ)

สำหรับชั้นมัธยมตอนปลาย

ของ

พระดรุณพยุหรักษ์

พิมพ์ครั้งที่สาม ๑๐๐๐ ฉะบับ

พุทธศักราช ๒๔๗๖

ราคาเล่มละ ๒ บาทถ้วน

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

พิมพ์ที่โรงพิมพ์อักษรนิติ บางขุนพรหม พระนคร

539
ก132ว

วิชชาฟิสิคส์เบื้องต้น

เล่ม ๑	เมแคนิคส์	กำลังเตรียมอยู่
เล่ม ๒	ความร้อน	๒.๐๐ บาท
เล่ม ๓	แสงสว่าง	๒.๐๐ บาท
เล่ม ๔	เสียง (หัวข้อ)	๕๐ สตางค์
เล่ม ๕	แม่เหล็กไฟฟ้า (หัวข้อ)	๒.๐๐ บาท

กับ

หัวข้อวิชชาเคมี (ตอนต้น) ๒.๐๐ บาท

มีจำหน่ายที่

นายอู๋ มีศรีสม สวนกุหลาบวิทยาลัย

พระนคร

วิชาฟิสิคส์เบื้องต้น
เล่ม ๕
แม่เหล็กไฟฟ้า (หัวข้อ)

สำหรับชั้นมัธยมตอนปลาย



ของ

พระดรุณพยุหรักษ์

พิมพ์ครั้งที่สาม ๑๐๐๐ ฉะบับ

พุทธศักราช ๒๔๗๖

ราคาเล่มละ ๒ บาทถ้วน

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

พิมพ์ที่โรงพิมพ์อักษรนิติ บางขุนพรหม พระนคร

เลขห้อง 214
539
เลขหมู่ 91323
เลขทะเบียน

คำนำ

การพิมพ์หนังสือเล่มนี้เป็นความพยายามครั้งที่สองของข้าพเจ้า และได้ตั้งต้นเขียนเมื่อข้าพเจ้ากลับมาประจำโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัยเป็นครั้งที่สอง เมื่อครั้งแรกข้าพเจ้าสอนแต่จรรยาและภาษาไทยแก่ชั้นมัธยมตอนปลาย จึงไม่ได้พะวงถึงวิชาแผนกนี้ มาบัดนี้ข้าพเจ้ามีหน้าที่สอนวิทยาศาสตร์ ได้สังเกตเห็นว่านักเรียนใช้แต่ลำพังตำราภาษาฝรั่งอย่างเดียวไม่ใคร่ได้ผลนัก นอกจากพวกเยี่ยม ๆ ในชั้น เมื่อเป็นเช่นนี้จึงลองตั้งต้นเขียนเป็นภาษาไทยขึ้นบ้างเพื่อเป็นการช่วยเหลือนักเรียน ในครั้งแรกข้าพเจ้าได้เขียนแต่หัวข้อสั้น ๆ พอเป็นเครื่องช่วยความจำของนักเรียน และให้ทุ่นเวลาอันน้อยของนักเรียนคือไม่ต้องให้เปลืองเสียเปล่าในคราวลอกโนตจากกะดานดำ แต่ครั้นลองพิมพ์เข้าจริงรู้สึกว่าหัวข้อที่เขียนสั้นเกินไป นักเรียนจะศึกษาแต่โดยลำพังไม่ได้ ต่อเรื่องกันไม่ติด ครั้งนี้จึงได้ขยายให้กว้างขวางออกอีกจนเทียมเป็นหนังสือตำรา

ความจริงตำราภาษาฝรั่งที่นักเรียนไทยควรใช้ได้มีมาก และเป็นหนังสือชั้นเยี่ยมทั้งนั้น เพราะนอกจากผู้แต่งจะรู้เรื่องที่ตนเขียนเป็นอย่างเอก ยังมีความชำนาญในเชิงครูเป็นอย่างเลิศ ซ้ำหนังสือเหล่านั้นต้องแข่งกัน ถ้าไม่ดีจริงก็ไม่มีโอกาสได้เยี่ยมแท่นพิมพ์เป็นครั้งที่๒ หรือที่๒๐ แต่ตำราที่ว่ามาแล้วนักเรียนของเรายังติดขัดด้วยเรื่องภาษา กับอีกอย่างหนึ่ง ถ้าพูดกันอย่างตรงไปตรงมา หนังสือฝรั่งเขาเขียนไว้สำหรับนักเรียนฝรั่ง หนังสืออังกฤษมีความมุ่งหมายหลายอย่างรวมไปทางหนึ่ง หนังสืออเมริกันก็มีความมุ่งหมายหลายอย่างรวมไปทางหนึ่ง หนังสือเหล่านั้นแม้จะดีปานใด ก็ไม่จำเป็นจะ

พลอยเหมาะสำหรับนักเรียนไทยด้วยเสมอไป วิธีอธิบาย วิธีจูงใจนักเรียน การเปรียบเทียบให้เหตุผล ฯ ล ฯ สำหรับนักเรียนฝรั่งย่อมต่างกับนักเรียนไทยเป็นธรรมดา.

การเรียนวิทยาศาสตร์เป็นการผูกตนให้คุ้นกับความเป็นอยู่และหลักของธรรมชาติ และเมื่อคุ้นแล้วจะได้รู้จักดำเนิรชีวิตด้วยความสะดวก ฉะนั้นจึงจำเป็นที่นักเรียนจะต้องทดลองค้นคว้าหาความจริงด้วยตนเองให้ติดตา แล้วเอาความจริงต่าง ๆ เหล่านั้นมารวมกันเป็นพวก ตั้งเป็นหลักสำหรับหัดจดจำได้ง่าย และในขณะเดียวกันนักเรียนจะต้องมีหนังสืออ่านสำหรับช่วยความทรงจำอีก มิฉะนั้นจะลืมหมด ตอนเขียนเป็นหนังสือเช่นนี้เป็นตอนที่ข้าพเจ้ารับว่าไม่รู้ว่าจะเข้ารูปหรือวางโครงอย่างไร จึงจะให้ได้ประโยชน์และให้เหมาะสำหรับนักเรียนไทยจริง ๆ นักเรียนฝรั่งได้เปรียบกว่านักเรียนไทยเพราะเขามีตำราวิทยาศาสตร์ มีวิธีเรียน มีเครื่องอุปกรณ์ มีครู มีห้องทดลองขึ้นหน้านักเรียนไทย มีโอกาสได้เรียนโดยทำการทดลองกับของจริง เรียนกันคราวละน้อย ๆ และเป็นเวลาหลาย ๆ ปี จนได้ความรู้แน่นแฟ้นชำชองแบบตำราก็จัดไว้ให้เหมาะกับที่มีโอกาสเช่นนั้น นักเรียนไทยยังไม่มีโอกาสได้ทำการทดลองด้วยตนเอง แทนที่หนังสือจะได้ช่วยฟื้นความทรงจำ กลับต้องเป็นผู้จูงและบังคับให้นักเรียนวิ่งตาม เพราะนักเรียนไม่มีวัตถุสำหรับจำอยู่ก่อนแล้ว นักเรียนที่เลื่อนขึ้นมาจากชั้นมัธยมปีที่ ๖ วันแรกมักรู้สึกคล้ายกับว่าจะต้องมาผจญกับการเกณฑ์ที่จำเป็นและหนีไม่พ้น คือการต้องท่องขึ้นใจในกฎเกณฑ์ของวิทยาศาสตร์ เป็นภาษาอังกฤษประดุจท่องอรรถกถาในคัมภีร์ต่าง ๆ นักเรียนรู้สึกว่าการเรียนวิทยาศาสตร์ไม่มีอะไร นอกจากจะถูกบังคับจำใจต้องท่องต้องจำ สำหรับเตรียมเป็นทางเพื่อหาคะแนนให้พอสำหรับจะได้รับประกาศนียบัตรชั้นมัธยมบริบูรณ์ยิ่งกว่าอื่น.

ความจริงเวลาข้าพเจ้าสอนก็ได้พยายามตั้งเครื่องทดลองแสดงให้นักเรียนเห็นของจริงเสมอ แต่ผลที่ได้ยังไม่พอใจ รู้สึกว่าการสอนที่ข้าพเจ้าดำเนินอยู่ทุกวันนี้เป็นการจูงนักเรียนอย่างถูลู่ถูกัง เพื่อเตรียมสอบไล่เอาคะแนนมากกว่าเป็นการฝึกให้นักเรียนคุ้นและเข้าใจความจริงและหลักของธรรมชาติอันจะได้นำเอาไปเป็นประโยชน์ช่วยตรองช่วยคิดและใช้สมองให้เข้าหลัก เป็นคนคิดเป็น คิดถูกต่อไป ดังนี้การเขียนหนังสือสำหรับให้นักเรียนใช้เรียนวิทยาศาสตร์ จึงยังหนักใจมาก เมื่อใครจะเห็นว่าหนังสือของข้าพเจ้าเล่มนี้ไม่ใช่วิทยาศาสตร์ ข้าพเจ้าก็ยอมรับด้วยความจริงใจ ข้าพเจ้าต้องขอแรงพวกเราที่เป็นครูอยู่ด้วยกันช่วยแนะนำความเห็นเพื่อแก้ไขให้ดีขึ้น หรือจะต้องเปลี่ยนรูปวางโครงใหม่หมดทั้งเล่มก็ยิ่งดี ในตอนต้นนี้ข้าพเจ้าจะลองใช้สอนในชั้นดูก่อน รอบปีหน้าคงจะรู้บ้างว่าได้ผลเป็นอย่างไร.

ข้าพเจ้าตั้งใจจะเขียนหนังสือสองชุด มีเนื้อเรื่องให้พอกับที่ชั้นมัธยมตอนปลายต้องการ ชุดหนึ่งเป็นวิชาเคมีเล่มเดียวจบ อีกชุดหนึ่งเป็นฟิสิคส์มี ๕ เล่ม เล่มหนึ่งว่าด้วยพวกเมแคนิคส์ เล่มสองความร้อน เล่มสามแสงสว่าง เล่มสี่เสียง เล่มห้าแม่เหล็กไฟฟ้า เล่มสองสามสี่นักเรียนชั้นมัธยมตอนปลายที่โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัยต้องการใช้ทุกคน ข้าพเจ้าจึงพยายามเขียนสามเล่มนี้ให้เสร็จก่อนอื่น และพึ่งจบเล่มสองนี้เท่านั้นปีหน้าหวังว่าจะได้จบแสงสว่างและเสียง.

การพิมพ์หนังสือเล่มนี้ต้องการให้มีรูปประกอบด้วยตามควร ได้อาศัยขุนจำนงพิทยประสาทช่วยจัดรูปและทำแม่พิมพ์ แก้ภาษาไทยทั้งตรวจปรู๊ฟก่อนนำส่งกรมวิชชาธิการตรวจแก้ครั้งสุดท้าย ขอขอบใจไว้ในที่นี้ด้วย.

พระยาพูนพยุหกิจ

สวนกุหลาบวิทยาลัย
วันที่ ๑๐ มีนาคม พ.ศ. ๒๔๗๔

คำนำเพิ่มเติม

ในการพิมพ์หนังสือแม่เหล็กไฟฟ้าครั้งนี้ ข้าพเจ้าตั้งใจจะขยายให้เป็นหนังสือตำรา แต่หาเวลาไม่ได้ เพราะต้องเขียน แสงสว่างและเสียง พร้อมกันด้วย จึงคงได้แต่ขยายหัวข้อให้กว้างขวางขึ้น กับมีรูปประกอบตามควร พอให้นักเรียนอ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้นเท่านั้น.

ข้าพเจ้าตั้งใจให้หนังสือของข้าพเจ้าเล่มนี้ มีเนื้อเรื่องพอกับความต้องการของชั้นมัธยมตอนปลายจริงๆ จึงได้เติมเรื่องที่เกินกว่าหลักสูตรลงไปเล็กน้อยด้วย เช่นกฎของเกียร์คะโฮฟฟ์ แต่ก็กล่าวเพียงให้นักเรียนรู้จักกฎเท่านั้น ครูที่เลือกใช้หนังสือเล่มนี้ขอได้ช่วยเขียนวงหลักสูตรให้นักเรียนทราบด้วย.

ถ้าพูดตามใจรักของข้าพเจ้าแล้ว ข้าพเจ้าอยากจะแทรกเรื่องอื่น เช่น เมแคนิคส์ลงไปอีกด้วยทั้งดุ้น เพราะนักเรียนของเราขาดความรู้วิชาเบื้องต้นอย่างอื่นหลายอย่าง แต่ถ้าทำเช่นนั้นจะกลายเป็นไม่ใช่หัวข้อวิชาแม่เหล็กไฟฟ้าไป แต่ความจริงเป็นการจำเป็นที่สุดสำหรับการสอนให้ได้ผลในเวลานี้.

เวลาจะสอนโมเมนต์ของแม่เหล็ก เรื่องแตนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ นักเรียนโดยมากไม่เคยเรียนเรื่องโมเมนต์ เลยตามไม่ทันเสียเลย ต้องสอนวิชาอื่นควบไปด้วยตั้งสองอาทิตย์พอนักเรียนได้ฟื้นเรื่องเสียก่อน เวลาจะสอนกฎของจูล นักเรียนไม่รู้เรื่อง แรง งาน และกำลัง เวลาจะสอนหม้อไฟนักเรียนบางคนไม่เคยได้กลิ่นไอของเคมีเสียเลย เนื่องจากเหตุเช่นนี้ทำให้หัวข้อของข้าพเจ้ายืดยาดหรือแม้นอกเรื่อง แต่ข้าพเจ้ามุ่งหวังแต่ผลที่นักเรียนจะได้ ข้าพเจ้าต้องการให้นักเรียนรู้และเข้าใจเรื่องของวิชาที่เรียนเป็นใหญ่.

พร: ณ

สวนกุหลาบวิทยาลัย.
สิงห์ ๗๖.

วิชชาฟิสิคส์เบื้องต้น

เล่ม ๕

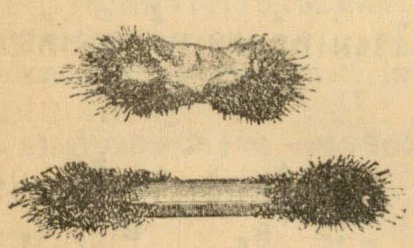
แม่เหล็กไฟฟ้า (หัวข้อ)

ภาค ๑

แม่เหล็ก

๑. **แม่เหล็ก** เป็นแร่ชนิดหนึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติตามที่ต่าง ๆ ในพื้นโลก เป็นสารประกอบระหว่างเหล็กกับออคซิเจน (Fe_3O_4) และมีสมบัติประหลาดที่ดูดเหล็กได้.

ก้อนแร่นี้มีแรงดูดมาก ขี้ตะไบเหล็กดูจึงจะเห็นจริง



รูป ๑

ออกันอยู่เป็นหย่อม ๒ แห่งเท่านั้น ต้องลองเอาคลุกว่าขี้ตะไบเกาะติดเป็นกะจุกอยู่ ๒ แห่งเท่านั้น ถ้าถากก้อนแร่ออกให้เป็นแท่งและให้รอยที่ดูดขี้ตะไบเป็นปลายแท่งทั้งสอง แล้วเอาเชือกผูกที่ตรงกลางแขวนไว้ ปลายแท่งจะชี้ไปทางทิศเหนือข้างหนึ่งทิศใต้ข้างหนึ่งเสมอ โดยเหตุนี้จึงใช้แท่งแร่นี้เป็นเข็มชี้ทิศกันมาแต่ครั้งโบราณ และก้อนแร่นี้จึงได้เรียกชื่อกันว่า **ลีดิงสโตน** (leading stone) ซึ่งต่อมาชื่อเพี้ยนเป็น **โลดสโตน** (lodestone) ต่อมาภายหลังได้ชื่อใหม่เรียกว่า **แม่เหล็ก** (magnet) อ้างกันว่าพวกฝรั่งได้พบแร่ชนิดนี้เป็นครั้งแรกที่เมือง Magnesia ใน Asia Minor จึงเรียกตามชื่อเมือง.

แม่เหล็กหรือโลดสโตนเมื่อถูกับเหล็กอื่น เหล็กที่ถูกถูจะปรากฏมีสมบัติอย่างโลดสโตนทุกอย่าง และเอาไปใช้ถูเหล็กอื่นให้เกิดสมบัติอย่างโลดสโตนได้อีกทอดหนึ่ง.

ก้อนแร่หรือเหล็กที่ดูดเหล็กอื่นได้เรียกว่าแม่เหล็ก โลดสโตนเป็นแม่เหล็กตามธรรมชาติ ส่วนแม่เหล็กอื่นเป็นแม่เหล็กที่ทำขึ้น.

วัตถุที่แม่เหล็กดูดติด เช่นเหล็ก ทองขาวหรือนิคเคล และโคบอลต์ จัดว่าเป็น **แมกเนติคซับสแตนซ** (magnetic substance) เท่าที่รู้กันมีธาตุทั้งสามนี้เท่านั้นที่เป็นแมกเนติคซับสแตนซ ธาตุอื่นไม่ใคร่เป็น แต่ธาตุผะสมของบางธาตุเมื่อผะสมกันแล้วกลายเป็นแมกเนติคซับสแตนซได้ก็มี เช่นโลหะผะสมฮอยสเลร์ (Heusler alloy) ซึ่งผะสมขึ้นด้วยทองแดงแมงกานีสและอาลูมิเนียม.

วัตถุที่แม่เหล็กไม่ดูดจัดว่าเป็น **นอนแมกเนติคซับสแตนซ** (non-magnetic substance).

วัตถุที่ไม่เพียงแต่แม่เหล็กไม่ดูด ซ้ำยังหนีจากแม่เหล็กด้วย เช่นบิสมัท แอนติโมนี จัดว่าเป็น **ไดอาแมกเนติคซับสแตนซ** (diamagnetic substance).

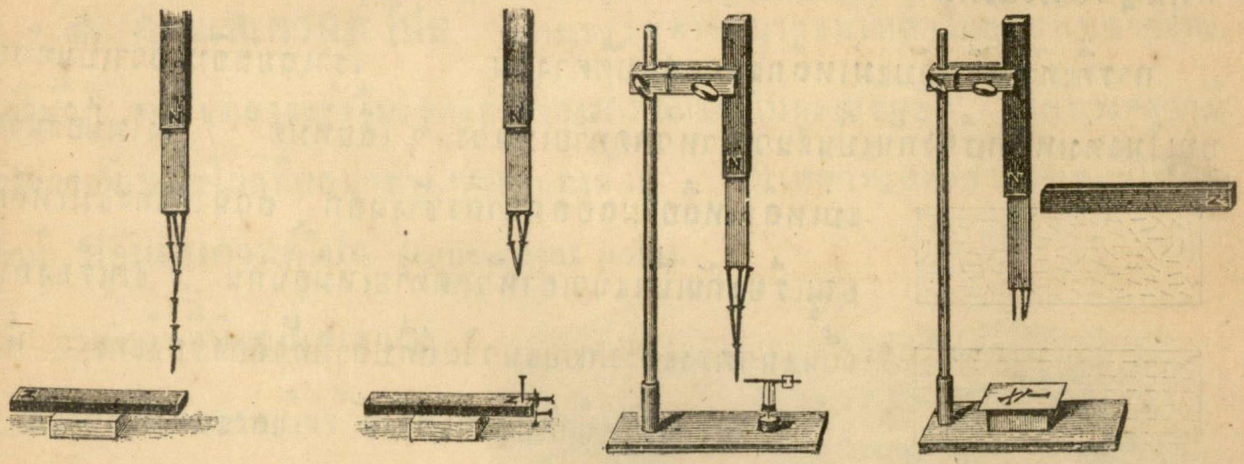
เมื่อแม่เหล็กเข้าใกล้เหล็ก ต่างก็ดูดกัน ไม่ใช่แม่เหล็กดูดเหล็กข้างเดียว ทั้งสองฝ่ายดูดกันเป็นใจเดียวกัน (mutual action).

ตามธรรมดาแม่เหล็กมีสมบัติจำเพาะประจำที่ปลาย คือปลายไหนชี้ไปทางเหนือก็ชี้ไปทางนั้นอย่างเดียวเท่านั้น ปลายไหนชี้ไปทางใต้ก็คงชี้ไปทางนั้นเสมอไป สมบัตินี้เรียกว่า **โปลาริตี** (polarity).

ปลายแม่เหล็กที่ชี้ไปทางเหนือมีชื่อเรียกว่า **ขั้วมุ่งทิศเหนือ** หรือ **ขั้วเหนือ** หรือ **ขั้วบวก** ส่วนปลายที่ชี้ไปทางทิศใต้มีชื่อเรียกว่า **ขั้วมุ่งทิศใต้** หรือ **ขั้วใต้** หรือ **ขั้วลบ**.

ขั้วเหนือด้วยกันหรือขั้วใต้ด้วยกันเมื่อเข้าใกล้กัน ต่างคนต่างผลักกัน ส่วนขั้วเหนือกับขั้วใต้ต่างคนต่างดูดกัน.

๒. การชักนำแม่เหล็ก อำนาจแม่เหล็กไม่จำกัดอยู่เพียงในก้อนของแม่เหล็กเท่านั้น แต่ย่อมซึมหรือกระจายออกไปนอกก้อนได้ทั่วทิศ การกระจายของอำนาจแม่เหล็กออกพ้นจากก้อนเรียกว่า **การชักนำแม่เหล็ก** (magnetic induction).



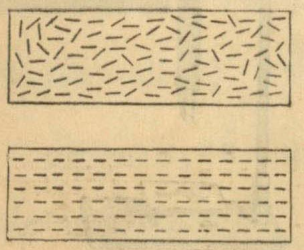
รูป ๒

ความจริงเรื่องนี้แสดงให้เห็นได้โดยเอาแท่งแม่เหล็กจ่อใกล้แท่งเหล็กอื่น เหล็กแท่งนั้นจะดูดเหล็กอื่น ๆ ได้ โดยอำนาจจากแม่เหล็กซึมไปถึงและทำให้แท่งเหล็กเป็นแม่เหล็กชั่วคราว ขั้วของแท่งเหล็กที่อยู่ใกล้แม่เหล็กแสดงอำนาจเป็นขั้วคนละชนิดกับขั้วแม่เหล็ก เมื่อยกแม่เหล็กไปให้พ้นแท่งเหล็กๆจะกลายเป็นเหล็กธรรมดาเช่นเดิม.

๓. อณูทฤษฎีของแม่เหล็ก ตามธรรมดาแท่งแม่เหล็กแสดงอำนาจแต่ที่ปลายแท่งเท่านั้น ลองเอาแท่งแม่เหล็กคลุกขี้ตะไบเหล็กแล้วยกขึ้นดู ขี้ตะไบจะเกาะติดแท่งแม่เหล็กเป็นกะจุกแต่ที่ตอนปลายเท่านั้น ตอนกลางแท่งไม่มีขี้ตะไบติดเลย แต่ถ้าหักแท่งแม่เหล็กออกเป็น ๒ ท่อน ตรงรอยที่หักจะมีอำนาจแม่เหล็กปรากฏขึ้นทันที แท่งที่หักแล้วเป็นแม่เหล็กครบบริบูรณ์ทั้งสองแท่ง คือแท่งหนึ่ง ๆ จะมี

ปลายหนึ่งเป็นขั้วเหนือและอีกปลายหนึ่งเป็นขั้วใต้ ถ้าลองหักต่อไปให้เป็นแท่งสั้นเข้า ๆ ก็จะแสดงอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นตรงรอยที่หักทุกครั้ง ความจริงอันนี้จึงชวนให้เราคิดต่อไปว่าถ้าแม้เรามีวิธีหักแท่งเหล่านี้ให้สั้นมากเข้าต่อไปได้ จนเหลือแท่งสั้นที่สุดคือจนแท่งที่หักออกเหลือเป็นอณูเดียว อณูนั้นก็จะเป็นแม่เหล็ก ดังนี้เราจึงตั้งทฤษฎีขึ้นว่า อณูของเหล็กเป็นแม่เหล็กทุกอณู และให้ชื่อว่า **อณูทฤษฎีของแม่เหล็ก** (molecular theory of magnet).

การที่แท่งเหล็กกับแม่เหล็กแสดงสมบัติต่างกัน เราเคยอธิบายว่าเป็นด้วยอณูในแท่งเหล็กเรียงกันเป็นแนวเอาหัวจดท้ายเป็นวง ๆ เสียหมด จึงไม่มีอำนาจแม่เหล็กเหลือโผล่ออกมาถึงข้างนอก ส่วนในแท่งแม่เหล็กอณูเรียงกันเป็นแนวเอาหัวจดท้ายเหมือนกัน แต่เรียงกันเป็นแนวตรงและปลายแนวโผล่ที่ปลายทั้งสองของแท่ง จึงแสดงอำนาจแม่เหล็กที่ปลายแท่งได้ และแสดงที่ปลายแท่งเท่านั้นส่วนตอนกลางของแท่งไม่มีอำนาจแสดง.



รูป ๓

ทฤษฎีนี้เคยอธิบายต่อไปว่า เวลาเราทำให้แท่งเหล็กเป็นแม่เหล็กโดยเอาโลดสโตนมาถูนั้น อณูค่อย ๆ พลิกอ้าออกจนเป็นแนวเส้นตรง และเวลากำลังของแท่งแม่เหล็กลดน้อยไป จะโดยเก็บไว้นาน ถูกกะเทือน ถูกเคาะ ถูกเผาไฟ หรือโดยอาการอื่นอย่างหนึ่งอย่างใดก็ตาม การลดกำลังคงเกี่ยวด้วยแนวของอณูในแท่งค่อย ๆ ตะล่อมปลายที่เปิดให้เข้าหากัน จนปลายแนวบรรจบกันเป็นวงอย่างเดิม.

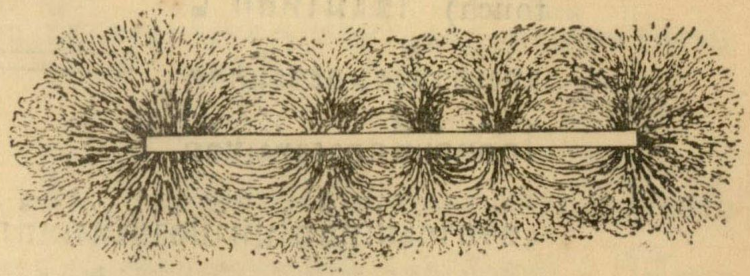
โดยเหตุนี้ การเก็บแม่เหล็กให้อยู่ได้นานจึงต้องใช้ **เหล็กคุม** หรือ **เหล็กพี่เลี้ยง** (keeper) ประกับปลายแท่งแม่เหล็กไว้ เพื่อคุมให้ปลายแนวของอณูคงเปิดอ้าอยู่ได้นาน ถึงจะถูกกะเทือนบ้าง ความร้อนหนาวประจำวันเปลี่ยนแปลง

บ้าง ปลายแนวก็ไม่โน้มเข้าหากัน ถ้าเป็นแม่เหล็กท่อนเดียวโดด ๆ และต้องการเก็บไว้ใช้ เราจึงมักงอให้เป็นรูปเกือกม้าเพื่อจะได้เอาเหล็กพี่เลี้ยงปะกับปลายแท่งได้.

การที่วัตถุพวกที่เป็นแมกเนติคซับสแตนซ แสดงสมบัติต่างกับพวกที่เป็นนอนแมกเนติคซับสแตนซก็คงเป็นด้วยอณูของพวกแมกเนติคซับสแตนซเป็นแม่เหล็ก ส่วนอณูของพวกนอนแมกเนติคนั้นไม่เป็น.

๔. คอนเสเควนต์โปล ตามธรรมดาอำนาจแม่เหล็กโผล่อยู่ที่ปลายแท่งเท่านั้น ตอนกลางแท่งไม่แสดงอำนาจแม่เหล็กและไม่ดูดเหล็กอื่น แต่บางคราวมีอำนาจแม่เหล็กโผล่ที่ตอนกลาง ๆ ของแท่งด้วย แม่เหล็กที่แสดงอำนาจเช่นนี้ได้ชื่อว่ามี **คอนเสเควนต์โปล** (consequent pole).

แม่เหล็กที่มีคอนเสเควนต์โปลนั้นปลายแท่งอาจเป็นขั้วเหนือทั้งคู่ หรือขั้วใต้ทั้งคู่ หรือขั้วหนึ่งเป็นเหนือขั้วหนึ่งเป็นใต้ก็ได้.



รูป ๔

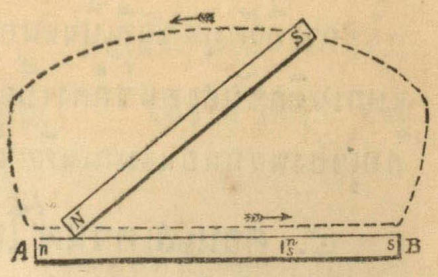
วิธีทดลองแสดงคอนเสเควนต์โปล ใช้แท่งแม่เหล็กถูเข็มถักร้อยหรือแท่งเหล็กอื่นที่ไม่สู้โตนัก ใช้ขั้วเดียวของแม่เหล็กถูแท่งเหล็กจากปลายแท่งเข้ามาหาตอนกลาง พอเกือบจะถึงกลางแท่งยกแม่เหล็กขึ้น แล้วเอาไปจดที่ปลายแท่งถูเข้ามาใหม่ ทำเช่นนี้หลายปลายแล้วลองเอาคลุกขี้ตะไบเหล็กดู ขี้ตะไบจะเกาะติดที่ตรงกลางแท่งด้วย.

๕. วิธีทำเหล็กธรรมดาให้เป็นแม่เหล็ก มีทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้ แต่ที่นิยมมากที่สุดคือวิธีที่ ๑ กับที่ ๒.

(๑) ใช้แม่เหล็กถูเหล็กธรรมดา ปลายแท่งเหล็กที่แม่เหล็กแรกจะจดเป็น

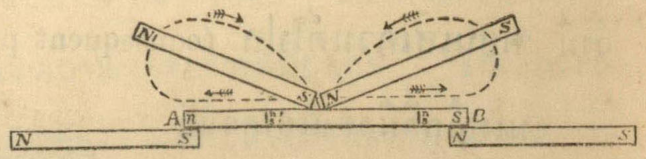
ขั้วชะนิดเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กที่ใช้จด ส่วนการถูนิยมถูต่าง ๆ วิธีกันดังนี้.—

ก. ถูช้ารอย (single touch) เอาขั้วแม่เหล็กจดที่ปลายแท่งเหล็กแล้วถูไปตามแท่งเหล็กให้ตลอดแท่ง ยกขึ้น แล้วกลับมาถูอย่างเก่าให้ตลอดแท่ง ทำเช่นนี้ให้หลาย ๆ ครั้ง.



รูป ๕

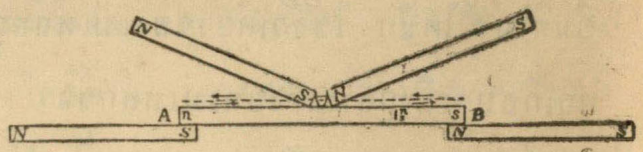
ข. ถูแยกรอย (separate touch) ใช้แม่เหล็ก ๒ แท่งเอาขั้วคนละชะนิดจดใกล้ๆกันที่กลางแท่งเหล็ก



รูป ๖

แล้วลากแม่เหล็กไปหาปลายแท่งเหล็ก ยกขึ้น แล้วกลับมาจดที่เก่า แล้วลากอย่างคราวก่อน ทำเช่นนี้ให้หลาย ๆ ครั้ง และถ้าจะให้ดียิ่งขึ้นควรหาแม่เหล็กอื่นอีก ๒ แท่ง สำหรับเอามาใช้รองแท่งเหล็กดังในรูป.

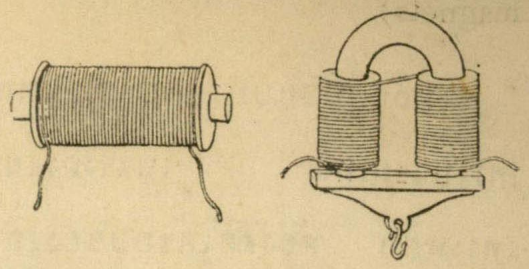
ค. ถูทวนรอย (double touch) ใช้แม่เหล็ก๒แท่งเอาขั้วคนละชะนิดจดให้ชิดกันที่กลางแท่งเหล็ก และหาเศษไม้เล็กๆขั้นระหว่างขั้วแม่เหล็ก ดันปลายแม่เหล็กทั้งสองให้ไถลไปตามพื้นแท่งเหล็ก เมื่อสุดปลายแท่งเหล็กข้างหนึ่งแล้ว ไถลแม่เหล็กกลับมาทางอีกปลายหนึ่งโดยไม่ต้องยกแม่เหล็กให้พ้นพื้นแท่งเหล็ก ไถลแม่เหล็กไปมาให้ตลอดแท่งเหล็ก



รูป ๗

เช่นนี้ให้หลาย ๆ ครั้ง และถ้าจะให้ดียิ่งขึ้นควรหาแม่เหล็กอื่นอีก ๒ แท่ง สำหรับเอามาใช้รองแท่งเหล็กดังในรูป.

(๒) **ใช้กระแสไฟฟ้า** โดยเอาลวดไฟฟ้าพันให้รอบแท่งเหล็ก เมื่อไรมีกระแสไฟฟ้าในเส้นลวด แท่งเหล็กจะเป็นแม่เหล็ก และมีกำลังมากกว่าแม่เหล็กอย่างอื่น.



รูป ๘

(๓) **ใช้แม่เหล็กมาล่อ** โดยอาศัยการชักนำแม่เหล็ก แต่วิธีนี้ได้ผลเพียงเป็นแม่เหล็กชั่วคราว.

(๔) **ใช้เคาะหรือเผาไฟ** ในเมื่อวางแท่งเหล็กให้อยู่ในแนวเมริเดียนของแม่เหล็กของโลก.

เมื่อเราทำเหล็กธรรมดาเป็นแม่เหล็ก แล้วอยากจะให้หมดอำนาจแม่เหล็กกลับเป็นเหล็กธรรมดา เราต้องทำให้แท่งแม่เหล็กกะเทือนเพื่อเขย่าแนวอณู ใช้เคาะแรง ๆ ก็ได้ หรือเอาไฟเผาให้ร้อนจัดก็ได้ วิธีดีที่สุดเอาลวดผูกแท่งแม่เหล็กยกไปเผาไฟในเปลวที่ร้อนจัดเช่นเปลวตะเกียงบุนเสน เมื่อแท่งแม่เหล็กร้อนแดงแล้วค่อย ๆ ลดเปลวให้ร้อนน้อยเข้า และปล่อยให้แท่งแม่เหล็กเย็นช้า ๆ และในขณะเดียวกันระหว่างที่แท่งแม่เหล็กเย็น ต้องแขวนแท่งแม่เหล็กให้อยู่ในแนวตะวันออกตะวันตกตลอดเวลา เมื่อเย็นแล้วจะหมดอำนาจแม่เหล็กอย่างสนิท.

เวลาแท่งเหล็กกลายเป็นแม่เหล็กแล้ว แนวอณูตามผิว ๆ ของแท่งเท่านั้นที่อ้าออกเป็นแนวปลายเปิด ส่วนที่อยู่ลึกเข้าไปตอนในของแท่งคงเป็นแนวปลายปิด ฉะนั้นถ้าใครจะได้แม่เหล็กที่มีกำลังมากต้องใช้แผ่นเหล็กบาง ๆ ทำให้เป็นแม่เหล็กคราว

ละแผ่น แล้วเอาแผ่นเหล่านั้นวางซ้อนกันเป็นแท่ง แม่เหล็กเช่นนี้เราเรียกว่า **แม่เหล็กรวม** หรือ **แม่เหล็กแบตเตอรี** (compound หรือ battery หรือ laminated magnets).

เหล็กที่มีขอบบรรจบกันเป็นห่วงเหล็กและวงแหวนเหล็ก ตามปกติมักไม่ใคร่เป็นแม่เหล็ก เพราะถึงแนวอณูจะเป็นแนวตรงแล้วก็ยังคงเป็นวงตามรูปของแท่งเหล็ก ต้องตัดให้ขอบของแท่งแยกจากกันจึงจะมีอำนาจแม่เหล็กแสดงตรงรอยที่ตัด แต่มีบางคราวเกิดเป็นคอนเสเควนต์โปล วงแหวนเป็นแม่เหล็กทั้ง ๆ ยังไม่ตัดขอบให้แยกจากกัน.

๖. **สนามแม่เหล็ก** หมายถึงอาณาเขตต์รอบแท่งแม่เหล็กที่แรงแม่เหล็กจากแท่งส่งไปถึง อาณาเขตต์ตอนที่อยู่ในแท่งแม่เหล็กเป็นบริเวณภายใน และตอนที่อยู่นอกแท่งแม่เหล็กเป็นบริเวณภายนอก อาณาเขตต์ที่แรงแม่เหล็กส่งไปไม่ถึงเป็นบริเวณนอกสนาม.

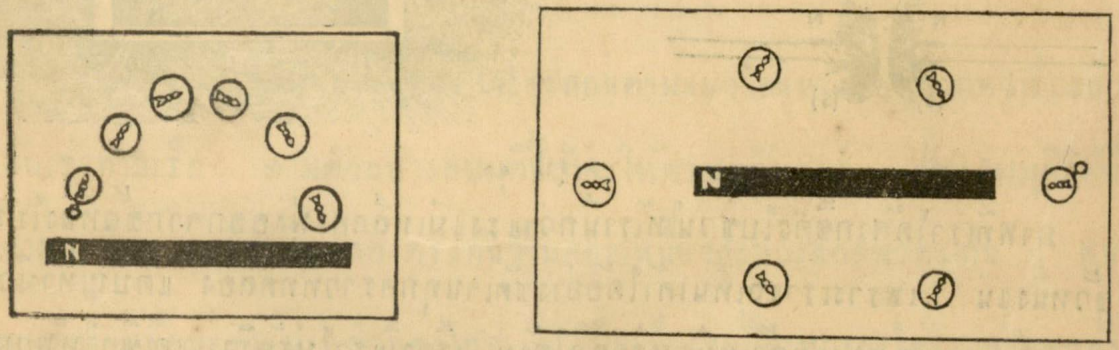
แรงแม่เหล็กหมายถึงแรงที่แม่เหล็กแสดงได้ เช่นเวลาเราถือก้อนเหล็กเข้าใกล้แท่งแม่เหล็กเรารู้สึกมีแรงดูดกัน แรงดูดหนับ ๆ นั้นแหละคือแรงแม่เหล็ก.

เมื่อพูดถึงเรื่องแรง เราต้องหวนมาคิดถึงคำว่า ทาง (direction) กับ ทิศ (sense) ให้เข้าใจด้วย จึงจะจับความหมายของเรื่องแรงแม่เหล็กได้ชัดเจนขึ้น เวลาเราออกแรงแก่วัตถุใด ๆ เพียงแต่บอกปริมาณของแรง และแนวที่ออกแรงเท่านั้น ยังไม่ได้ความหมายชัดตายตัวบริบูรณ์ เช่นเราออกแรงแก่ก้อนวัตถุตามแนวตะวันออกตะวันตก เมื่อพูดเพียงเท่านี้เรายังบอกไม่ถูกว่าวัตถุจะเคลื่อนที่จากตะวันออกไปทางตะวันตก หรือจากตะวันตกไปทางตะวันออก เราต้องบอกทิศที่เรากะตุ้นแรงด้วย แนวที่ออกแรงเป็นทางของแรง แรงกะตุ้นไปทางไหนเป็นทิศของแรง แรงที่ฉุดดิฟต์ขึ้นลงตามตึกสูง ๆ ทางของ

แรงเป็นทางเดียวกันทั้งขั้นทั้งลง คือทางอยู่ในแนวดิ่ง แต่ทิศของแรงที่ฉุดลิฟต์นั้น ขาขึ้นทิศหนึ่ง ขาลงทิศหนึ่ง ไม่เหมือนกัน.

วิธีเขียนภาพแสดงแนวของแรงแม่เหล็กเรานิยมทำกัน ๒ วิธี.-

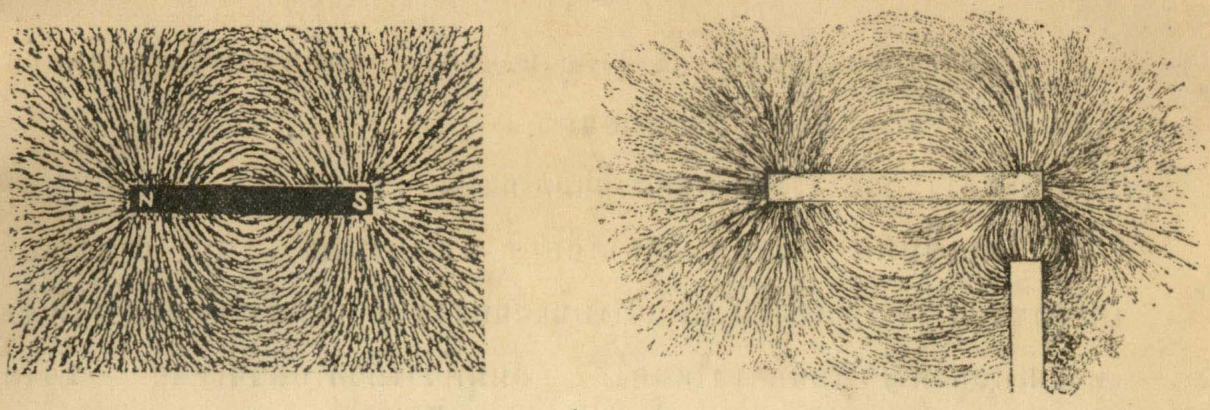
(๑) **โดยเข็มทิศ** เอาเข็มทิศอันเล็ก ๆ ยาวประมาณ ๑ ซม. สำหรับเป็นเครื่องชี้แนว เอาแท่งแม่เหล็กวางบนแผ่นกระดาษ เอาเข็มอันเล็กวางให้ชิดแท่งแม่เหล็กใหญ่จะเป็นที่ตรงไหนก็ได้ สมมุติว่าแถวที่ใกล้ขั้วเหนือ ขั้วใต้ของเข็มอันเล็กจะหมุนไปติดอยู่กับแท่งใหญ่และขั้วเหนือหันหนีออกจากแท่งใหญ่ เอาดินสอทำจุดบนกระดาษที่ตรงกับขั้วเหนือของเข็มอันเล็ก ร่นเข็มอันเล็กต่อไปจนปลายใต้ชิดกับจุดดินสอที่หมายไว้เมื่อตะกี้ แล้วเอาดินสอทำจุดบนกระดาษที่ตรงขั้วเหนือ ร่นเข็มอันเล็กเรื่อยไปเช่นนี้ จุดดินสอที่เราหมายตามเข็มอันเล็กเรื่อยไปจะแสดงแนวของแรงแม่เหล็กแท่งใหญ่นั้น.



รูป ๘

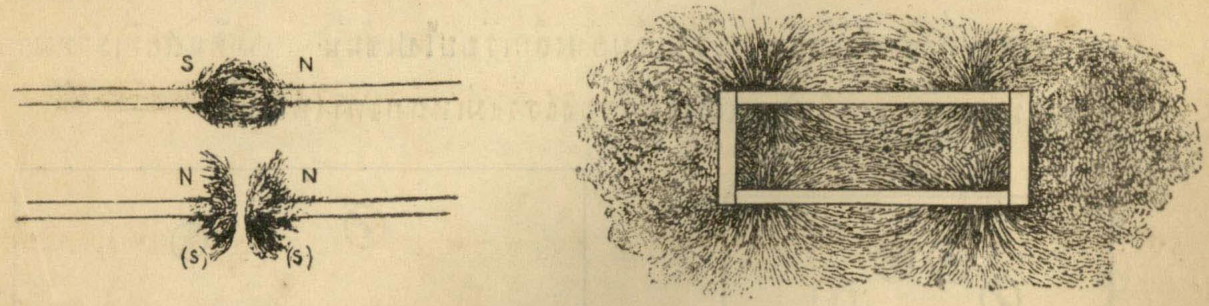
(๒) **โดยขี้ตะไบเหล็ก** เอาแผ่นกระดาษวางทับแท่งแม่เหล็ก แล้วเอาขี้ตะไบโรยบนแผ่นกระดาษ ค่อย ๆ เคาะแผ่นกระดาษ ขี้ตะไบจะเรียงเป็นเส้น ๆ แสดงแนวของแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กนั้น

ถ้ามีแม่เหล็กแท่งเดียว ขี้ตะไบจะเรียงกันเป็นแนว ๆ และโค้งวกจากขั้วหนึ่งของแท่งแม่เหล็กไปหาอีกขั้วหนึ่งทุกแนว และจะวกเป็นวงกว้างเข้าทุกที บางแนวกว้างจนพอเห็นแต่เป็นเค้าว่าวกได้เท่านั้น.



รูป ๑๐

ถ้ามีแม่เหล็กหลายแท่ง แนวชะไบระหว่างขั้วชะนิดเดียวจะกันอ้ายันรับกัน ระหว่างขั้วคนละชะนิดจะต่อกันเป็นแนวเดียว.

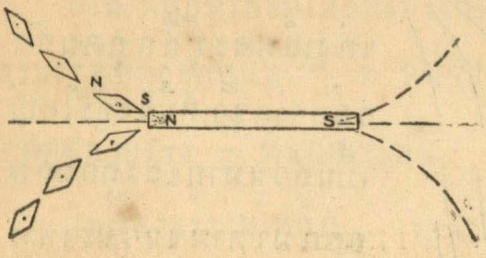


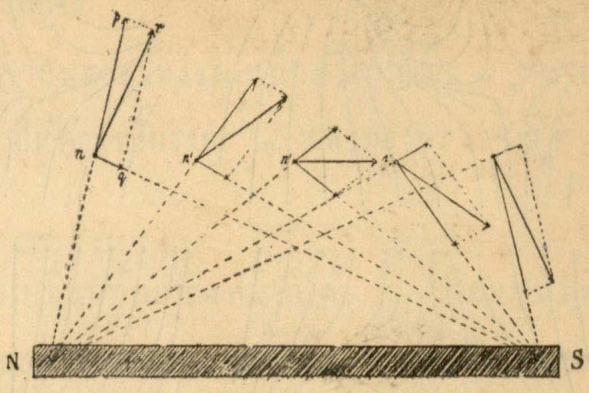
รูป ๑๑

ภาพที่เราได้จากชะไบชวนให้เรานึกว่าแรงแม่เหล็กคงพุ่งออกจากขั้วหนึ่งไปหาอีกขั้วหนึ่งแน่ เพราะเราแลเห็นเค้าได้อย่างชัดเจนทุกคราวที่ทดลอง แต่ปัญหามีว่าแรงแม่เหล็กจะพุ่งออกจากขั้วเหนือหรือขั้วใต้แน่ เรื่องนี้เราไม่รู้จริง แต่เพื่อให้พวกเรามีความเข้าใจตรงกัน เราถือกันว่าแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากขั้วเหนือแล้วกลับไปหาขั้วใต้.

ปัญหาที่น่าคิดมีอีกข้อหนึ่งว่าทำไมแนวแรงแม่เหล็กจึงโค้งเป็นวง ก็เมื่อแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากขั้วหนึ่ง และอยากจะกลับไปยังอีกขั้วหนึ่งก็ทำไมไม่แล่นตรงไปเล่า เรื่องนี้เกี่ยวกับแรงแม่เหล็กของโลกด้วย แนวโค้งของชะไบไม่แสดงทางเดินของแรงใดแรงเดียว แต่เป็นแนวแสดงทางเดินของแรงร่วมระหว่างหลายแรงรวมกัน ลองคิดดูตามตัวอย่างสมมุติต่อไปนี้ให้เข้าใจ มีเรือลำหนึ่งจอดอยู่ข้างคลอง ที่หัวเรือมีคนถือถ่อค้ำสะหะให้พ้นเรือ ที่ท้ายเรือมีคนถือตาขอสำหรับเหนี่ยวสะหะให้เข้าใกล้เรือ พอมีสะหะลอยมาใกล้หัวเรือ คนหัวเรือค้ำออก

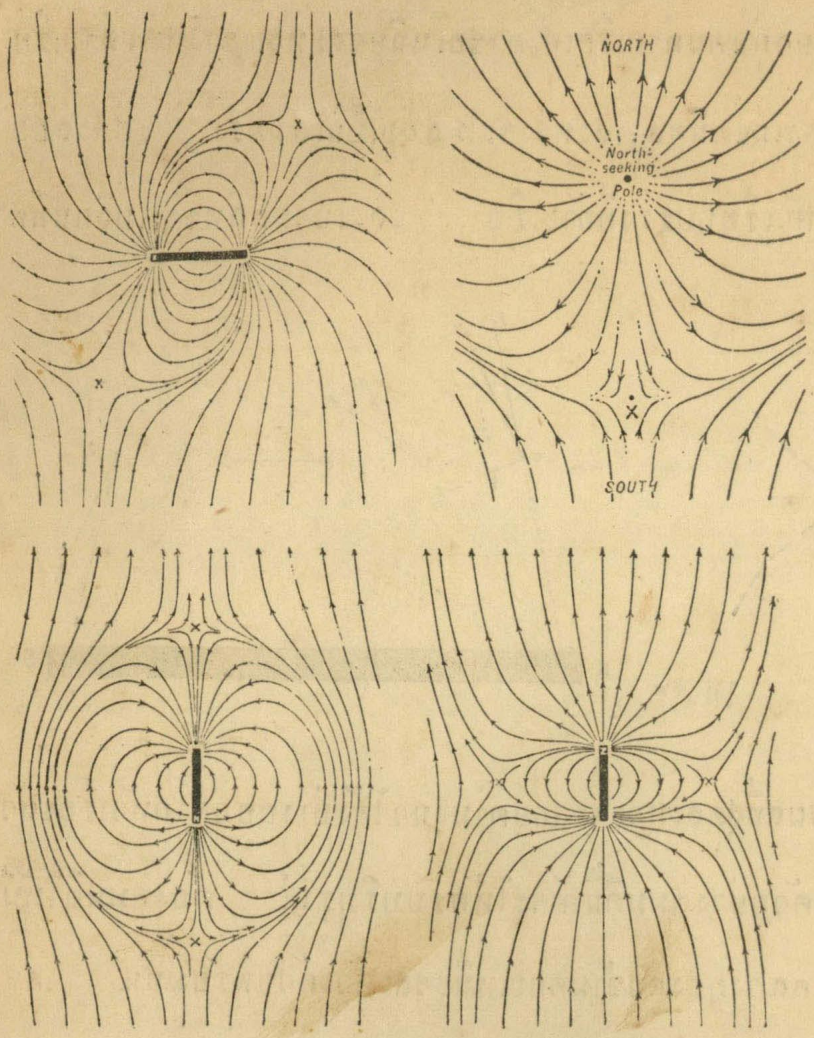
ไปเต็มแรง และในขณะเดียวกันคนท้ายเรือเอาตาขอเหนี่ยวสะหวะเข้าไปหาท้ายเรือ เราจะเห็นได้ทันทีจากหลักของเมแคนิคส์ว่าสะหวะจะไม่ลอยเป็นเส้นตรง แต่จะลอยตามแนวผลลัพธ์ระหว่างแรงที่หัวเรือกับแรงที่ท้ายเรือ และแนวผลลัพธ์จะเปลี่ยนทิศ





รูป ๑๒

และทางอยู่ทุกขณะ ฉะนั้นผลที่สุดสะหวะจะลอยตามแนวโค้งห่างออกจากหัวเรือแล้วงอกกลับเข้าท้ายเรือ ตามตัวอย่างสมมุตินี้ถ้าจะให้ครบบริบูรณ์ ต้องสมมุติให้มีคนที่สามยืนถือตาขอที่อีกฝั่งคลองตรงกันข้ามคอยเหนี่ยวสะหวะด้วยพร้อมกัน คนที่สามเปรียบเหมือนแรงแม่เหล็กของโลก เมื่อเป็นเช่นนี้สะหวะจะได้แรงจากคนทั้งสามต่าง ๆ กัน สุดแต่สะหวะลอยอยู่ที่ไหน ถ้าสะหวะลอยอยู่ใกล้หัวเรือก็ได้รับแรงจากคนหัวเรือเป็นส่วนมาก ถ้าใกล้ท้ายเรือก็ได้แรงจากคนท้ายเรือเป็นส่วนมาก ถ้าลอยอยู่ใกล้ฝั่งตรงกันข้ามก็ได้แรงจากคนทางฝั่งโน้นเป็นส่วนมาก และที่ตอนกลางคลองจะมีเป็นบางตอนที่สะหวะได้รับแรงจากคนทั้งสามเท่า ๆ กัน สะหวะจะไม่เคลื่อนที่เลย ซึ่งเปรียบเหมือนกับในที่เหล่านั้นคนทั้งสามส่งแรงไปไม่ถึง โดยแรงไปฆ่ากันเสียหมด และสะหวะปรากฏเหมือนกับว่าไม่ได้รับแรงจากคนทั้งสามเสียเลย.



รูป ๑๓

ในเรื่องแม่เหล็กก็คงเป็นเหมือนกันแบบนี้ สมมุติว่ามีขั้วเหนือเล็ก ๆ ของแม่เหล็กแท่งอื่นวางอยู่ใกล้ ๆ ขั้วเหนือของแม่เหล็กแท่งใหญ่ ขั้วแท่งเล็กจะรู้สึกถูกผลักออกจากขั้วเหนือแท่งใหญ่เป็นส่วนมากและถูกผลักออกมาตามแนวฉะเพาะจำกัดแนวหนึ่ง พอเคลื่อนที่ออกมาหน่อยหนึ่ง จะรู้สึกถูกผลักเปลี่ยนทิศทันที และเปลี่ยนทิศเรื่อยไปทุกขณะ และในสนามของแม่เหล็กแท่งใหญ่นั้นจะมีบริเวณบางแห่งที่แม่เหล็กแท่งเล็กไม่รู้สึกถูกผลักหรือถูกเหนี่ยว โดยเหตุที่ในบริเวณเหล่านั้นแรงจากขั้วเหนือขั้วใต้ของแท่งใหญ่ และแรงของโลกฆ่ากันหมดพอดี บริเวณเหล่านี้ได้ทำเครื่องหมายกากะบาดไว้ให้ดูในรูป.

๗. เส้นแรงของแม่เหล็ก ความจริงแรงของแม่เหล็กจะพุ่งออกจากปลายแท่งอย่างไรแน่นั้นเป็นการยากที่จะสอบสวนหาความจริงได้แน่แท้ แต่ตามเค้าที่เห็นได้จากรอยขีดระไบเห็นพุ่งบานออก ถ้าจะคิดเอาเป็นว่าพุ่งบานออกเป็นเส้น ๆ ทำนองแสงสว่างเปล่งออกจากจุดความสว่าง เราก็ต้องถือเอาว่าแรงแม่เหล็กมีลักษณะเป็นเส้น ๆ เส้นหนึ่ง ๆ เราเรียกว่า **เส้นแรงของแม่เหล็ก** (line of force) และ

เป็นธรรมดาบริเวณต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็ก บริเวณไหนอยู่ใกล้ปลายแท่งก็มีเส้นแรงออกันอยู่แน่นกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป ฉะนั้นแรงแม่เหล็กบนพื้นที่เท่ากัน แถวใกล้ปลายแท่งจะมากกว่าแถวที่ห่างพ้นปลายแท่งออกไป ถ้ายิ่งไกลออกไปแรงก็ยิ่งน้อยเข้าเป็นลำดับ และน้อยเข้าตามส่วนของระยะทางที่ห่างออกไปกำลังสอง อย่างเดียวกับเรื่องความร้อนและแสงสว่าง.

ถ้ามีเหล็กหรือแม่เหล็กแท่งเล็ก ๆ ห่างจากปลายแท่งแม่เหล็กอันใหญ่เป็น ๑ หน่วยระยะรู้สึกถูกดูดหนัก ๆ ๘ หน่วย ถ้าร่นให้ห่างเป็นระยะ ๓ หน่วยระยะ จะรู้สึกถูกดูดด้วยแรง $\frac{๘}{๙}$ หน่วยเท่านั้น.

ในเรื่องแรงแม่เหล็ก เราจะพูดเปรียบเทียบอีกอย่างหนึ่งก็ได้ โดยสมมุติว่าแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากปลายแท่งเป็นหลอดและหลอดเหล่านี้เบียดกันเต็มที่ว่างนอกแท่งแม่เหล็กหมด และเมื่อพูดเช่นนี้เราก็คงเขียนรูปแสดงอย่างเดียวกับรูปเส้นแรง แต่เส้นที่เขียนไม่หมายถึงเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นแต่เส้นแสดงอาณาเขตต์ว่าแรงแม่เหล็กเป็นหลอดเบียดกันอยู่อย่างไร ถ้าเราสมมุติว่าแรงแม่เหล็กเป็นหลอดหลอดหนึ่ง ๆ เราเรียกว่า **หลอดแรง** (tube of force) และหลอดเหล่านี้คงเรียวที่ปลายและป่องที่ตอนกลางอย่างตัวลอดช่อง ฉะนั้นพื้นที่รับแรงถ้าเป็นพื้นที่เท่ากัน เมื่ออยู่ใกล้ปลายแท่งก็รับได้หลายหลอด ถ้าอยู่ห่างออกไปก็ได้รับน้อยหลอดหรือแม้เป็นเศษส่วนของหลอด ๆ เดียว และแรงที่ได้รับก็คงน้อยลงตามส่วนของระยะทางกำลังสอง เช่นเดียวกันกับที่พูดว่าแรงเป็นเส้น ๆ.

๔. **หน่วยขั้ว** เมื่อพูดถึงแรงแม่เหล็ก เราต้องจำไว้ว่าเรายังวัดแรงเดี่ยวประจำปลายหนึ่งปลายใดของแท่งแม่เหล็กไม่ได้ แรงดูดหรือแรงผลักที่เราวัดได้คราวใด ๆ ย่อมเป็นแรงร่วมเสมอ เช่นตัวอย่าง ปลายหนึ่งของแท่งแม่เหล็กดูดแม่เหล็กแท่งอื่นหรือดูดก้อนเหล็กน้อยติดอยู่ได้ และถ้าก้อนที่ดูดติดอยู่หนัก ๕ กรัม ก็แปลว่าแรงดูดที่ดูดก้อนที่น้อยติดอยู่นั้นมากกว่า ๕ กรัม ถ้าทดลองต่อไปได้

ความจริงว่าเมื่อเอาน้ำหนักอีกน้อยหนึ่งมาถ่วงก้อนที่ห้อย ๆ จึงจะพอดีหล่นตกลงมาจากแม่เหล็ก ดังนี้แปลว่าแรงที่ดูดทั้งหมดเท่ากับ ๑๕ กรัม แต่แรงดูด ๑๕ กรัมนี้เป็นแรงดูดร่วมระหว่างแม่เหล็กกับก้อนที่ถูกดูด สองแรงรวมกันต่างหากเท่ากับ ๑๕ กรัม จะเป็นแรงละเท่าใดเรารู้ไม่ได้ จะกล้าพูดได้ก็แต่เพียงแรงหนึ่งน้อยกว่า ๑๕ กรัม.

เมื่อความจริงเป็นเช่นนี้ เป็นธรรมดาเราย่อมอาศัยกำลังดูดที่ปลายแท่งตามที่เราวัดได้เป็นจำนวนสำหรับใช้วัดขั้วแม่เหล็กไม่ได้ เราจำเป็นต้องหาหน่วยอย่างอื่นสำหรับใช้วัดขั้วแม่เหล็ก หน่วยที่เราใช้กันเรียกว่า **หน่วยขั้ว** (unit pole).

แม่เหล็กสองแท่งที่มีแรงที่ปลายเท่ากันพอดี เมื่อเอาปลายของแท่งหนึ่งวางห่างจากปลายของอีกแท่งหนึ่งเป็นระยะ ๑ ซม. แล้วเกิดแรงผลักหรือแรงดูด ๑ ดายน์ แม่เหล็กนั้นได้ชื่อว่ามีแรงที่ปลายปลายละ ๑ หน่วยขั้ว.

(๑ ดายน์คือแรงที่พอกะต้นให้ก้อนวัตถุมีมวล ๑ กรัมเกิดอัตราเร่งหรืออัตราหน่วงวินาทีละ ๑ ซม. ทุกวินาที หยาบ ๆ ๑ กรัมเท่ากับ ๙๘๑ ดายน์)

แรงแม่เหล็กที่ส่งไปยังที่ซึ่งไกลจากปลายแท่งออกไปย่อมมีกำลังน้อยเข้าตามส่วนของระยะทางกำลังสอง ฉะนั้นถ้าแม่เหล็กคู่หนึ่งมีแรงที่ปลายเท่ากัน และเมื่อห่างกัน ๒ ซม. มีแรงดูด ๑ ดายน์ดังนี้ เมื่อห่างกันเพียง ๑ ซม. จึงมีแรงดูด ๔ ดายน์ คือมีแรงที่ปลาย ปลายละ ๒ หน่วยขั้ว.

สูตรสำหรับคำนวณแรงระหว่างขั้วแม่เหล็กมีดังนี้.—

$$F = \frac{mm'}{r^2}$$

F = แรงคิดเป็นดายน์

m, m′ = ขั้วแม่เหล็กคิดเป็นหน่วยขั้ว

r = ระยะระหว่างขั้วคิดเป็นเซ็นติเมตร

หมายเหตุ ความจริงแรงดูดหรือแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กนั้นเป็นแต่เพียงได้ส่วนกับผลคูณของกำลังแม่เหล็กที่ดูดหรือผลักกันหารด้วยระยะทางระหว่างขั้วกำลังสอง

$$F \propto \frac{mm}{r^2}$$

ไม่ใช่ $$F = \frac{mm'}{r^2}$$

เพราะขั้วแม่เหล็กคู่เดียวกันวางห่างจากกันเป็นระยะคงที่ตายตัวไม่จำเป็นจะเกิดแรงดูดหรือแรงผลักเท่ากันเสมอไป เรื่องนี้ย่อมเกี่ยวกับชะนิดของวัตถุที่ขั้นขั้วแม่เหล็กด้วย ถ้าเป็นอากาศขั้นได้แรงอย่างหนึ่ง ถ้าเป็นไม้ เหล็ก ยาง กะจก กำมะถัน ฯลฯ ได้แรงอีกอย่างหนึ่ง เรื่องนี้เปรียบเหมือนเราออกแรงให้หัวไม้ถ่อสองอันกะแทกกัน แม้ออกแรงดันเท่ากันทุกคราว เวลาให้หัวถ่อกะแทกกันในอากาศ ในน้ำ ในโคลน ในกองทราย ฯลฯ แรงที่กะแทกกันย่อมไม่เหมือนกันทุกครั้งไป สูตรที่ถูกแท้จริงในเรื่องแม่เหล็กต้องเป็น.

$$F = k\frac{mm'}{r^2}$$

k เป็นนิจ (constant) ขึ้นแก่ชะนิดของวัตถุที่อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสอง สำหรับอากาศเราให้ k เป็น ๑ และเรื่องราวต่าง ๆ ที่เราคำนวณกันมักเป็นเรื่องที่อากาศขั้นขั้วแม่เหล็กโดยมาก ฉะนั้นเราจึงคุ้นต่อสูตร $F = \frac{mm'}{r^2}$ ประหนึ่งเราไม่เอาใจใส่ต่อ k เสียเลย.

ตัวอย่าง. – (๑) ขั้วแม่เหล็กคู่หนึ่งมีแรง ๕ กับ ๖ หน่วยขั้ว วางห่างกัน ๙ ซม. ขั้วแม่เหล็กคู่ที่สองมีแรง ๕ กับ ๘ หน่วยขั้ว วางห่างกัน ๔ ซม.

ถามว่า ก. คู่ที่หนึ่งมีแรงดูดระหว่างกันเท่าไร ?

ข. คู่ที่สองมีแรงดูดระหว่างกันเท่าไร ?

ค. แรงดูดระหว่างคู่ที่หนึ่งกับคู่ที่สองเป็นกี่เท่าของกัน ?

วิธีทำ ใช้สูตร $F = \frac{mm^1}{r^2}$

ก. $F_1 = \frac{4 \times 6}{9^2} = \frac{8}{27}$ ดายน์

ข. $F_2 = \frac{5 \times 8}{4^2} = \frac{5}{2}$ ดายน์

ค. $F_1 : F_2 = \frac{8}{27} : \frac{5}{2} = 16 : 135$

(๒) แม่เหล็ก 'ก' มีแรงที่ปลาย ๒๐๐ หน่วยขั้ว เมื่อวางห่างจากแม่เหล็ก 'ข' เป็นระยะ ๔ ซม. มีแรงดูดกัน ๐.๕๑ กรัม ถามว่า 'ข' มีแรงที่ปลายเท่าไร ?

สมมุติว่า 'ข' มีแรงที่ปลาย x หน่วยขั้ว

.51 กรัมเท่ากับ .51 × 981 ดายน์

$$F = \frac{mm^1}{r^2}$$

$$.51 \times 981 = \frac{200\,x}{4^2}$$

$$x = 40 \text{ หน่วยขั้ว}$$

๙. ความเข้มในสนามแม่เหล็ก ตามจุดต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็กย่อมได้รับแรงจากแม่เหล็กไม่เหมือนกัน สุดแต่จุดเหล่านั้นจะห่างจากแม่เหล็กมากหรือน้อย

และณที่จุดเดียวกันถ้าเอาแม่เหล็กอื่นมาต่อ ถ้าเป็นแท่งที่มีแรงที่ปลายมากจะได้แรงดูดมาก ถ้าเป็นแท่งที่มีแรงที่ปลายน้อยจะได้แรงดูดน้อย ฉะนั้นปริมาณความเข้มต้องพูดเป็นอัตราจึงจะเข้าใจกัน คือต้องบอกแรงดูดว่าหน่วยขั้วละเท่าใด หน่วยสำหรับวัดความเข้มตามจุดต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็กเรียกว่า **เกาส์ส** (Guass) คือแรงดูด ๑ ดายน์ต่อ ๑ หน่วยขั้ว เช่นณที่จุดหนึ่งมีความเข้มทำให้ขั้วแม่เหล็ก ๑ หน่วยขั้วรู้สึกถูกดูดหรือถูกผลักแรง ๕ ดายน์ ความเข้มที่จุดนั้นก็ ๕ เกาส์ส และถ้าเอาขั้วแม่เหล็ก ๒๐ หน่วยขั้วมาวาง จะเกิดแรงดูด ๑๐๐ ดายน์

ทิศของแรงแม่เหล็กตามที่ต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็กให้ถือเอาตามทิศที่ขั้วเหนืออันซึ่งใช้เอามาต่อที่จุดนั้นเคลื่อนที่.

๑๐. **แมกเนติคโมเมนต์** ของแม่เหล็กแท่งหนึ่งคือแรงหมุนของแม่เหล็กแท่งนั้นที่เกิดขึ้นในเมื่อแม่เหล็กแท่งนั้นตั้งได้ฉากกับเส้นแรง ในสนามแม่เหล็กณจุดที่มีความเข้ม ๑ เกาส์ส.

พูดห้วน ๆ อย่างภาษาเลข ผลลัพธ์ของแมกเนติคโมเมนต์เท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนหน่วยขั้วที่ปลายแท่งกับส่วนยาวของแท่งแม่เหล็ก (แต่พูดเช่นนี้ผิดเหตุผล).

ถ้า M = แมกเนติคโมเมนต์.

m = จำนวนหน่วยขั้วที่ปลายแท่ง.

$2l$ = ส่วนยาวของแท่งแม่เหล็ก.

$M = 2ml$

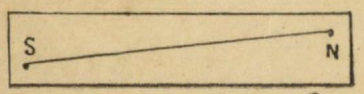
เราไม่ได้เอาจำนวนหน่วยขั้วที่ปลายแท่งคูณกับส่วนยาวของแท่งแม่เหล็กโดยตรง เราคิดมาได้ดังนี้ เวลาแท่งแม่เหล็กตั้งฉากกับเส้นแรงย่อมเกิดแรงหมุนทั้งสองปลาย ที่ปลายหนึ่งเกิดแรงหมุน ที่อีกปลายหนึ่งก็เกิดแรงหมุน ฉะนั้นแรงหมุนทั้งหมดคือ โมเมนต์ ของทั้งสองปลายรวมกัน คือ $ml + ml = 2ml$

ตัวอย่างแม่เหล็กแท่งหนึ่งยาว ๑๐ ซม. และที่ปลายมีแรงข้างละ ๕ หน่วย ขั้ว ดังนั้นแมกเนติคโมเมนต์ของแม่เหล็กแท่งนั้นเท่ากับ ๕๐ หน่วย (ดายน์เซ็นติเมตร).

อัตราส่วนระหว่างแมกเนติคโมเมนต์กับบริมาตรของแท่งแม่เหล็กมีชื่อเรียกว่า **ความเข้มของการเกิดอำนาจแม่เหล็ก** (intensity of magnetisation).

๑๑. แกนแม่เหล็ก (magnetic axis) หมายถึงเส้นตรงที่ลากระหว่างขั้วของแม่เหล็ก และเส้นตรงที่ลากผ่านจุดกึ่งกลางของแกนแม่เหล็กให้ตั้งฉากกับแกนแม่เหล็กเรียกว่า **เส้นศูนย์สูตรของแม่เหล็ก** (magnetic equator).

ตามปกติเราถือเอาเส้นตรงตามยาวที่กลางแท่งของแม่เหล็กเป็นเส้นแกนก็ดีพอแล้ว แต่ถ้าพิถีพิถันให้ละเอียดจริง แท่งแม่เหล็กอาจมีขั้วเยื้องไปจากจุดกลางของปลายแท่งก็ได้ดังรูป และเมื่อเป็นเช่นนี้เส้นแกนก็เบี่ยงหน่อย ไม่ขนานกับแท่งแท้ และเวลาเอาแขวนไว้กับที่ แท่งแม่เหล็กจะไม่ชี้ตรงแนวหนือใต้ เพราะฉะนั้นถ้าเราต้องการรู้เส้นแกนที่แท้ของแท่งแม่เหล็กหรือต้องการรู้แนวหนือใต้ (magnetic meridian) ให้ถูกจริง เราต้องลองแขวนแท่งแม่เหล็กดูสองครั้ง เมื่อแขวนครั้งแรกจงเลือกเส้นทะแยงมุมบนแท่งแม่เหล็กเส้นใดเส้นหนึ่งเป็นหลัก ทำเครื่องหมายบนพื้นที่ใต้แท่งแม่เหล็กที่แขวนให้ตรงกับจุดหัวท้ายของเส้นทะแยงมุม พลิกแท่งแม่เหล็กเอาหน้าด่างขึ้นบน แล้วแขวนอย่างเก่าอีกครั้ง ทำเครื่องหมายบนพื้นที่ใต้แท่งแม่เหล็กให้ตรงกับจุดหัวท้ายของเส้นทะแยงมุมอันเดียวกันกับที่เลือกไว้เมื่อตะกี้นี้ แนวเส้นทะแยงมุมที่หมายไว้บนพื้นจะไขว้กัน เส้นแบ่งมุมของมุมที่แนวเส้นทะแยงมุมไขว้กันนี้เป็นแกนที่ถูกต้องของแท่งแม่เหล็ก.



๑๒. ศัพท์เบ็ดเตล็ด ความจริงเรายังไม่ต้องการคุ้นกับศัพท์เหล่านี้มากนัก เป็นเรื่องที่ใช้กันในตอนปลายของวิชานี้ และโดยมากออกจะพูดกันเป็นภาษาเดช

ด้วย ถ้าเราไม่เกี่ยวข้องกับเรื่องราวตอนนั้นโดยฉะเพาะ เราไม่ใคร่เข้าใจความหมายแท้และถึงแม้เข้าใจก็ลืมง่าย เพราะเกี่ยวกับเรื่องคำนวณแต่ในที่นี้จะให้ความหมายเป็นภาษาคำพูดพอเป็นเลา ๆ

ศักย์แม่เหล็ก (magnetic potential) หมายถึงการ เปลืองแรง (work) ที่ใช้เคลื่อนที่ขั้วเหนือของ แม่เหล็กจาก นอกสนามแม่เหล็ก เข้ามาภายในสนามแม่เหล็ก งานที่เสียไปสำหรับให้ขั้วเหนือเคลื่อนไปถึงจุดใดจุดหนึ่งเป็นจำนวนศักย์แม่เหล็กที่จุดนั้น.

แมกเนติคฟลัคซ์ (magnetic flux) หมายถึงจำนวนไหลของแรงแม่เหล็กและได้พูดไว้แล้วว่าแรงแม่เหล็กพุ่งบานออกจากปลายแท่ง และจะสมมุติเอาเป็นว่าพุ่งออกเป็นเส้น ๆ หรือเป็นหลอด ๆ ก็เข้าที่ทั้งสองอย่าง ฉะนั้นความเข้มตามจุดต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็กจะใช้วัดด้วยจำนวนหลอดที่ผ่านพื้นที่จำกัดตรงจุดนั้นก็ใช้ได้ แต่เราต้องตกลงจำนวนหลอดและขนาดพื้นที่เข้าใจกัน จำนวนหลอดที่ไหลผ่านพื้นที่ ๑ ตารางซม. เป็นจำนวนแมกเนติคฟลัคซ์.

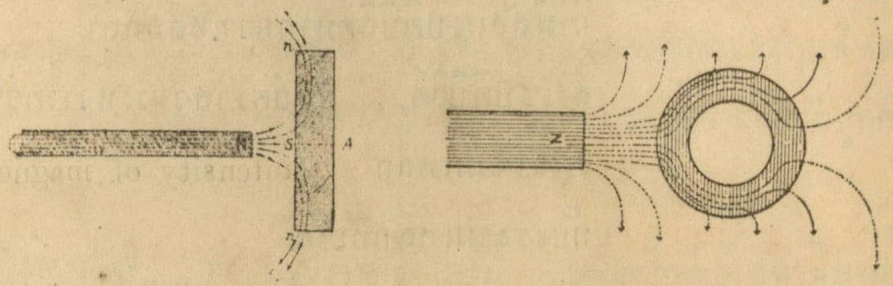
สัสเซปติบิลิตี (susceptibility) แม่เหล็กแท่งเดียวกันเมื่อเอาไปถูเหล็กแท่งอื่น ๆ แท่งที่ถูกถูได้รับแรงไม่เหมือนกัน เช่นแท่งเหล็กอ่อนเป็นแม่เหล็กแรงกว่าแท่งเหล็กกล้า เหล็กอ่อนได้ชื่อว่ามีสัสเซปติบิลิตีมากกว่าเหล็กกล้า.

สัสเซปติบิลิตี คืออัตราส่วนระหว่างความเข้มของการเกิดอำนาจแม่เหล็ก (intensity of magnetisation) เทียบกับแรงแม่เหล็กที่ใช้ถู.

แท่งเหล็กต่าง ๆ เมื่อถูกทำให้เป็นแม่เหล็กแล้ว บางแท่ง

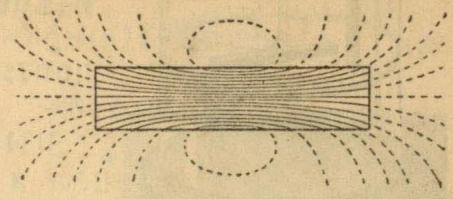
ดำรงอำนาจไว้ได้ดีกว่านานกว่า เช่นเหล็กกล้าคงเป็นแม่เหล็กได้นานดีกว่าเหล็กอ่อน เมื่อเป็นเช่นนี้เหล็กกล้าได้ชื่อว่ามี **โคเออรซิฟฟอร์ซ** (coercive force) ดีกว่าเหล็กอ่อน

ความซึมได้ (permeability) เวลาเอาแท่งเหล็กธรรมดาวางในสนามแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กชอบรวมกันวกเข้าหาแท่งเหล็กเพื่อซึมเข้าในแท่ง ต่อเมื่อซึมตลอดแท่งแล้ว จึงจะกระจายออกจากกันใหม่ ทำไมจึงเป็นเช่นนี้เราไม่รู้นอกจากจะนึกเอาว่า เหล็กและวัตถุอื่นที่เป็นแมกเนติคซับสแตนซช่วยนำแรงแม่เหล็กได้ดีกว่าวัตถุอย่างอื่นเช่นอากาศ สมบัติที่เป็นตัวนำดีสำหรับอำนาจแม่เหล็กนี้เราใช้ชื่อว่าความซึมได้หรือเปอร์มีอาบิลิตี เรื่องนี้ถ้าเราอยากจะพูดอีกอย่างหนึ่งก็ต้องว่า อากาศมีความต้านทานต่อแรงแม่เหล็กมากกว่าเหล็กและพวกแมกเนติคซับสแตนซ แรงแม่เหล็กจึงหลบจากอากาศเข้าหาเนื้อเหล็ก ความต้านทานต่ออำนาจแม่เหล็กเราให้ชื่อว่า **รีลัคแตนซ** (reluctance) โดยเหตุนี้แผ่นเหล็กหนา ๆ จึงใช้เป็น **ฉากแม่เหล็ก** (magnetic screen) ได้เพราะแรงแม่เหล็กไม่ริบทะลุแผ่นเหล็กออกไปหาอากาศ และชอบมุดเนื้อเหล็กให้ไกลที่สุดจะหาทางมุดไปได้ คือไปโผล่ออกตามขอบของแผ่นเหล็กที่อยู่ไกลที่สุด.

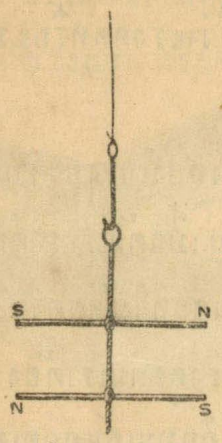


รูป ๑๕

วงจรแม่เหล็ก (magnetic circuit) ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศกับแนวของแรงแม่เหล็กในแท่งต่อกันเป็นวง วงหนึ่ง ๆ เรียกว่าวงจรแม่เหล็ก และมีบางคนชอบให้ชื่อแนวแรงแม่เหล็กในแท่งว่า เส้นชักนำ (line of induction) ทั้งนี้เพื่อจะไม่ให้ปนกับ เส้นแรง (line of force) เมื่อเอ่ยชื่อจะได้เข้าใจกันทันทีว่าเราหมายถึงเส้นแรงในบริเวณภายในหรือภายนอก ตามปกติเส้นแรงแม่เหล็กมักโผล่ออกที่ด้านปลายของปลายแท่ง แต่ที่โผล่ออกทางด้านข้างตอนใกล้ปลายแท่งก็มี ตอนที่โผล่ออกเช่นนี้บางคนก็ให้ชื่อว่า ส่วนรั่วของแม่เหล็ก (magnetic leakage) ถ้าโผล่ออกด้านข้างลึกเข้าไปมากตอนกลาง ๆ แท่งก็เป็นคอนเสเควนต์โปล



รูป ๑๖



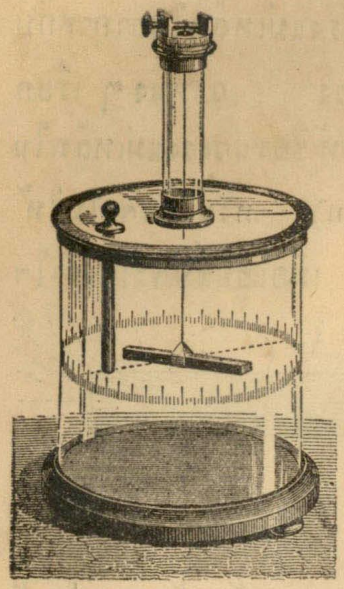
เข็มแอสเตติค

รูป ๑๖

๑๓. **เข็มแอสเตติค** มีบางคราวเราต้องการแขวนแท่งแม่เหล็กแล้วไม่ให้ชี้ศายตัวในแนวทิศเหนือใต้ แต่ให้หมุนได้อย่างแท่งเหล็กธรรมดา เราใช้แม่เหล็ก ๒ แท่งเรียงขนานกันแต่ให้ไขว้กลับกัน แล้วเอาเหล็กเชื่อมตรงกลางแท่งให้ติดกัน เวลาแขวนจะได้หมุนไปพร้อมกัน แม่เหล็กที่ติดกันเป็นคู่และขั้วสลับกันเช่นนี้เรียกว่า **เข็มแอสเตติค** (astatic needle)

๑๔. **ตอร์ชันแบแลนซ์** (torsion balance) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดแรงดูดหรือแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กโดยตรง และโดยเหตุที่แรงระหว่างขั้วแม่เหล็กมักเป็นจำนวนน้อย ๆ เครื่องมือที่ใช้วัดต้องคล่องที่สุด มิฉะนั้นความผิดของเครื่องจะกินแรงเสียหมด วัดไม่ได้ความจริง มักได้ผลคลาดเคลื่อนไป ตอร์ชันแบแลนซ์ประกอบด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ (มักเป็นลวดเงิน).

ขั้นต้นเราต้องทดลองให้รู้แน่นอนว่าเมื่อเราจับปลายลวดเส้นนั้นตะบิดด้วยแรงต่าง ๆ



รูป ๑๗

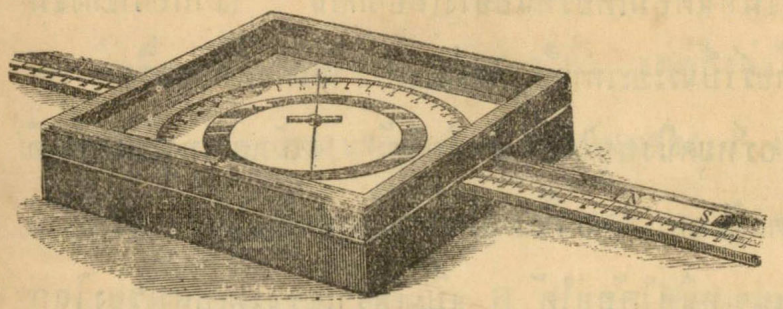
กัน เส้นลวดตะบิดเป็นมุมคราวละกี่องศา เมื่อเราสังเกตรู้แรงตะบิดได้แน่นอน แล้วเอาลวดนั้นผูกกลางแท่งแม่เหล็กแขวนทิ้งไว้จนหยุดนิ่ง ลองเอาขั้วแม่เหล็กอื่นมาล่อ แล้ววัดให้รู้ว่าปลายแท่งที่ลวดผูกเบนหนีหรือเบนเข้าหาขั้วแม่เหล็กที่ใช้ล่อเป็นมุมกี่องศา ดังนี้เราก็รู้ได้ทันทีว่าแรงดูดหรือแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสองเป็นเท่าใด.

บางคราวถ้าเราใคร่จะรู้แรงระหว่างขั้วทั้งสองในระยะจำกัด เช่นเมื่อขั้วทั้งสองห่างกัน ๑ ซม.หรือ ๒ ซม.เป็นต้น เราต้องรู้ขั้วที่ใช้ล่อ ถ้าเป็นแรงผลักกันเราต้องรู้ขั้วที่ใช้ล่อตามไปด้วยจนห่างกันได้ระยะที่ต้องการ ถ้าเป็นแรงดูดกันเราต้องรู้ขั้วที่ใช้ล่อให้ถอยหลังจนได้ระยะที่ต้องการ แล้วอ่านมุมที่แท่งแม่เหล็กบนเส้นลวดเบนจากที่เดิม.

เวลาทดลองจริงๆ มักไม่ใช้รู้ขั้วที่ใช้ล่อ เพราะต้องรู้ตามทางโค้งของครอบแก้วซึ่งไม่สะดวก เรามักวางขั้วที่ใช้ล่อให้อยู่กับที่ และวางให้ห่างจากปลายแท่งแม่เหล็กบนเส้นลวดให้ได้ระยะที่ต้องการ เมื่อวางใหม่ๆ ปลายแท่งที่แขวนจะเบนหนี (ถ้าเป็นแรงผลักกัน) และหมุนเข้าหา (ถ้าเป็นแรงดูดกัน) เราต้องหมุนปลายบนของเส้นลวดช่วยขึ้นให้ จนขั้วแม่เหล็กทั้งสองห่างจากกันได้ระยะที่ต้องการ แล้วอ่านมุมที่เราหมุนปลายลวดข้างบน.

๑๕. แมกนิตอมิเตอร์ เป็นเครื่องมือสำหรับใช้เปรียบเทียบกำลังแม่เหล็ก และที่แท้แมกนิตอมิเตอร์ก็คือแท่งแม่เหล็กธรรมดาที่หมุนได้รอบตัวอย่างเข็มทิศนั่นเอง ถ้าใคร่จะรู้ว่าแม่เหล็กสองแท่งของเราแท่งไหนจะแรงกว่ากัน ก็เอาแม่เหล็กวางในแนวตะวันตกตะวันออก ให้ห่างจากเข็มทิศคราวละแท่ง และให้ห่างเป็นระยะเท่ากันทั้งสองคราว แท่งไหนทำให้เข็มทิศหันเป็นมุมมากกว่ากัน แท่งนั้นก็มีแรงมากกว่า หรือจะวางแท่งแม่เหล็กคราวละแท่งและให้ห่างจากเข็มทิศเป็นระยะไม่เท่ากันก็ได้แต่

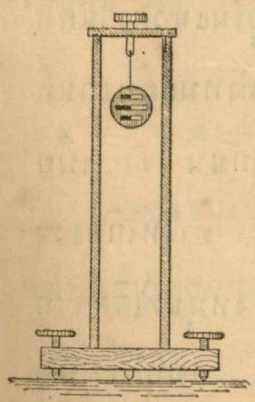
ต้องร่นไปมาจนเข็มทิศหันเป็นมุมเท่ากันทั้งสองคราว แท่งไหนห่างจากเข็มทิศมากกว่ากัน แท่งนั้นก็มีแรงมากกว่า หรือจะวางแท่งแม่เหล็กพร้อมกันในคราวเดียวกันก็ได้ แต่ต้องวางคนละข้างของเข็มทิศและหันขั้วชะนิดเดียวกันเข้าหาเข็มทิศ แล้วร่นแท่งไปมาจนเข็มทิศคงหันไปทางเหนือย่างเดิม แท่งไหนอยู่ไกลจากเข็มทิศกว่ากันแท่งนั้นก็แรงกว่า หรือจะวางแท่งแม่เหล็กทั้งสองห่างจากเข็มทิศเป็นระยะเท่ากันก็ได้ แต่



รูป ๑๗

ต้องสังเกตให้รู้ว่าปลายเข็มทิศบิดไปทางไหน ถ้าใช้ขั้วเหนือมาต่อเข็มทิศทั้งคู่ปลายเข็มทิศบิดหนีไปจากแท่งไหน แท่งนั้นแรงกว่า ถ้าใช้ขั้วใต้มาต่อ ปลายเข็มทิศบิดเข้าหาแท่งไหน แท่งนั้นแรงกว่า ความเที่ยงของผลลัพธ์อาศัยความคล่องของเข็มทิศที่ใช้เป็นแมกนิตอมิเตอร์ แต่ตามปกติเข็มทิศที่ผังทับทิมเป็นดีพอใช้ได้แล้ว และตามที่ใช้กันมักใช้แท่งแม่เหล็กสั้นๆ อ้วนๆเป็นเข็มแมกนิตอมิเตอร์และมีเข็มอาลุมิเนียมเล็กๆ ยาวๆ ตรึงทับหลังแท่งแม่เหล็กสำหรับให้อ่านมุมที่เข็มหันได้ละเอียดยิ่งขึ้น. (ดูรูป ๑๘)

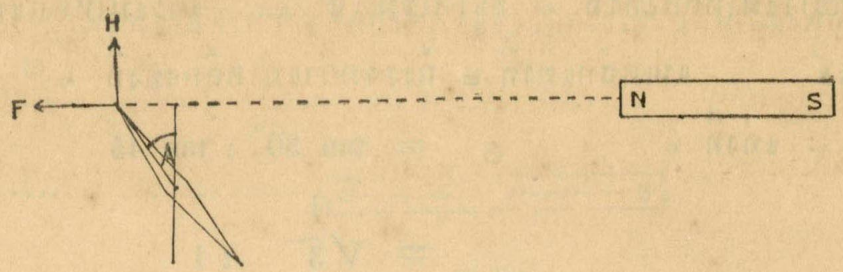
ถ้าใคร่จะอ่านมุมที่เข็มแมกนิตอมิเตอร์หันให้ละเอียดยิ่งขึ้น เราใช้กระจกเงาแผ่นเล็กๆ ห้อยตามแนวตั้งให้ติดกับเข็ม เมื่อเข็มหันกระจกก็หันตามไปด้วย เราคอยสังเกตจุดสว่าง ที่สะท้อนจากกระจกเงาเคลื่อนที่โดยวิธีนี้แม้เข็มหันแต่เล็กน้อยหรือเป็นแต่กระเทือนเท่านั้น เราก็สังเกตจุดสว่างเคลื่อนที่ได้ชัดเจนและละเอียดมาก (และมีหน่ำซ้ำจุดสว่างเคลื่อนที่สองเท่าของมุมที่เข็มหันจริง นักเรียนที่เรียนวิชชาแสงสว่างแล้วจึงจะเห็นจริงข้อนี้ด้วย) เครื่องที่มีกระจกเงาประกอบด้วยเรียกว่า **แมกนิตอมิเตอร์กะจก** (mirror magnetometer).



รูป ๑๘

เท่าที่ได้พูดมาแล้วเป็นแต่เพียงบอกวิธีเปรียบเทียบ พอรู้ว่าแม่เหล็กแท่งไหนแรงกว่าแท่งไหนเท่านั้น ถ้าจะใคร่รู้ให้ละเอียดกว่านี้คือใคร่จะรู้ว่าแรงกว่ากันกี่เท่า เราต้องเอามุมที่เข็มหันกับระยะที่วางแท่งแม่เหล็ก ห่างจากแมกนิตอมิเตอร์มาคิดรวมด้วย.

ในตอนนี้จะคิดแต่มุมที่เข็มแมกนิตอมิเตอร์หันอย่างเดียวก่อน เราถือว่าแท่งแม่เหล็กวางห่างจากแมกนิตอมิเตอร์เป็นระยะเท่ากันทุกครั้งไป เวลาทดลองจริง ๆ เราต้องปล่อยให้เข็มแมกนิตอมิเตอร์หยุดนิ่งอยู่ในแนวเหนือใต้ แล้วเอาแท่งแม่เหล็กที่จะเทียบกันวางในแนวตะวันตกตะวันออก ตรงนี้นักเรียนต้องหยุดคิดให้เข้าใจว่าทำไมเข็มแมกนิตอมิเตอร์จึงชี้นิ่งในแนวเหนือใต้อยู่ได้ เป็นเพราะแรงแม่เหล็กของโลกต่อขั้วเหนือของเข็มแมกนิตอมิเตอร์ และสมมุติว่าแรงแม่เหล็กของโลกส่งแรงมาถึงขั้วเหนือของเข็มแมกนิตอมิเตอร์เป็นแรง H เวลานี้แรง H ไม่ทำให้เข็มแมกนิตอมิเตอร์มีแรงหมุน H เป็นแต่ดึงแกนที่ตั้งเข็มจะให้แกนหักอย่างเดียว ในขณะเดียวกันนี้สมมุติว่าแท่งแม่เหล็กที่วางใกล้แมกนิตอมิเตอร์ ส่งแรงมาถึงปลายเข็มแมกนิตอมิเตอร์เป็นแรง F เวลานี้แรง F ทำให้เข็มแมกนิตอมิเตอร์เกิดแรงหมุนอย่างเดียว เพราะส่งมาตั้งได้ฉาก เมื่อเข็มแมกนิตอมิเตอร์หันไปบ้างแล้ว แรงหมุนจาก F ก็น้อยเข้า ๆ จนเมื่อเข็มหมุนไปสุดกู่คือเข็มอยู่ในแนวตะวันตกตะวันออก แรงหมุนจาก F จะไม่มีเหลือ เวลานี้แรงจาก F ทั้งหมดดันแกนที่ตั้งเข็มแมกนิตอมิเตอร์จะให้แกนหักอย่างเดียว และในขณะเดียวกันนี้ เมื่อเข็มแมกนิตอมิเตอร์ตั้งต้นหันจากแนวเหนือใต้ แรง H ค่อย ๆ ทำให้เกิดแรงหมุนมากเข้า ๆ ฉะนั้นเมื่อเข็มแมกนิตอมิเตอร์หันมาได้หน่อยหนึ่งแรงหมุนที่เกิดจากแรง H กับแรง F จะเท่ากันพอดี และเมื่อนั้นเข็มจะหยุดอยู่นิ่ง สมมุติว่าเมื่อเข็มหยุดอยู่นิ่ง เข็มหันไปเป็นมุม A



รูปที่ ๒๐

เมื่อเป็นดังนี้เราอาจมีอีเทียบสมการได้ แต่ต้องจำไว้เสมอว่าแรง H กับแรง F ไม่เท่ากัน แรงหมุนของ H กับแรงหมุนของ F เท่ากันเท่านั้น.

สมมุติว่าเข็มแมกนิตอมิเตอร์มีแรงที่ปลาย m หน่วยขั้ว และมีส่วนยาว $2l$

เวลานี้แรงหมุนที่เกิดจากแรง H $= Hml \sin A$

และ แรงหมุนที่เกิดจากแรง F $= Fml \cos A$

ฉะนั้น $Fml \cos A = Hml \sin A$

หรือ $F = H \tan A$

ดังนั้นถ้าแท่งแม่เหล็กที่เทียบกัน แท่ง ๑ ส่งแรงมาถึงปลายเข็มเป็นแรง F_1 และเข็มหันเป็นมุม A_1 แท่ง ๒ ส่งแรงมาถึงปลายเข็มเป็นแรง F_2 และเข็มหันเป็นมุม A_2

$$F_1 : F_2 = H \tan A_1 : H \tan A_2$$
$$= \tan A_1 : \tan A_2$$

ถ้าแท่งแม่เหล็กทั้งสองอยู่ห่างจากเข็มเป็นระยะเท่ากัน แม่เหล็กทั้งสองก็เทียบกันได้ส่วนตามแรงที่ส่งไปถึงเข็มเทียบกันนั่นเอง คือได้ส่วนตามค่าของ tan ของมุมที่เข็มหัน.

เช่นตัวอย่างแม่เหล็กแท่งที่ ๑ ทำให้เข็มหัน ๓๐° และแม่เหล็กแท่งที่ ๒ ทำให้เข็มหัน ๔๕° แม่เหล็กแท่งที่ ๒ ก็แรงกว่าแม่เหล็กแท่งที่ ๑

$$\text{แท่งที่ ๑ : แท่งที่ ๒} = \tan 30^\circ : \tan 45^\circ$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} : 1$$

$$= .57 : 1$$

ถ้าเราจะเอาระยะที่วางแท่งแม่เหล็กห่างจากแมกนิตอมิเตอร์มารวมคิดด้วย เราต้องคิดดังนี้ ขั้นต้นสมมุติว่าแท่งแม่เหล็กทั้งสองทำให้เข็มแมกนิตอมิเตอร์หันเป็นมุมเท่ากันดังก่อน เมื่อเป็นเช่นนี้แปลว่าแรงที่แท่งแม่เหล็กทั้งสองส่งมาถึงปลายเข็มแมกนิตอมิเตอร์นั้นแรงเท่ากันทั้งสองแท่ง ดังนั้นแท่งไหนอยู่ใกล้จากแมกนิตอมิเตอร์แท่งนั้นก็แรงกว่า และจะแรงเป็นกี่เท่าของกัน เราต้องคิดถอยหลังไปตามส่วนของระยะทางกำลังสอง แต่ที่จริงจะคิดง่าย ๆ เช่นนี้ไม่ได้ เพราะแรงที่ส่งมาถึงปลายเข็มแมกนิตอมิเตอร์ไม่ได้มาจากปลายเดียวของแท่งแม่เหล็ก ส่งมาจากขั้วทั้งสองของแท่งแม่เหล็ก เมื่อหักกันแล้วจึงเหลือเป็นแรงที่ปลายเข็มแมกนิตอมิเตอร์ได้รับ ฉะนั้นเราต้องคิดให้ละเอียดกว่าเอาระยะทางกำลังสองมาคูณเฉย ๆ.

วิธีคิดหักผลลัพธ์ของแรงที่ขั้วเหนือขั้วใต้ ของแท่งแม่เหล็กส่งไปยังจุดแห่งหนึ่งนอกแท่ง จำเป็นต้องรู้ด้วยว่าจุดนั้นอยู่ในแนวไหนของแท่ง และมีเรื่องต่างกัน ๓ อย่าง.—

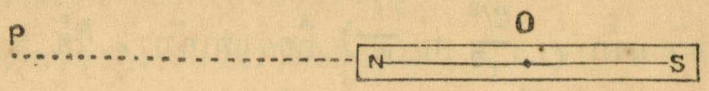
(๑) จุดนอกแท่งนั้นอยู่ในแนวแกนของแท่งแม่เหล็ก.

(๒) จุดนอกแท่งนั้นอยู่ในแนวศูนย์สูตรของแท่งแม่เหล็ก.

(๓) จุดนอกแท่งนั้นอยู่ทั่วไป.

(๑) ถ้าจุดที่แท่งแม่เหล็กส่งแรงไปถึง อยู่ในแนวแกนของแท่ง ดังเช่นที่ปลายเข็มแมกนิตอมิเตอร์ได้รับแรงจากแท่งที่วางอยู่ในแนวตะวันออกตะวันตก เราคำนวณผลลัพธ์ได้ง่ายโดยเอาแรงจากขั้วเหนือขั้วใต้ลบ

กัน เพราะแรงจากขั้วทั้งสองออกแรงในทางเดียวกันเป็นแต่ทิศต่างกันเท่านั้น.



รูป ๒๑

สมมุติให้ NS เป็นแท่งแม่เหล็กมีส่วนยาว $2l$

ให้ m เป็นจำนวนหน่วยขั้วที่ปลายแท่งแม่เหล็ก

ให้ O เป็นจุดศูนย์กลางของแท่งแม่เหล็ก

ให้ P เป็นจุดนอกแท่งและอยู่บนแนวแกนของแท่งแม่เหล็ก

ให้ OP $= r$

NP $= r - l$

SP $= r + l$

แรงที่ขั้ว N ส่งไปถึง P $= \frac{m}{(NP)^2}$

$= \frac{m}{(r-l)^2}$ ในทิศ OP

แรงที่ขั้ว S ส่งไปถึง P $= \frac{m}{(SP)^2}$

$= \frac{m}{(r+l)^2}$ ในทิศ PO

สมมุติว่าแรงที่ขั้ว N และขั้ว S ส่งไปถึง P เมื่อหักกันแล้วเหลือ R

$$R = \frac{m}{(r-l)^2} - \frac{m}{(r+l)^2} \quad \text{ในทิศ OP}$$

$$= \frac{m\,(4rl)}{r^4 - 2r^2l^2 + l^4}$$

$$= \frac{m\,(4rl)}{r^4\left(1 - \frac{2l^2}{r^2} + \frac{l^4}{r^4}\right)}$$

ถ้าระยะ r ยาวกว่าระยะ l มาก จำนวน $\frac{l}{r}$ เป็นจำนวนน้อย ยิ่งมีกำลังด้วย ยิ่งเป็นจำนวนน้อยมาก ถึงจะตัดทิ้งเสียก็ไม่ทำให้ผลลัพธ์ผิดไปมาก.

ฉะนั้นถ้า r ยาวกว่า l มาก $(1-\frac{2l^2}{r^2}+\frac{l^4}{r^4})$ ถือว่าเท่ากับ ๑ ได้.

เราจึงให้ $R = \frac{m\,(4r/)}{r^4}$ ได้.

$$= \frac{4\,m\,l}{r3}$$

$$= \frac{2M}{r^3}$$

(๒) ถ้าจุดที่แท่งแม่เหล็กส่งแรงไปถึงอยู่ในแนวศูนย์สูตรของแท่ง เราคำนวณแรงลัพธ์โดยเอาแรงจากขั้วเหนือขั้วใต้ลบกันโดยตรงไม่ได้ เพราะแรงจากขั้วทั้งสองออกแรงคนละทางและคนละทิศกัน ต้องคิดแก้ให้แรงทั้งสองอยู่ในทางเดียวกันเสียก่อน แล้วจึงจะบวกหรือลบกันได้.

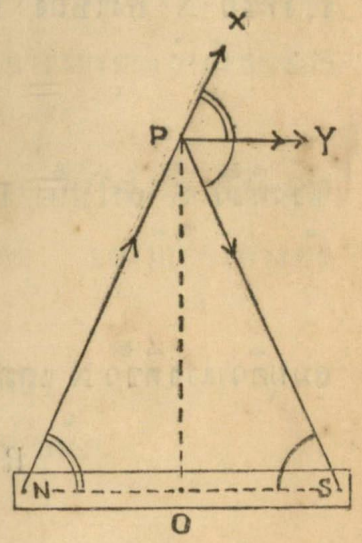
สมมุติให้ NS เป็นแท่งแม่เหล็กมีส่วนยาว $2l$

ให้ m เป็นจำนวนหน่วยขั้วที่ปลายแท่งแม่เหล็ก

ให้ O เป็นจุดศูนย์กลางของแท่งแม่เหล็ก

ให้ P เป็นจุดนอกแท่งและอยู่ในแนวศูนย์สูตรของแท่งแม่เหล็ก

ให้ OP เท่ากับ r



รูป ๒๒

แรงที่ขั้ว N ส่งไปถึง P $= \frac{m}{(NP)^2}$

$= \frac{m}{(r^2+l^2)}$ ในทิศ NP

แรงที่ขั้ว S ส่งไปถึง P $= \frac{m}{(SP)^2}$

$= \frac{m}{(r^2+l^2)}$ ในทิศ PS

หอสมุดแห่งชาติ

ฉะนั้นแรงที่ขั้วทั้งสองส่งไปถึง P เป็นจำนวนเท่ากัน แต่ทางและทิศต่างกัน ตามเมแคนิคส์ เมื่อแรงสองแรงซึ่งมีกำลังเท่ากันแย้งกัน แรงร่วมจะอยู่ในแนวเส้นแบ่งมุมระหว่างแนวที่แรงทั้งสองออกแรง

ในเรื่องนี้ของเราแรงร่วมอยู่ในแนว PY ซึ่งเป็นเส้นแบ่งมุมของมุม XPS และตามเรขาคณิตจะเห็นได้ทันทีว่า PY ขนานกับ NS แรงตามแนว NP เมื่อโน้มไปตามแนว PY คงมีค่าเพียง cos XPY ของแรงเดิมหรือ cos PNO ของแรงเดิม เช่นเดียวกัน แรงตามแนว PS เมื่อโน้มไปตามแนว PY คงมีค่าเพียง cos SPY ของแรงเดิม หรือ cos PSO ของแรงเดิม

ฉะนั้นถ้าแรงร่วมที่จุด P เท่ากับ R

$$R = \left(\frac{m}{NP^2}\right) \cos PNO + \left(\frac{m}{SP^2}\right) \cos PSO \quad (\text{ในทิศ PY})$$

$$= \left\{ \frac{m}{(r^2+l^2)} \times \frac{ON}{NP} \right\} + \left\{ \frac{m}{(r^2+l^2)} \times \frac{OS}{SP} \right\}$$

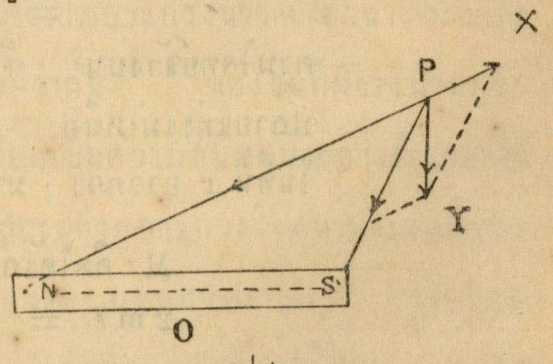
$$= \left\{ \frac{m}{(r^2+l^2)} \times \sqrt{\frac{l}{r^2+l^2}} \right\} + \left\{ \frac{m}{(r^2+l^2)} \times \sqrt{\frac{l}{r^2+l^2}} \right\}$$

$$= \frac{2\,m\,l}{(r^2+l^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$= \frac{M}{(r^2+l^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$= \frac{M}{r^3} \quad (\text{ถ้า } r \text{ ยาวกว่า } l \text{ มาก})$$

(๓) ถ้าจุดที่แท่งแม่เหล็กส่งแรงไปถึงอยู่ทั่วไป ก็คงคำนวณแรงผลลัพธ์ได้ดังเช่นในรูปต่อไปนี้ แรงร่วมอยู่ในแนว PY แต่ต้องอาศัยเรขาคณิตและตรีโกณมิติมากกว่านี้ จึงของดไว้ไม่กล่าวถึง.



รูป ๒๓

หมายเหตุ เมื่อเอาแท่งแม่เหล็กลองกบแมกนิตอมิเตอร์ และวัดมุมที่เข็มหันกับระยะที่วางแท่งแม่เหล็กห่างจากแมกนิตอมิเตอร์ให้รู้ เราย่อมคำนวณแมคเนติกโมเมนต์ของแม่เหล็กแท่งนั้นได้ เช่นแท่งแม่เหล็กวางตามแนวตะวันตกตะวันออก จุดศูนย์กลางของแท่งห่างจากแมกนิตอมิเตอร์เป็นระยะ r เข็มแมกนิตอมิเตอร์หันเบนมุม A จากมุมที่เข็มหันเรารู้ทันทีว่า แรง F ที่แท่งแม่เหล็กส่งไปถึงปลายเข็ม เท่ากับ H tan A

จากระยะระหว่างแท่งกับแมกนิตอมิเตอร์ เราก็รู้ทันทีว่า แรง F ที่แท่งแม่เหล็กส่งไปถึงปลายเข็ม เท่ากับ $\frac{2M}{r^3}$

ดังนั้น $\frac{2M}{r^3} = H \tan A$ หรือ $M = \frac{1}{2} Hr^3 \tan A$

ถ้าเรารู้ส่วนยาวของแท่งแม่เหล็กด้วย ยิ่งคำนวณได้ละเอียดยิ่งขึ้น หน่วยขั้วของแท่งก็คำนวณได้ เช่นสมมุติว่าแท่งยาว $2l$ ก็คำนวณหน่วยขั้วได้จาก $M = 2ml$

ตัวอย่าง.— แม่เหล็กแท่งหนึ่งวางในแนวตะวันตกตะวันออก จุดศูนย์กลางของแท่งห่างจากแมกนิตอมิเตอร์ ๒๐ ซม. เข็มแมกนิตอมิเตอร์หัน ๔๕° ให้คำนวณแมกเนติคโมเมนต์ของแม่เหล็กแท่งนั้น (H = .๑๘ เกาส์ส)

$$\frac{2M}{r^3} = H \times \tan 45^\circ$$

$$M = \tfrac{1}{2} \times .18 \times 20^3 \times 1$$

$$= 720$$

ตามโจทย์ข้างบน ถ้าแม่เหล็กยาว ๒ ซม. ให้คำนวณหน่วยขั้วที่ปลายแท่งแม่เหล็ก.

ในที่นี้ r ยาวกว่า l มากเราคงถือว่า $F = \frac{2M}{r^3}$ ได้อย่างข้างบน.

M คิดได้แล้วเท่ากับ 720

$2ml = M$

$m = 360$

ตามโจทย์ข้างบน ถ้าแม่เหล็กยาว ๑๐ ซม. ให้คำนวณหน่วยขั้วที่ปลายแท่งแม่เหล็ก.

ในที่นี้แม่เหล็กยาวพอดู เราต้องใช้สูตรเต็มบริบูรณ์.

$$F = \frac{4\,mrl}{(r^2 - l^2)^2}$$

$$\frac{4\,mrl}{(r^2 - l^2)^2} = H.\tan A$$

$$\frac{4m \times 20 \times 5}{(20^2 - 5^2)^2} = .18 \times 1$$

$$m = \frac{.18\,(400-25)^2}{4 \times 20 \times 5}$$

$$= \frac{.18 \times 375 \times 375}{4 \times 20 \times 5}$$

$$= \frac{.18 \times 75 \times 75}{4 \times 4}$$

$$= 63.28$$

๑๖. **แมกนิตอมิเตอร์ชะนิดแกว่ง** (vibration magnetometer) ทำด้วยแท่งแม่เหล็กธรรมดามีสายไหมเล็ก ๆ ผูกตรงกลางและแขวนไว้ให้นิ่งตามนอนหรือจะใช้เข็มทิศที่ดัดเป็นพิเศษก็ได้ เอาแม่เหล็กที่จะเปรียบเทียบว่าอันไหนแรงกว่าอันไหนมาจ่อใกล้ ๆ ปลายแมกนิตอมิเตอร์ ๆ จะส่ายไปมาประเดี๋ยวหนึ่ง แล้วก็หยุดนิ่งอย่างเดิม เราต้องนับให้รู้ว่าแมกนิตอมิเตอร์แกว่งนาทีหรือวินาทีละกี่ครั้ง แม่เหล็กแท่งไหนทำให้แมกนิตอมิเตอร์แกว่งเร็วกว่ากัน แท่งนั้นก็มีแรงมากกว่า ในเรื่องเช่นนี้เราจะใช้แท่งแม่เหล็กที่จะเปรียบเทียบเป็นตัวแมกนิตอมิเตอร์เสียเองก็ได้ เอาด้ายผูกกลางแท่งแขวนให้แกว่ง แต่ทั้งสองแท่งต้องแกว่งในสนามแม่เหล็กอันเดียวกัน เช่นปล่อยให้แกว่งโดยลำพังในสนามแม่เหล็กของโลก แท่งไหนแกว่งได้เร็วกว่า แท่งนั้นก็มีแรงมากกว่า (กลเม็ดในการเปรียบเทียบแรงแม่เหล็ก

โดยวิธีนี้มีเรื่องที่ต้องระวังหลายอย่าง เช่นต้องปล่อยให้แมกนิตอมิเตอร์นิ่งในแนวทิศเหนือทิศใต้เสียก่อน ขณะที่ทดลองแกว่งต้องไม่ให้มีแม่เหล็กแท่งอื่นอยู่ใกล้ สายไหมที่ใช้ผูกต้องไม่คลายเกลียวได้ ฯลฯ).

การแกว่งของแมกนิตอมิเตอร์จะเร็วหรือช้ามีข้อเกี่ยวข้องด้วยดังต่อไปนี้.—

ก. **ถ้าอยู่ในสนามแม่เหล็กเดียวกัน** แมกนิตอมิเตอร์ที่มีแรงบิดสายมากกว่าจะแกว่งได้เร็วกว่า และทดลองให้เห็นจริงได้โดยเอาแท่งเหล็กเล็ก ๆ ยาว ๆ เช่นเข็มสำหรับถักร้อยถูกับแม่เหล็ก ๒—๓ ครั้งพอเป็นแม่เหล็กแต่เล็กน้อย เอาสายไหมผูกตรงกลางแล้วปล่อยให้แกว่งและนับจำนวนแกว่งดู นับให้รู้ว่าแกว่งได้นาทีละกี่ครั้งแล้วจำไว้ เอาแม่เหล็กมาถูใหม่เพื่อให้มีแรงแม่เหล็กมากขึ้น แล้วเอาไปแขวนแกว่งดูอีก คราวนี้จะแกว่งได้เร็วกว่าคราวก่อน.

ข. **ถ้าความเข้มของแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กมากขึ้น** แมกนิตอมิเตอร์จะแกว่งเร็วเข้า และทดลองให้เห็นจริงได้โดยขั้นต้นปล่อยให้แมกนิตอมิเตอร์แกว่งในสนามของแม่เหล็กของโลกโดยลำพัง ระวังอย่าให้มีแม่เหล็กอื่นอยู่ใกล้ นับให้รู้ว่าแกว่งได้นาทีละกี่ครั้ง ต่อมาลองเอาแม่เหล็กอื่นเข้าใกล้แมกนิตอมิเตอร์ และระวังวางแท่งแม่เหล็กให้ได้แรงเสริมกับแรงของโลก คือวางแท่งแม่เหล็กในแนวเหนือใต้ และถ้าวางอยู่ทางทิศเหนือของแมกนิตอมิเตอร์ ต้องวางแท่งแม่เหล็กเอาขั้วใต้ชี้มายังแมกนิตอมิเตอร์ เพราะแรงแม่เหล็กของโลกที่ส่งมาจากเหนือเป็นชะนิดแรงใต้ คราวนี้นับจำนวนแกว่งดูใหม่ แมกนิตอมิเตอร์จะแกว่งเร็วขึ้น ถ้าแท่งแม่เหล็กวางอยู่ทางทิศเหนือของแมกนิตอมิเตอร์และหันขั้วเหนือชี้มายังแมกนิตอมิเตอร์ แท่งแม่เหล็กก็ส่งแรงชะนิดเหนือ

มายังแมกนิตอมิเตอร์เป็นส่วนมาก แรงที่ส่งมานี้ขัดกับแรงชะนิดใด้ที่โลกส่งมา แมกนิตอมิเตอร์จะแกว่งช้าเข้า จงทดลองดูจะเห็นจริง บางคราวแรงชะนิดเหนือที่แท่งแม่เหล็กส่งมามากกว่าแรงชะนิดใด้ที่โลกส่งมาเสียด้วยซ้ำ เลยฆ่าแรงของโลกหมด คงเหลือเป็นแรงชะนิดเหนือ และเมื่อเป็นเช่นนี้เข็มแมกนิตอมิเตอร์ก็คงแกว่งได้เหมือนกัน แต่ก่อนแกว่ง เข็มแมกนิตอมิเตอร์จะหมุนกลับหลังเอาปลายใต้ชี้กลับขึ้นทางทิศเหนือแล้วจึงแกว่ง.

ค. แมกนิตอมิเตอร์จะแกว่งได้เร็วหรือช้าเกี่ยวกับโมเมนต์ออฟอิเนอร์เชีย (moment of inertia) ความอุ้ยอ้ายของแท่งแมกนิตอมิเตอร์ ถ้ามีความอุ้ยอ้ายมากก็แกว่งช้า น้อยก็แกว่งเร็ว ลองหาแท่งแม่เหล็กสองแท่งที่มีแรงเท่ากัน แท่งหนึ่งเล็กยาว แท่งหนึ่งอ้วนสั้น เอาสายไหนผูกตรงกลางลองแกว่งดู จะแกว่งได้เร็วไม่เหมือนกัน.

ดังนี้ถ้าเราสมมุติให้ H เป็นความเข้มในสนามแม่เหล็กตรงจุดที่แกว่งแท่งแม่เหล็ก

M เป็นแมกเนติคโมเมนต์ของแท่งแม่เหล็กที่แกว่ง

I เป็นโมเมนต์ออฟอิเนอร์เชียของแท่งแม่เหล็กที่แกว่ง

n เป็นจำนวนแกว่งในเวลาจำกัด (๑ วินาฑีหรือ ๑ นาฑี).

เราจะเห็นได้ทันทีว่าจำนวนแกว่งได้ส่วนโดยตรงกับความเข้ม.

จำนวนแกว่งได้ส่วนโดยตรงกับแมกเนติคโมเมนต์.

จำนวนแกว่งได้ส่วนตรงกันข้ามกับโมเมนต์ออฟอิเนอร์เชีย.

คือ $n \propto H$

$n \propto M$

$n \propto \frac{1}{I}$

รวมทั้งหมด $n \propto \frac{HM}{I}$

หรือ $HM \propto nl$

หรือ $HM = knl$ (k เป็นคอนสแตนต์)

สูตรที่ใช้กันจริง ๆ เขียนว่า $HM = 4\pi^2 n^2 I$

คอนสแตนต์เท่ากับ $4\pi^2$ นั้นเขาได้มาอย่างไร และทำไมจึงเป็น n กำลังสอง นักเรียนอย่าพึงสนใจเลย จำไว้แต่ว่าได้มาโดยการทดลอง หรือจากสูตรคล้ายกันกับการหาจำนวนแกว่งของลูกตุ้มในวิชชาเมคานิคส์.

เพียงแค่นี้ นักเรียนจงจำไว้ให้ได้แต่ว่าสูตรสำหรับแมกนิตอมิเตอร์ชะนิดแกว่งมีว่า $HM = 4\pi^2 n^2 I$ เพราะสูตรนี้มีประโยชน์และที่ใช้มาก จะใช้เทียบหรือวัดความเข้มในสนามแม่เหล็กก็ได้ ใช้เทียบหรือวัดแรงแม่เหล็กก็ได้.

ก. **วิธีเทียบแมกเนติคโมเมนต์** ถ้าเราใคร่จะเทียบแมกเนติคโมเมนต์ของแม่เหล็กสองแท่ง ลองเอาแท่งแม่เหล็กแขวนในที่ ๆ ไม่มีแม่เหล็กอื่นอยู่ใกล้คราวละแท่ง ปล่อยให้แกว่งแล้วนับดูให้รู้ว่าแกว่งนาทีละกี่ครั้ง.

ในที่นี้ให้ H เป็นความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลกณจุดที่แท่งแม่เหล็กแกว่ง

M_1 เป็นแมกเนติคโมเมนต์ของแท่งที่หนึ่ง.

I_1 เป็นโมเมนต์ออฟอิเนอร์เชียของแท่งที่หนึ่ง.

n_1 เป็นจำนวนแกว่งของแท่งที่หนึ่ง.

M_2 เป็นแมกเนติคโมเมนต์ของแท่งที่สอง.

I_2 เป็นโมเมนต์ออฟอิเนอร์เชียของแท่งที่สอง.

ให้ n_2 เป็นจำนวนแกว่งของแท่งที่สอง.

จากสูตรเราเขียนสมการได้ทันทีว่า.

$$HM_1 = 4\pi^2 n_1^2 I_1$$

$$HM_2 = 4\pi^2 n_2^2 I_2$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2 I_1}{n_2^2 I_2}$$

ถ้า I_1 กับ I_2 มีค่าไล่เลี่ยกันก็ฆ่ากันได้.

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$$

แต่ถ้าโมเมนต์ออฟอิเนอร์เชียของแท่งทั้งสองไม่เท่ากัน เราต้องคิดหาค่าโมเมนต์ออฟอิเนอร์เชียให้ได้จากสูตรต่อไปนี้.—

(๑) ถ้าเป็นแท่งกลม m เป็นน้ำหนักของแท่ง l เป็นส่วนยาว

a เป็นเส้นผ่าศูนย์กลาง.

$$I = m\left\{\frac{l^2}{12} + \frac{a^2}{16}\right\}$$

(๒) ถ้าเป็นแท่งเหลี่ยม m เป็นน้ำหนักของแท่ง l เป็นส่วนยาว

b เป็นส่วนกว้างด้านสะกัด.

$$I = m\left\{\frac{l^2 + b^2}{12}\right\}$$

ข. วิธีเทียบความเข้ม ถ้าเราใคร่จะเทียบความเข้มของแรงแม่เหล็กในสนามหรือแรงแม่เหล็กตามจุดต่าง ๆ ที่แม่เหล็กแท่งเดียวกัน หรือต่างแท่งส่งไปถึง เราลองเอาแมกนิตอมิเตอร์อันเดียวกันไปวางให้แกว่งในที่ต่าง ๆ แล้วนับจำนวนแกว่งให้รู้.

สมมุติว่า H_1 เป็นความเข้มของแรงแม่เหล็กที่จุดแห่งหนึ่งซึ่งได้รับแรงจากแม่เหล็กแท่งที่ ๑

H_2 เป็นความเข้มของแรงแม่เหล็กที่จุดแห่งหนึ่งซึ่งได้รับแรงจากแม่เหล็กแท่งที่ ๒

M เป็นแมกเนติคโมเมนต์ของแมกนิตอมิเตอร์

I เป็นโมเมนต์ออฟอิเนอร์เชียของแมกนิตอมิเตอร์

n_1 เป็นจำนวนแกว่งของแมกนิตอมิเตอร์ที่จุดที่ ๑

n_2 เป็นจำนวนแกว่งของแมกนิตอมิเตอร์ที่จุดที่ ๒

จากสูตรเราเทียบสมการได้ทันทีว่า

$$H_1 M = 4 \pi^2 n_1^2 I$$

$$H_2 M = 4 \pi^2 n_2^2 I$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$$

คือความเข้มได้ส่วนตามจำนวนแกว่งกำลังสอง

ตามที่คิดให้ดูนี้ ถ้าจะพูดกันให้ถูกแท้ยังผิดอยู่ ผิดตรงที่เราหมายแรงแม่เหล็กของโลกไม่พ้น H_1 ในที่นี้ไม่ใช่แรงแม่เหล็กที่แม่เหล็กแท่งที่หนึ่งส่งมาอย่างเดียว แต่เป็นแรงร่วมระหว่างแรงแม่เหล็กของโลกกับแรงแม่เหล็กที่แม่เหล็กแท่งที่หนึ่งส่งมา H_2 ก็เช่นเดียวกัน เป็นแรงร่วมระหว่างแรงแม่เหล็กของโลกกับแรงแม่เหล็กที่แม่เหล็กแท่งที่สองส่งมา เพราะฉะนั้นอัตราส่วนระหว่าง n_1^2 กับ n_2^2 ไม่ใช่อัตราส่วนระหว่างแรงแม่เหล็กของแท่งที่หนึ่งกับแท่งที่สองแท้ และถ้าใครจะได้อัตราส่วนที่ถูกแท้ เราต้องหักแรงแม่เหล็กของโลกออกเสียก่อน แล้วจึงเทียบอัตราส่วนกันได้ เรื่องนี้เราไม่มีวิธีทดลองได้โดยตรง แต่เราคำนวณเอาได้ดังนี้.—

สมมุติว่า H เป็นแรงแม่เหล็กของโลก และเมื่อแมกนิตอมิเตอร์แกว่งอยู่ในสนามแม่เหล็กของโลกอย่างเดียว คือไม่มีแม่เหล็กอื่นอยู่ใกล้ แมกนิตอมิเตอร์แกว่งนาทีละ n ครั้ง คราวนี้สมมุติว่ามีแม่เหล็กอื่นอยู่ใกล้ด้วยและส่งแรงมาถึงแมกนิตอมิเตอร์ H_1 ฉะนั้นรวมกับแรงของโลกด้วยเป็น $(H + H_1)$ และแมกตอมิเตอร์แกว่งนาทีละ x ครั้ง.

เราเทียบจำนวนแกว่งกับความเข้มของแรงแม่เหล็กที่ส่งมาถึงแมกนิตอมิเตอร์ได้ดังนี้.-

$$\frac{x^2}{n^2} = \frac{H + H_1}{H} = 1 + \frac{H_1}{H}$$

ส่วนจำนวนแกว่งของแมกนิตอมิเตอร์ในสนามของแท่งแม่เหล็กอื่นอย่างเดียวเรารู้ไม่ได้ แต่ลองสมมุติให้เป็นนาทีละ n_1 ครั้งไปพลางก่อน.

ถ้าเช่นนั้นจริง $\frac{H_1}{H} = \frac{n_1^2}{n^2}$

ฉะนั้นที่เราคิดไว้เมื่อตะกี้นว่า $\frac{x^2}{n^2} = 1 + \frac{H_1}{H}$ ก็กลายเป็น $\frac{x^2}{n^2} = 1 + \frac{n_1^2}{n^2}$

คือ $$x^2 = n^2 + n_1^2$$

หรือ $$n_1^2 = x^2 - n^2$$

n กับ x เราวัดรู้ได้จากการทดลอง ฉะนั้นเราคำนวณ n_1 ได้.

เมื่อเรารู้ค่าของ n_1 แล้ว เราคำนวณอัตราส่วนระหว่าง H_1 กับ H ได้ และเมื่อเรารู้ค่าของ H ว่ากี่เกาส์ส เราเลยหาค่าของ H_1 ได้ว่ากี่เกาส์สด้วย

ตัวอย่าง.– (๑) ในสนามแม่เหล็กแห่งหนึ่งแมกนิตอมิเตอร์แกว่งนาฑีละ ๒๐ ครั้ง และในสนามแม่เหล็กอีกแห่งหนึ่งแมกนิตอมิเตอร์อันนั้นแกว่งนาฑีละ ๘ ครั้ง ให้เทียบความเข้มของแรงแม่เหล็กในสนามทั้งสอง.

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{20^2}{8^2} = \frac{25}{4}$$

$$H_1 : H_2 = 6.25 : 1$$

(๒) แม่เหล็กแท่งหนึ่งเมื่อแขวนอยู่โดยลำพังแกว่งนาฑีละ ๘ ครั้ง ครั้นเอาแม่เหล็กอื่นเข้าใกล้แกว่งนาฑีละ ๑๐ ครั้ง ถามว่า

(ก) แม่เหล็กอื่นส่งแรงมาเป็นกี่เท่าของแรงโลก.

(ข) ถ้ามีแต่แม่เหล็กอื่นอย่างเดียว แรงแม่เหล็กของโลกไม่มีจะแกว่งนาฑีละกี่ครั้ง.

(ค) ถ้ากลับปลายแม่เหล็กแท่งอื่นเสีย จะแกว่งนาฑีละกี่ครั้ง

(ก)
$$\frac{H + H_1}{H} = \frac{10^2}{8^2} = \frac{25}{16}$$
$$H = 16$$
$$H_1 = 9$$

แม่เหล็กส่งแรงมา $\frac{9}{16}$ เท่าของแรงโลก.

(ข)
$$n_1^2 = x^2 - n^2$$
$$= 10^2 - 8^2$$
$$= 36$$
$$n_1 = 6$$

(ค) ถ้ากลับปลายแท่งแม่เหล็กเสีย แรงที่ส่งมาถึงแท่งที่แกว่งคงเหลือ

เพียง $H - H_1$

ตามโจทย์ $$\frac{H + H_1}{H} = \frac{10^2}{8^2} \quad (๑)$$

สมมุติว่าเมื่อความเข้มเหลือ $H - H_1$ จำนวนแกว่งเท่ากับ n

ถ้าเช่นนั้น $$\frac{H - H_1}{H} = \frac{n^2}{8^2} \quad (๒)$$

จากสมการ (๑) $$\frac{H_1}{H} = \frac{10^2 - 8^2}{8^2}$$

จากสมการ (๒) $$-\frac{H_1}{H} = \frac{n^2 - 8^2}{8^2}$$

ฉะนั้น $$-\left(\frac{n^2 - 8^2}{8^2}\right) = \frac{10^2 - 8^2}{8^2}$$

$$-n^2 + 8^2 = 10^2 - 8^2$$

$$n^2 = 8^2 + 8^2 - 10^2$$

$$= 64 + 64 - 100$$

$$= 28$$

$$n = 5.29$$

๑๗. การเปรียบเทียบแมกเนติคโมเมนต์และหน่วยขั้วของปลายแท่งแม่เหล็ก เรื่องนี้มีวิธีทำหลายวิธีมาก แต่คงรวมอยู่ในเรื่องของ ตอร์ชันแบแลนซ และแมกนิตอมิเตอร์หมดแล้ว นักเรียนอ่านทวนเรื่องทั้งสองนี้ให้เข้าใจดี แล้วนำมาใช้เป็นเรื่องๆไป ดีกว่าที่จะให้หัวข้อใหม่.

ส่วนเรื่องเปรียบเทียบหน่วยขั้วก็ทำนองเดียวกัน หรือจะพูดว่าเป็นวิธีเดียวกันก็ไม่ผิด เรามักเทียบแมกเนติคโมเมนตร์เสียก่อน แล้วจึงคิดเทียบแตกเป็นหน่วยขั้วทีหลัง.

$$M_1 = 2\, m_1\, l_1$$
$$M_2 = 2\, m_2\, l_2$$
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_1\, l_2}{M_2\, l_1}$$

ต่อไปนี้จะให้โจทย์ตัวอย่างเกี่ยวกับการเทียบแมกเนติคโมเมนต์โดยอาศัยไวเบรติงแมกนิตอมิเตอร์ เพื่อนักเรียนจะได้จำวิธีคิดเป็นตัวอย่าง.

แมกนิตอมิเตอร์แกว่งอยู่โดยลำพังในสนามของโลกอย่างเดียวนาฬิกะ ๑๒ ครั้ง เมื่อเอาแม่เหล็กอื่นแท่งที่หนึ่งเข้าด่อ (ช่วยกับแรงของโลก) นาฬิกะ ๓๐ ครั้ง เมื่อเอาแม่เหล็กอื่นแท่งที่สองเข้าด่อ (ช่วยกับแรงโลกและห่างเท่าแท่งก่อน) นาฬิกะ ๔๐ ครั้ง ให้เทียบแมกเนติคโมเมนต์ของแม่เหล็กอื่นสองแท่งนั้น.

$$H : (H + H_1) : (H + H_2) = 12^2 : 30^2 : 40^2$$
$$= 36 : 225 : 400$$
$$\frac{H}{36} = \frac{H + H_1}{225} = \frac{H + H_2}{400}$$
$$\frac{H}{36} = \frac{H_1}{225 - 36} = \frac{H_2}{400 - 36}$$
$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{225 - 36}{400 - 36} = \frac{189}{364}$$

แต่ $\frac{H_1}{H_2} = \frac{M_1}{M_2}$

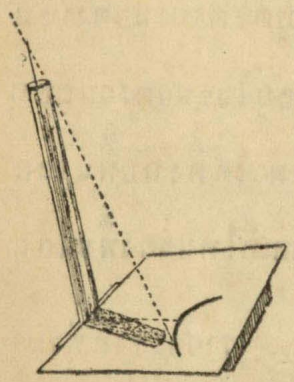
ฉะนั้น $\frac{M_1}{M_2} = \frac{189}{364} = \frac{1}{2}$ (ประมาณ)

๑๔. แม่เหล็กของโลก เรารู้กันอยู่แล้วว่าเวลาเอาเชือกผูกตรงกลางแท่งแม่เหล็กแล้วแขวนทิ้งไว้ แม่เหล็กจะหันอยู่ในแนวเหนือใต้และขั้วเหนือไปทางทิศเหนือเสมอเพราะฉะนั้นคงต้องมีแรงแม่เหล็กชะนิดเดียวกับที่ขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กปรากฏ

อยู่ทางเหนือของโลก และต้องมีแรงอย่างที่ขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กปรากฏอยู่ทางใต้ของโลก เรามักเดากันว่าโลกมีแกนเป็นแม่เหล็ก หรือไม่เช่นนั้นก็คงมีเส้นแรงแม่เหล็กจากอื่นซึมผ่านก้อนโลกตามแนวที่เข็มทิศชี้ เรื่องนี้เรายังไม่รู้จริง เช่นภายในพิภพของเรา ๆ ก็ยังไม่รู้จริงว่าเป็นอะไรแน่ มาสมัยนี้ออกจะเชื่อกันว่าใจกลางของพิภพเป็นก้อนเหล็กและทองขาวด้วน.

ตามพื้นโลกทั่วไปเป็นสนามแม่เหล็ก อำนาจแม่เหล็กซึมทั่วไปตลอด เวลาเอาแม่เหล็กวางบนไม้คอร์คลอยในน้ำ ไม้คอร์คจะหมุนรอบตัวจนแม่เหล็กตั้งตัวนิ่งอยู่ในแนวเหนือใต้ และไม้คอร์คไม่เคลื่อนที่พ้นที่เดิม ต้องเอาแม่เหล็กอื่นมาล่อให้ช่วยดูดหรือผลัก ไม้คอร์คจึงจะถอยเคลื่อนที่ได้ ที่เป็นเช่นนี้แสดงว่าแรงแม่เหล็กของโลกพุ่งมาถึงขั้วเหนือขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กเท่ากันทั้งสองขั้ว.

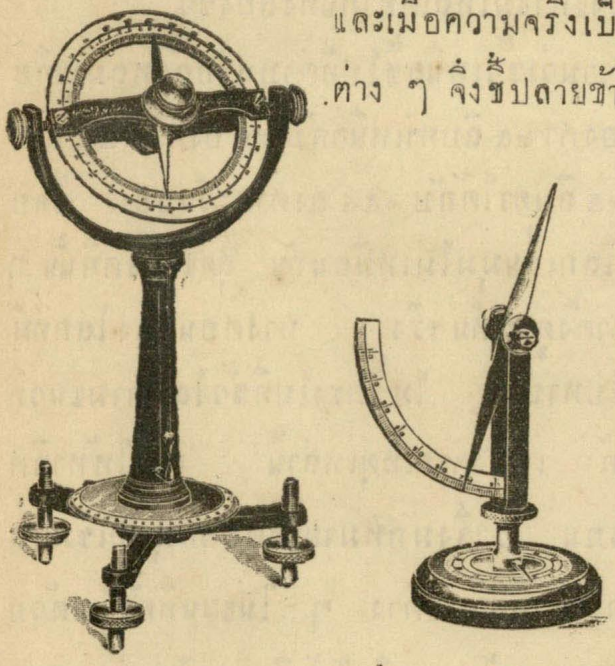
เข็มทิศไม่ชี้ตรงไปที่ขั้วโลก ได้ความว่าขั้วเหนือชี้ไปที่ตำบลใกล้แหลมบูเทียเฟลิคซ์ในประเทศแคนาดา ชี้ไปที่จุด ๗๐ องศา ๒๕ ลิบดาเหนือกับ ๙๖ องศา ๔๕ ลิบดาตะวันตก ส่วนขั้วใต้ชี้ไปที่ ๗๒ องศา ๒๕ ลิบดาใต้กับ ๑๕๔ องศาตะวันออก โดยเหตุนี้ณที่แห่งหนึ่ง ๆ เข็มทิศชี้เบนจากขั้วโลกเป็นมุมไม่เหมือนกัน สุดแล้วแต่ที่นั้น ๆ อยู่ตอนไหนของโลก ลองเอาลูกโลกมาตั้งดูจะเห็นจริง บางตอนของโลกที่มีแร่เหล็กอยู่ในพื้นดินมาก เข็มทิศจะชี้เฉไปหาบ้าง ไม่ชี้ตรงไปที่ขั้วโลกตามแนวที่แม่เหล็กควรจะชี้ไปแท้ เนื่องจากเหตุเหล่านี้ เพื่อให้หาทิศสำหรับเดินทางได้แน่นอน เราจึงมักหมายเหตุบอกมุมที่เข็มทิศเบนจากทิศเหนือบอกไว้ตามตำบลต่าง ๆ ในแผนที่ทั่วไปด้วย เมื่อเรายืนอยู่ที่ไหนและอยากรู้แนวเหนือใต้จริงของโลก (แนวเมริเดียนภูมิศาสตร์) เราต้องรู้มุมสำหรับแก้แนวเข็มทิศจากแผนที่ หรือมิฉะนั้นก็ต้องทดลองให้รู้โดยอาศัยหน้าปัทม์นาฬิกาแดด.



รูป ๒๕

เงาของนาฬิกาแดดเดิรตามรอยเป็นส่วนโค้ง เวลาเที่ยงวันปลายเงาอยู่ใกล้โคนหลักที่สุด และอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของส่วนโค้ง ลากเส้นตรงจากจุดกึ่งกลางของส่วนโค้งผ่านหลักนาฬิกาแดด เส้นที่ลากอยู่ในแนวเหนือใต้ของโลก.

แม่เหล็กที่แขวนอยู่ตามที่ต่าง ๆ ไม่นอนราบขนานกันกับแนวระดับนอนของพื้นที่ เพราะแรงแม่เหล็กจากขั้วทั้งสองของแม่เหล็กของโลกส่งมาที่เข็มทิศไม่เท่ากัน ตามตำบลตอนเหนือของโลกแรงจากเหนือส่งมาถึงแม่เหล็กหรือเข็มทิศได้มากกว่าจากใต้ ตามตำบลตอนใต้ของโลกแรงแม่เหล็กจากใต้ส่งมาได้มากกว่าเพราะระยะทางต่างกัน

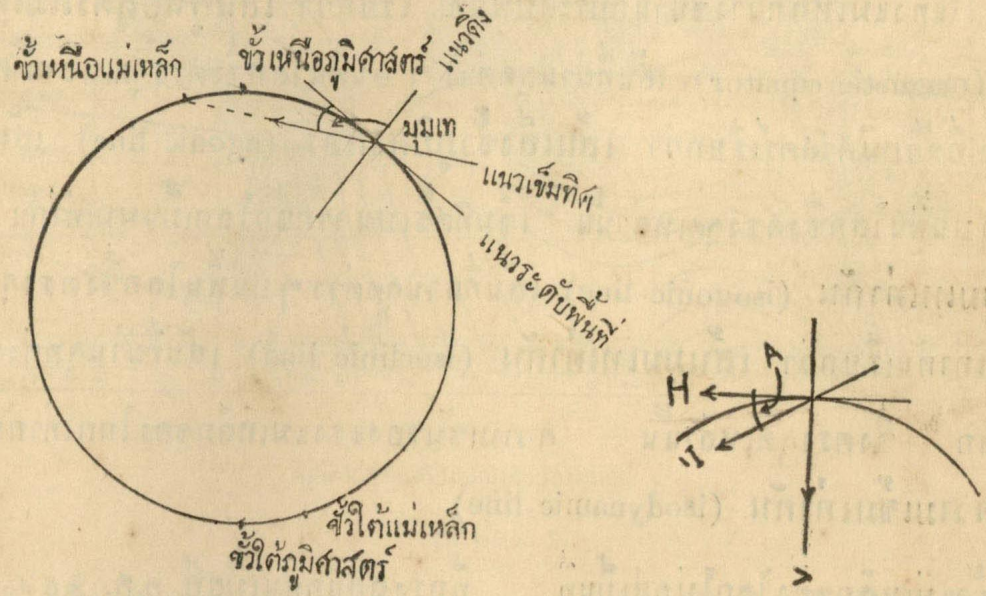


รูป ๒๖

และเมื่อความจริงเป็นเช่นนี้ แท่งแม่เหล็กที่แขวนอยู่ตามที่ต่าง ๆ จึงชี้ปลายข้างหนึ่งบ่ายดิน มุมที่แท่งแม่เหล็กชี้บ่ายดินวัดจากแนวระดับนอนของพื้นที่เรียกว่า มุมเท (dip angle หรือ inclination) วิธีวัดมุมเทตามที่ต่าง ๆ ต้องใช้เครื่องมือเรียกว่า เข็มเท (dip needle) คือเข็มทิศที่หมุนได้คล่องรอบตัวตามแนวตั้งเข็มทิศเช่นนี้ถ้าหันให้เข็มอยู่ในแนวตะวันออกตะวันตกเข็มจะบ่ายชี้พ้าได้ดิ่งกับพื้นโลกเสมอ ไม่ว่าจะวางอยู่ณที่ไหนของพื้นโลก

ความเข้มในสนามแม่เหล็กของโลกตามที่เราวัดกันได้ เราวัดแรงที่พุ่งมาขนานกับพื้นที่ณที่นั้น เพราะปรากฏดูเหมือนว่าถ้าเราไล่รอยตามแนวเข็มทิศตรงไปตามพื้นที่ดินตรงที่เรายืนอยู่ เราคงไปถึงขั้วแม่เหล็กของโลก ความจริงไม่ใช่เช่น

นั้น แนวพื้นที่ตรงที่เรายืนเป็นแต่เพียงพื้นแตนเจนต์กับผิวโลกต่างหาก ต้องเขียนรูปดูจึงจะเข้าใจความหมายที่พูดนี้ดีขึ้น ฉะนั้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งมาถึงแท่งแม่เหล็กของเราโดยตรงนั้นพุ่งมาตามแนวตามที่แท่งแม่เหล็กแขวนเอียงอยู่ และย่อมเป็นจำนวนแรงมากกว่าแรงที่เราวัดได้ โดยถือว่าขนานมากับพื้นที่ตรงที่เรายืนอยู่.



รูป ๒๗

ถ้าสมมุติให้ I เป็นแรงแม่เหล็กที่พุ่งมาโดยตรง

H เป็นแรงแม่เหล็กที่พุ่งมาขนานกับพื้นที่

V เป็นแรงแม่เหล็กที่พุ่งมาตามแนวดิ่งของพื้นโลกตรงที่เรายืน

A เป็นมุมเทตรงที่เรายืน

จากรูปจะเห็นได้ทันทีว่า $I^2 = H^2 + V^2$

$$H = I \cos A$$

$$V = I \sin A$$

$$V = H \tan A$$

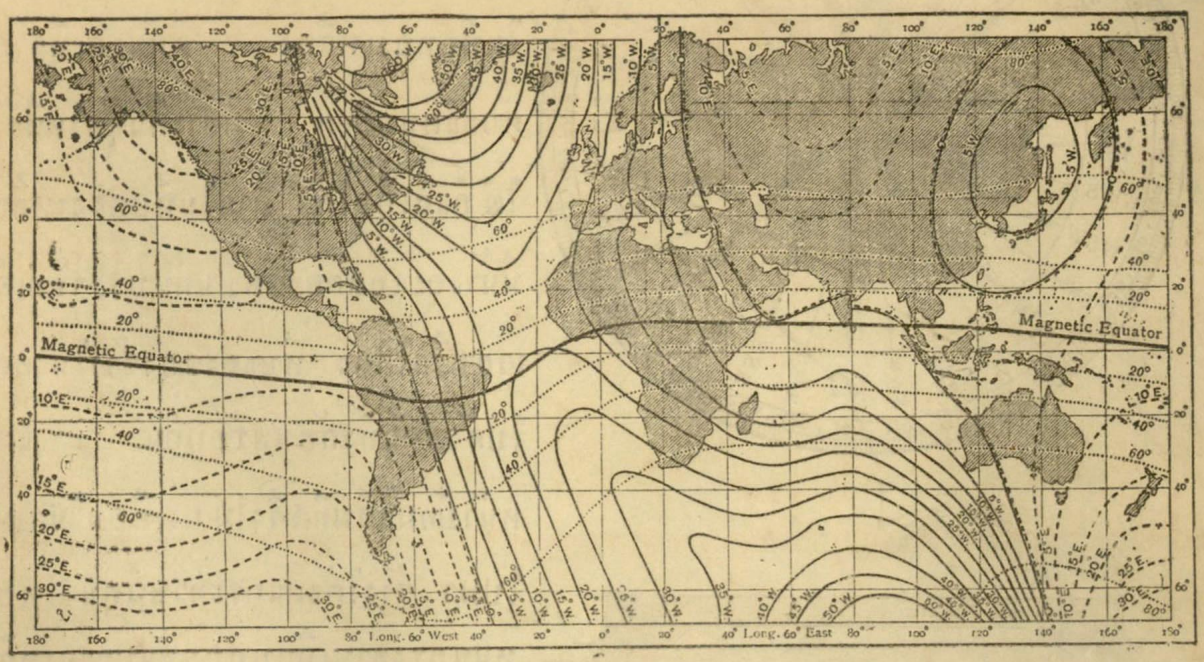
$$I = H \sec A$$

วงกลมที่ผ่านขั้วทั้งสองของแม่เหล็กของโลกเรียกว่า **เส้นแนวเมริเดียนแม่เหล็ก** (magnetic meridian) เส้นที่ผ่านจุดต่าง ๆ บนพื้นโลกซึ่งตรงจุดเหล่านั้นไม่มีมุมเท (แท่งแม่เหล็กวางขนานกับระดับพื้นที่) เรียกว่า **เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กของโลก** (magnetic equator) เส้นที่ผ่านจุดต่าง ๆ บนพื้นโลกซึ่งตรงจุดเหล่านั้นเข็มทิศชี้ตรงไปที่ขั้วภูมิศาสตร์เรียกว่า **เส้นเล็งขั้วภูมิศาสตร์** (agonic line) เส้นที่ผ่านจุดต่าง ๆ บนพื้นโลกซึ่งตรงจุดเหล่านั้น เข็มทิศชี้เบนจากขั้วโลกเป็นมุมเท่ากัน เรียกว่า **เส้นมุมเหเท่ากัน** (isogonic line) เส้นที่ผ่านจุดต่าง ๆ บนพื้นโลกซึ่งตรงจุดเหล่านั้นมุมเทเท่ากันเรียกว่า **เส้นมุมเทเท่ากัน** (isoclinic line) เส้นที่ผ่านจุดต่าง ๆ บนพื้นโลก ซึ่งตรงจุดเหล่านั้น ความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลกเท่ากันเรียกว่า **เส้นความเข้มเท่ากัน** (isodynamic line).

ขั้วแม่เหล็กของโลกไม่อยู่เป็นที่ ที่กรุงลอนดอนเมื่อปี ค.ศ. ๑๕๘๐ เข็มชี้ทิศชี้เหจากขั้วโลกไปทางตะวันออกเป็นมุม ๑๑ องศา ครั้น ค.ศ. ๑๖๕๗ เข็มทิศที่กรุงลอนดอนชี้ตรงไปที่ขั้วโลก แล้วต่อมาชี้เหไปทางทิศตะวันตกปีละน้อย จน ค.ศ. ๑๘๑๕ ชี้บัดไปทางตะวันตก ๒๕ องศา แต่นั้นมาค่อย ๆ บ่ายกลับมาทางทิศตะวันออกปีละราว ๕ ลิบดา เพียงทุกวันนี้ยังคงอยู่ทางทิศตะวันตกเป็นมุม ๑๖ องศา.

เนื่องจากเหตุที่ขั้วแม่เหล็กไม่อยู่กับที่นี้ ค่าของมุมเท มุมเห และความเข้มของแรงแม่เหล็กตามที่ต่าง ๆ จึงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และเปลี่ยนแปลง

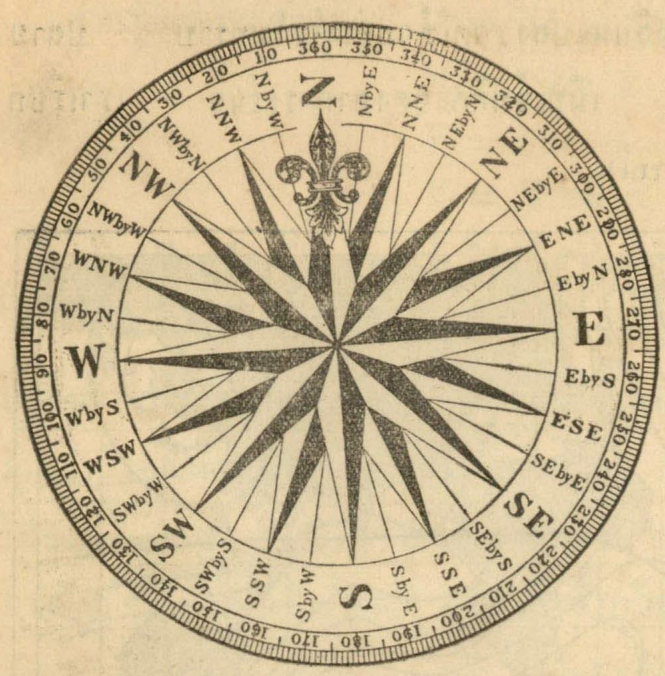
อยู่เสมอทุกวันทุกวินาที บางวันเปลี่ยนแปลงรวดเร็วอย่างไรไม่ทราบ ปลายเข็มทิศที่วางอยู่นิ่งกะเทือนสั่นไปมาได้ เมื่อเข็มทิศแสดงอาการเช่นนี้ เราเรียกว่า พายุแม่เหล็ก (magnetic storm).

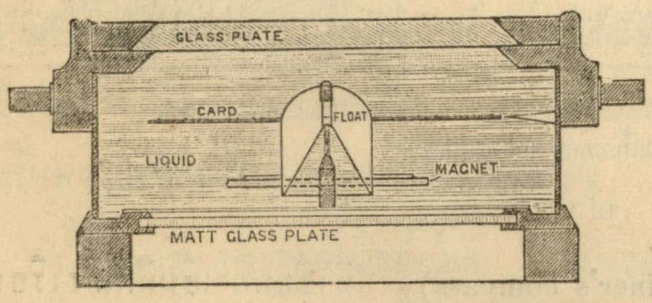


แผนที่แสดงเส้นบอกมุมเทและมุมเห

รูป ๒๘

๑๙. **เข็มทิศเดิรเรือ** (mariner's compass) ที่เรียกว่าเข็มทิศเดิรเรือก็คือเข็มทิศธรรมดา เว้นแต่ต้องการให้คล่อง แข็งแรงทนทาน และมีแผ่นกลมเป็นหน้าปัทม์บอกทิศต่าง ๆ ครบอย่างละเอียด แทนที่จะใช้แม่เหล็กแท่งเดียว ใช้หลาย ๆ แท่งตรึงกับแผ่นกระดาษแข็งและเรียงขนานกัน แผ่นกระดาษเป็นรูปวงกลม ตรงจุดศูนย์กลางฝังทับทิมสำหรับเสียบอยู่บนปลายแท่งเหล็กแหลม แผ่นกระดาษจะได้หมุนคล่องรอบตัว บนแผ่นกระดาษพิมพ์เป็นรูปแฉกต่าง ๆ สำหรับบอกทิศต่าง ๆ อย่างละเอียด ทั้งหมดบรรจุอยู่ในหีบฝากระจก เพื่อให้มองแลเห็นและเพื่อไม่ให้กระแสลมรบกวน.





รูป ๒๖

แต่เวลาใช้ในเรือ เมื่อเรือโคลง แผ่นกระดาษโคลงด้วย เกิดบกพร่องขึ้น ต่อมามีผู้คิดใหม่ เอาบรรจุในหีบทองเหลือง ที่ก้นและที่ฝากรุด้วยแผ่นกะจก กลางคืนจุดไฟที่ข้างใต้ก็แลเห็นได้ ภายในหีบทองเหลืองมีน้ำและแอลคอฮอลปนกันบรรจุอยู่เต็ม เวลาเรือโคลง หีบและของข้างในโคลงไปด้วยกันทั้งก้อนพร้อมกัน แผ่นหน้าบัทม์เข็มทิศจึงไม่กะเทือนโยกเยกไปมา ข้างใต้แผ่นกระดาษมีทุ่น พอดีหนุนกระดาษเกือบลอยพ้นปลายเหล็กแหลม เพื่อเพิ่มความคล่องที่จะหมุนรอบตัวได้ ที่ข้างหลังหีบมีขีดเส้นตรงเป็นเครื่องหมายแนวลำเรือด้วย เมื่อมองดูจะรู้ได้ทันทีว่าเวลานั้นเรืออยู่ในทิศไหน.

โจทย์แบบฝึกหัดแม่เหล็ก

๑. แม่เหล็ก ๒ ขั้วมีกำลัง ๓๐ กับ ๔๐ หน่วยขั้ว เมื่อวางห่างกัน ๕ ซม. จะเกิดแรงดึงหรือผลักกันเท่าไร?

๒. ขั้วแม่เหล็กคู่หนึ่งมีแรงดูดกัน ๓๕ ดายน์ และวางห่างกัน ๒ ซม. ถ้าขั้วหนึ่งมีกำลัง ๒๐ ขั้วหน่วย อีกขั้วหนึ่งจะมีกำลังเท่าไร?

๓. ขั้วแม่เหล็กคู่หนึ่งมีกำลังเท่ากัน เมื่อวางห่างกัน ๓ ซม. เกิดแรงผลัก ๒๕ ดายน์ ขั้วหนึ่งมีกำลังเท่าไร?

๔. แม่เหล็กขั้วหนึ่งมีกำลัง ๔๘ หน่วยขั้ว ให้คำนวณกำลังที่ขั้วนี้ส่งไปถึงยังจุดแห่งหนึ่งอยู่ไกลออกไป ๔ ซม.

๕. ขั้วแม่เหล็กคู่หนึ่งเมื่อวางห่างกัน ๓ ซม. เกิดแรงผลักกัน ๕๐ ดายน์ ถามว่าถ้าวางห่างกัน ๕ ซม. แรงผลักจะคงเป็นเท่าไร?

๖. ขั้วแม่เหล็ก ๓๒ หน่วยขั้วกับ ๔๘ หน่วยขั้วจะต้องวางห่างกันเท่าไรจึงจะเกิดแรงดูด ๒๔ ดายน์?

๗. ความเข้มที่จุดกึ่งกลางระหว่างขั้วทั้งสองในโจทย์ข้อ ๖ จะเป็นเท่าไร?

๘. กขค เป็นสามเหลี่ยมมุมฉาก กข = ขค = ๒๐ ซม. ที่ ก มีขั้วแม่เหล็ก ๓๒ หน่วยขั้ว ที่ ค มีขั้วแม่เหล็ก ๖๐ หน่วยขั้ว ให้หาความเข้มที่ ข.

๙. แม่เหล็กแท่งหนึ่ง ยาว ๒๐ ซม. มีพื้นที่รอยตัด ๕ ตาราง มม. มีกำลังขั้วละ ๑๐ หน่วยขั้ว ให้หาโมเมนต์และความเข้มของการเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กแท่งนั้น.

๑๐. แม่เหล็กแท่งหนึ่ง ยาว ๑๐ ซม. กว้าง ๑ ซม. หนา ๔ มม. และมีความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก ๕๐ หน่วย ให้หาโมเมนต์และกำลังที่ขั้วของแม่เหล็กแท่งนั้น.

๑๑. แท่งแม่เหล็กยาว ๑๖ ซม. และมีโมเมนต์ ๒๔๐ ให้คำนวณกำลังที่ส่งไปถึงจุดหนึ่งอยู่บนเส้นแกนและห่างจากจุดศูนย์กลางของแกน ๒๔ ซม.

๑๒. แท่งแม่เหล็กยาว ๘ ซม. และมีกำลังขั้วละ ๓๕ ให้หากำลังที่ส่งไปถึงจุดห่างจากจุดศูนย์กลางของแม่เหล็ก ๑๔ ซม. (๑) เมื่อจุดนั้นอยู่บนแนวแกนของแม่เหล็ก (๒) เมื่อจุดนั้นอยู่บนแนวตั้งฉากกับเส้นแกนที่จุดศูนย์กลาง.

๑๓. แม่เหล็กมีโมเมนต์ ๓๖๐ และมีกำลังขั้วละ ๔๕ ให้หาแรงดูดที่เกิดกับแม่เหล็กอีกขั้วหนึ่ง มีกำลัง ๑๐ หน่วยขั้ววางอยู่บนแนวแกนห่างจากจุดศูนย์กลางของแท่ง ๑๒ ซม.

๑๔. แม่เหล็กแท่งหนึ่งสั้นมากมีโมเมนต์ ๑๒๐ ให้คำนวณกำลังที่แม่เหล็กแท่งนี้ส่งไปถึงจุดบนแนวแกนห่างจากจุดศูนย์กลางของแท่ง ๒๓ ซม.

๑๕. แม่เหล็กแท่งสั้น ๆ มีโมเมนต์ ๑๒๘ และวางอยู่ในเมริเดียนแม่เหล็ก ให้หาความเข้มที่จุดทางทิศตะวันตกห่างจากจุดศูนย์กลางของแท่ง ๑๖ ซม.

๑๖. แท่งแม่เหล็กยาว ๑๐ ซม. และขั้วมีกำลังขั้วละ ๑๒ หน่วย ให้หาแรงคัปเบิลที่พอเหมาะผลักแม่เหล็กแท่งนี้ให้ตั้งได้ฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กในสนามมีความเข้ม ๐.๒ ดายน์.

๑๗. แท่งแม่เหล็กยาว ๘ ซม. มีกำลังขั้วละ ๒๐ หน่วย วางอยู่ในสนามแม่เหล็กมีความเข้ม ๐.๑๘ ดายน์ จะต้องใช้แรงคัปเบิลเท่าไรจึงจะพอเหมาะบิดแท่งแม่เหล็กให้เบี่ยนมุม ๓๐° กับเส้นแรงในสนาม ?

๑๘. แม่เหล็กมีโมเมนต์ ๒๔๐ แขวนอยู่ในเมริเดียนแม่เหล็ก ให้หาแรงคัปเบิลที่ทำให้แท่งบิดจากเมริเดียน ๓๐° ความเข้มในสนาม ๐.๒ ดายน์.

๑๙. แม่เหล็กแขวนอยู่ด้วยเส้นลวด เมื่อจะให้แม่เหล็กหันเบี่ยนมุม ๓๐° กับเมริเดียน ต้องหมุนเส้นลวด ๙๐° ถ้าจะหันแม่เหล็กให้เบี่ยนมุม ๔๕° จะต้องหมุนเส้นลวดต่อไปอีกกี่องศา ?

๒๐. ในสนามมีความเข้ม ๐.๑๘ ดายน์แม่เหล็กแกว่งได้ ๑๐ ครั้งใน ๙๕ วินาที ถ้าเอาไปแขวนในสนามมีความเข้ม ๐.๒๔ ดายน์จะแกว่งเร็วครั้งละกี่วินาที ?

๒๑. ในสนามมีความเข้ม ๐.๒๔ ดายน์แม่เหล็กแกว่งได้ ๑๓ ครั้งใน ๒ นาที เมื่อเอาไปแขวนในที่อีกแห่งหนึ่งแกว่งได้ ๑๒ ครั้งใน ๒ นาทีกับ ๑๐ วินาที ให้หาความเข้มในที่นั้น.

๒๒. แม่เหล็ก ๒ แท่งมีขนาดเท่ากันและในที่แห่งเดียวกันแท่งหนึ่งแกว่ง ๒๐ ครั้งใน ๓ นาที อีกแท่งหนึ่ง ๒๐ ครั้งใน ๓ นาทีกับ ๒๕ วินาที ถ้าแท่งแรกมีโมเมนต์ ๑๐๐ ให้หาโมเมนต์ของอีกแท่งหนึ่ง.

๒๓. ให้เทียบโมเมนต์ระหว่างแม่เหล็ก ๒ แท่งซึ่งมีขนาดเท่ากัน ในที่แห่งเดียวกันและในเวลาเท่ากันแท่งหนึ่งแกว่ง ๑๒ ครั้ง อีกแท่งหนึ่ง ๑๕ ครั้ง.

๒๔. แม่เหล็กแท่งหนึ่งมีโมเมนต์ ๖๔ และเวลาแกว่ง ๑๖ วินาที อีกแท่งหนึ่งมีขนาดเท่ากันมีโมเมนต์ ๘๐ ในที่แห่งเดียวกันจะมีเวลาแกว่งเท่าไร ?

๒๕. เหล็กแท่งหนึ่งเมื่อถูให้เป็นแม่เหล็กแล้วแกว่งในสนามของโลกวินาทีละ ๖ ครั้ง ครั้นเอาเผาไฟแล้วลองแกว่งดูใหม่ แกว่ง ๙ วินาทีต่อครั้ง ให้เทียบโมเมนต์เมื่อก่อนเผาไฟกับเผาไฟแล้ว.

๒๖. แม่เหล็กแท่งหนึ่งเมื่ออยู่โดยลำพังแกว่ง ๕๐ ครั้งใน ๓ นาทีกับ ๔๐ วินาที ครั้นเอาแม่เหล็ก 'ก' มาช่วยต่อ แกว่ง ๕๐ ครั้งใน ๓ นาที และครั้น

เอาแม่เหล็ก 'ข' มาช่วยด่อ แกว่ง ๕๐ ครั้งใน ๒ นาทีกับ ๓๐ วินาที ให้เทียบโมเมนต์ระหว่าง 'ก' กับ 'ข'.

๒๗. แม่เหล็กแกว่งในสนามมีความเข้ม ๐.๑๘ ดายน์ ๑๐๐ ครั้งใน ๙ นาทีกับ ๑๐ วินาที ถ้าเอาไปวางในสนามมีความเข้ม ๐.๖ ดายน์กับ ๐.๗๘ ดายน์จะกินเวลาเท่าไรจึงจะแกว่งได้แห่งละ ๑๐๐ ครั้ง ?

๒๘. เข็มทิศเล็ก ๆ วางนิ่งอยู่ในเมริเดียนแม่เหล็ก เมื่อเอาแม่เหล็กแท่งหนึ่งวางในเมริเดียนเดียวกันเหนือขึ้นไป ๒๐ ซม. อีกแท่งหนึ่งใต้ลงมา ๓๐ ซม. เข็มทิศก็คงนิ่งอยู่อย่างเดิม ให้เทียบโมเมนต์ของแม่เหล็กสองแท่งนั้น.

๒๙. แม่เหล็กแท่งหนึ่งเมื่อเอาวางทางทิศใต้ของเข็มทิศห่างจากเข็มทิศ ๑๐ ซม. เข็มทิศบ่ด ๔๕° ถ้าแรงโลกมีความเข้ม ๐.๑๘ ดายน์ ให้หาโมเมนต์ของแม่เหล็กแท่งนั้น.

๓๐. ในสนามมีความเข้ม ๐.๑๘ ดายน์ แม่เหล็กหัน ๓๐° ในสนามมีความเข้ม ๐.๒๔ ดายน์ จะหันเท่าไร ?

๓๑. แม่เหล็กมีโมเมนต์ ๑๐๐ ทำให้เข็มแมกนิตอมิเตอร์หัน ๓๐° ถามว่าต้องใช้แม่เหล็กมีโมเมนต์เท่าไร เมื่อวางในที่เดียวกันจะทำให้เข็มแมกนิตอมิเตอร์หัน ๔๕° ?

๓๒. แม่เหล็กแท่งหนึ่งเมื่อวางห่างจากแมกนิตอมิเตอร์เป็นระยะ ๒๔ ซม. ทำให้เข็มแมกนิตอมิเตอร์หันเป็นมุม เท่ากับเมื่อเอาอีกแท่งหนึ่งวางห่างเป็นระยะ ๒๗ ซม. ให้เทียบโมเมนต์ระหว่างแม่เหล็ก ๒ แท่งนั้น.

๓๓. แม่เหล็กมีโมเมนต์ ๔๕๐ เอาวางไว้ที่จุดหนึ่งห่างไปทางทิศใต้ของเข็มทิศเป็นระยะ ๒๕ ซม. และวางในแนวตะวันออกตะวันตก ถ้าแม่เหล็กแท่งนั้นสั้นและความเข้มของแรงโลกที่จุดนั้น ๐.๑๘ เข็มทิศจะเบนเป็นมุมเท่าไร ?

๓๕. แม่เหล็ก ๒ แท่ง ยาวแท่งละ ๑๐ ซม. และมีโมเมนต์แท่งละ ๒๐๐ วางเอาปลายจดกันเป็นด้านประชิดของรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ให้หาความเข้มที่จุดซึ่งเป็นมุมตรงข้ามของรูปสี่เหลี่ยม (๑) ขั้วแม่เหล็กชะนิดเดียวกันจดกัน (๒) ขั้วแม่เหล็กคนละชะนิดจดกัน.

๓๕. แท่งแม่เหล็กยาว ๘ ซม. และมีโมเมนต์ ๑๖๐ ให้คำนวณกำลังที่ส่งไปยังจุดหนึ่งอยู่บนแนวแกนห่างจากจุดศูนย์กลาง ๑๒ ซม.

๓๖. แม่เหล็กแท่งหนึ่งยาว ๖ ซม. วางห่างจากแมกนิตอมิเตอร์ ๑๕ ซม. เข็มแมกนิตอมิเตอร์เบน ๒๐° ให้หาโมเมนต์ของแม่เหล็ก (๑) ไม่คิดส่วนยาวของแท่งแม่เหล็ก (๒) คิดส่วนยาวของแท่งแม่เหล็กด้วย (ความเข้มของแรงโลก ๐.๑๘ แทน ๒๐° = ๐.๓๖๔).

๓๗. เข็มทิศเมื่ออยู่โดยลำพังในสนามแม่เหล็กของโลกซึ่งมีความเข้ม ๐.๑๘ นั้นแกว่ง ๑๐ ครั้ง ในเวลา ๕๔ วินาที ถ้า (๑) เอาขั้วเหนือของแม่เหล็กกำลัง ๒๐ หน่วย (๒) ขั้วใต้ของแม่เหล็กกำลัง ๒๐ หน่วย มาวางทางเหนือของเข็มทิศเป็นระยะ ๒๐ ซม. ให้คำนวณเวลาที่เข็มทิศแกว่ง ๑๐ ครั้ง.

๓๘. แท่งแม่เหล็กยาว ๑๐ ซม. และวางในแนวตะวันออกตะวันตกห่างจากแมกนิตอมิเตอร์ ๑๕ ซม. เข็มแมกนิตอมิเตอร์หัน ๓๐° ให้หาโมเมนต์ของแม่เหล็ก ความเข้มของแรงโลก ๐.๑๘ ดายน์.

๓๙. แม่เหล็ก ๒ แท่งยาวแท่งละ ๑๕ ซม. และมีโมเมนต์แท่งละ ๒๕๐ วางเอาขั้วเหนือจดกันเป็นมุมฉาก ให้หากำลังรวมที่จุดห่างจากแม่เหล็กแท่งละ ๑๕ ซม.

๔๐. แม่เหล็ก ๒ แท่งมีความเข้มของการเป็นแม่เหล็กเท่ากัน แท่งหนึ่งยาว ๒๐ ซม. กว้าง ๓ ซม. หนา ๕ มม. อีกแท่งหนึ่งยาว ๑๘ ซม. กว้าง ๒ ซม. หนา ๑ ซม. ให้เทียบโมเมนต์ระหว่างแม่เหล็ก ๒ แท่งนั้น.

๔๑. แม่เหล็กแท่งหนึ่งวางอยู่ในแนวเมริเดียนแม่เหล็ก ส่งแรงไปยังจุดหนึ่งทางตะวันออก ห่างจากจุดศูนย์กลางของแท่งแม่เหล็ก ๑๒ ซม. ได้ ๐.๑๑๕ ดายน์ ถ้าแท่งแม่เหล็กยาว ๑๐ ซม. แม่เหล็กแท่งนั้นจะมีโมเมนต์เท่าไร?

๔๒. แม่เหล็กแท่งหนึ่งแกว่งโดยลำพังในสนามแม่เหล็กของโลกซึ่งมีความเข้ม ๐.๑๘ แกว่งได้ ๑๒ ครั้งต่อ ๑ นาที เมื่อเอาไปแกว่งณที่อีกแห่งหนึ่งซึ่งณที่นั้นมุมเทเท่ากับ ๔๕° แกว่งได้ ๑๓ ครั้งต่อ ๑ นาที ให้หาความเข้มตามแนวตรงของแรงแม่เหล็กของโลกณที่นั้น.

๔๓. แท่งแม่เหล็กวางอยู่ในแนวเมริเดียนแม่เหล็ก เข็มทิศวางทางเหนือของแท่งแม่เหล็กเป็นระยะพอควร เข็มทิศหัน ๔๕° ถ้าแม่เหล็กแท่งนั้นสั้น เมื่อยกเข็มทิศมาวางทางทิศตะวันออกของแท่งแม่เหล็กห่างออกมาเป็นระยะเท่ากับเมื่อวางทางเหนือ เข็มทิศจะหันประมาณ ๒๗° จงพิสูจน์ให้ดู.

๔๔. แม่เหล็กแท่งหนึ่งเมื่อแขวนอยู่โดยลำพังแกว่ง ๕๐ ครั้งใน ๗ นาที ๓๐ วินาที เมื่อเอาแม่เหล็ก 'ก' มาช่วยแรงโลกล่อ แกว่ง ๕๐ ครั้งใน ๖ นาที ๕๐ วินาที เมื่อเอาแม่เหล็ก 'ข' มาช่วยแรงโลกล่อ แกว่ง ๕๐ ครั้งใน ๖ นาที ๓๕ วินาที ให้เทียบโมเมนต์ระหว่าง 'ก' กับ 'ข'.

๔๕. ที่ลอนดอนความเข้มตามแนวตรงไปที่ขั้วแม่เหล็กของโลกเท่ากับ ๐.๔๔ หน่วย ซี.จี.เอส. มุมเทเท่ากับ ๖๗° ที่นิวยอร์กความเข้ม ๐.๖๐ มุมเท ๗๒° ถ้าแม่เหล็กแกว่งที่ลอนดอน ๑๐ ครั้งใน ๒ นาที ๓๐ วินาที ที่นิวยอร์คแกว่ง ๓๐ ครั้งจะกินเวลาเท่าไร? (คอส ๖๗° = ๐.๓๙ คอส ๗๒° = ๐.๓๑).

๔๖. แท่งแม่เหล็กยาว ๑๐ ซม. กว้าง ๒ ซม. หนัก ๓๖ กรัม มีโมเมนต์ ๑๒๐ ถ้าเอาไปแขวนในสนามแม่เหล็กแห่งหนึ่งมีความเข้ม .๑๙ เกาส์ แม่เหล็กแท่งนั้นจะกินเวลาเท่าไรจึงจะแกว่งได้ ๑๐ ครั้ง?

๔๗. แม่เหล็กแท่งหนึ่งยาว ๑๒ ซม. มีโมเมนต์ ๒๕๐ เอาวางห่างจากแมกนิตอมิเตอร์ ๑๘ ซม. เข็มแมกนิตอมิเตอร์หัน ๓๑° แรงแม่เหล็กของโลกที่ตรงนั้นเป็นเท่าไร ? (แทน ๓๑° = ๐.๖).

๔๘. แม่เหล็กแท่งหนึ่งยาว ๘ ซม. วางห่างจากแมกนิตอมิเตอร์ ๒๔ ซม. เข็มแมกนิตอมิเตอร์หัน ๓๑° แรงแม่เหล็กของโลกที่นั่นเท่ากับ ๐.๑๘ ดายน์ ให้หาโมเมนต์ของแม่เหล็กแท่งนั้น.

๔๙. แม่เหล็กแท่งสั้นวางอยู่ทิศใต้ของแมกนิตอมิเตอร์ห่างออกมาเป็นระยะ ๒๐ ซม. ทำให้เข็มแมกนิตอมิเตอร์หันเป็นมุมเท่ากับเอาแม่เหล็กแท่งสั้นอีกแท่งหนึ่งมีโมเมนต์ ๖๐ วางทางทิศตะวันออกของแมกนิตอมิเตอร์ห่างออกไป ๑๕ ซม. ให้หาโมเมนต์ของแท่งที่วางทางทิศใต้ของแมกนิตอมิเตอร์.

๕๐. แม่เหล็กแท่งหนึ่งยาว ๖ ซม. กว้าง ๑.๒ ซม. หนัก ๕๐ กรัม แกว่ง ๑๐ ครั้ง ใน ๓ นาที ๒๐ วินาที แม่เหล็กแท่งนั้นเมื่อเอาวางห่างจากแมกนิตอมิเตอร์ ๑๕ ซม. เข็มแมกนิตอมิเตอร์หัน ๑๔° (แทน ๑๔° = ๐.๒๕) ให้หาโมเมนต์ของแม่เหล็กแท่งนั้นกับความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลกตามแนวนอน.

ภาค ๒

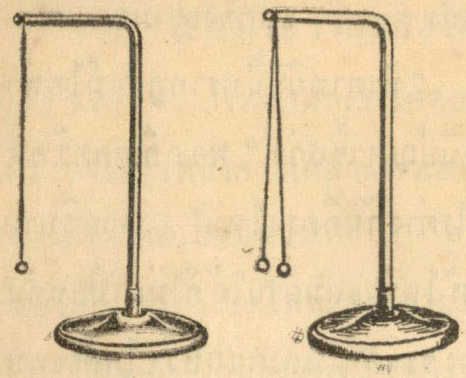
อีเลคโตรสเแตติคส์

๑. ความจริงตอนต้น ไฟฟ้าคืออะไรแน่ยังไม่มีใครรู้จริงจนบัดนี้ แต่เรื่องราวของไฟฟ้ามีคนรู้จักกันมาแต่ครั้งสมัยพวกกรีคโบราณ แต่รู้จักกันเพียงเป็นของประหลาดเท่านั้น เราเพิ่งมารู้จักใช้ให้เป็นประโยชน์จริงจังเมื่อราวร้อยปีมานี้เท่านั้น และรู้สึกว่าได้ประโยชน์และความสะดวกอย่างเห็นผล ต่อไปภายหน้าในเวลาเร็ววัน จะเจริญขึ้นอีกถึงแค่ไหนยังทายกันไม่ถูก.

พวกกรีคได้เคยใช้วัตถุบางชะนิดถูกัน เช่นเอาแพรถูแท่งอำพันแล้วปรากฏว่าอำพันมีอำนาจดูดของเบา ๆ ได้ อำนาจที่เกิดขึ้นเช่นนี้เรียกว่า **ไฟฟ้า** (electricity) การที่อำพันมีอำนาจนี้เกิดขึ้นเรียกว่า **อีเลคตริฟีเคชัน** (electrification) เมื่อเราทำให้เกิดไฟฟ้าขึ้นที่แท่งอำพัน เราพูดว่าเรา **อีเลคตริไฟ** (electrify) หรือ **ประจุ** (charge) แท่งอำพัน จำนวนไฟฟ้าที่อยู่ในแท่งอำพันเรียกว่า **จำนวนประจุ** (charge) เมื่อไฟฟ้าหนีออกจากแท่งอำพันหมดแล้ว อำพันได้ชื่อว่า **มีภาวะเป็นปกติ** (neutral) หรือเป็นกลางอย่างเดิม.

ไฟฟ้าแสดงว่าเคลื่อนที่จากวัตถุก้อนหนึ่งไปยังอีกก้อนหนึ่งได้ ดังเช่นเอาแท่งอำพันที่ประจุแล้วถูกับขนไก่หรือของเบา ๆ อย่างอื่นเช่นไส้โสนแห้ง ๆ ขนไก่นั้นจะดูดขนไก่อื่นได้ นี้แสดงว่าขนไก่ได้รับประจุจากแท่งอำพัน หรือพูดอีกอย่างหนึ่งไฟฟ้าแล่นจากแท่งอำพันไปหาขนไก่ได้.

เมื่อเราทำให้ไฟฟ้าไหลจากก้อนวัตถุลงดินหมด เราพูดว่า **เออร์ท** (earth) ก้อนวัตถุนั้น.



รูป ๓๐

ถ้าเราใคร่จะรู้ว่าก้อนวัตถุมีไฟฟ้าหรือเปล่า เราต้องทดลองด้วยเครื่องมือมีชื่อว่า **อีเลคโตรสโคป** (electroscope) อย่างง่าย ๆ ทำด้วยขนไก่หรือไส้โสนแห้งชิ้นเล็ก ๆ ผูกด้วยใยไหมห้อยอยู่ แล้วนำก้อนวัตถุที่สงสัยว่าจะมีไฟฟ้าหรือไม่เข้าใกล้ ถ้าดูดชิ้นโสนเข้าไปหาก็แปลว่ามีไฟฟ้า แต่ก่อนทดลองควรเอามือดึงชิ้นโสนเสียก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีไฟฟ้าในชิ้นโสน.

ขณะที่ก้อนวัตถุซึ่งประจุไฟฟ้าแล้วดูดก้อนวัตถุอื่น ความจริงเป็นด้วยต่างคนต่างดูดกัน (mutual attraction) ทำนองแม่เหล็กกับเหล็กธรรมดาดูดกัน.

เมื่อสมัย ๓๐๐ ปีล่วงมาแล้ว มีคนช่วยกันพินิจพิจารณาขึ้นอีกพักหนึ่ง ดอคเตอร์กิลเบอร์ตเป็นผู้ที่สนใจมากคนหนึ่ง แกพยายามหาความจริงว่าวัตถุทุกชะนิดจะทำให้เกิดไฟฟ้าได้หรือไม่ วัตถุบางพวกแกทำสำเร็จ แต่บางพวกก็ไม่สำเร็จ ดังนั้นแกจึงแบ่งวัตถุออกเป็น ๒ พวก ให้ชื่อพวกที่ทำให้เกิดไฟฟ้าได้ว่าพวก **อีเลคตริคส์** (electrics) พวกที่ไม่เกิดไฟฟ้าให้ชื่อว่าพวก **นอนอีเลคตริคส์** (non-electrics).

อีเลคตริคส์	**นอนอีเลคตริคส์**
อำพัน ครั่ง กำมะถัน	โลหะต่าง ๆ
ยางไม้ แก้ว เอโบไนต	ไม้ อิฐ หิน
ฯลฯ	ฯลฯ

เวลาดอคเตอร์กิลเบอร์ตทดลองเรื่องเหล่านั้น แกใช้มือถือวัตถุที่ทดลอง แต่ต่อมามีผู้ทดลองใหม่ โดยไม่ใช้มือจับวัตถุที่ทดลองโดยตรง แต่ใช้พวก

อีเลคตริคส์เป็นด้ามสำหรับจับวัตถุที่ทดลองเสียคอนหนึ่ง แล้วจึงเอามือจับด้ามถือทดลอง และเอาแพรหรือขนสัตว์ถูวัตถุนั้น ทำตามวิธีนี้ปรากฏว่ามีไฟฟ้าเกิดขึ้นแก่วัตถุทุกชะนิดหมด เมื่อเป็นเช่นนี้จึงเกิดมีปัญหาขึ้นว่า พวกอีเลคตริคส์กับพวกนอนอีเลคตริคส์ของดอคเตอร์กิลเบอร์ตมีอะไรต่างกันที่ตรงไหน เราอธิบายกันว่า วัตถุต่างๆมีสมบัติในเรื่องเป็นสื่อสำหรับให้ไฟฟ้าแล่นผ่านได้ดีไม่เหมือนกัน บางชะนิดก็ยอมให้ไฟฟ้าแล่นผ่านได้สะดวก บางชะนิดก็ไม่สะดวกหรือไฟฟ้าแทบแล่นผ่านไม่ได้เลยเลย วัตถุพวกนำไฟฟ้าได้สะดวกได้ชื่อว่าเป็นพวก ตัวนำ (conductor) ส่วนวัตถุพวกนำไฟฟ้าไม่ได้สะดวกได้ชื่อว่าเป็นพวก ฉนวน (insulator).

พวกวัตถุที่ดอคเตอร์กิลเบอร์ตทำให้เกิดไฟฟ้าไม่สำเร็จเป็นพวกตัวนำที่ดี เพราะพอมีไฟฟ้าเกิดขึ้น ไฟฟ้าแล่นหนีไปเสียทันหมด ไม่มีเหลืออยู่ในแท่งที่ทำให้ไฟฟ้าเกิด ส่วนพวกอีเลคตริคส์ของดอคเตอร์กิลเบอร์ตเป็นพวกฉนวน เมื่อไฟฟ้าเกิดขึ้นแล้ว แม้เป็นจำนวนเล็กน้อยก็หนีไปไหนไม่ได้ คงเหลืออยู่ในแท่งเดิมนั่นเอง และเหลือติดอยู่ได้นาน.

พวกตัวนำดีหรือฉนวนที่เลว

โลหะ ถ่าน กรด เกลือ น้ำ ร่างกายของเรา ฯลฯ

พวกปานกลาง

ดินน้ำลำธี ไม้ หิน กระดาษ งาช้าง ฯลฯ

พวกตัวนำที่เลวหรือฉนวนดี

น้ำมัน เครื่องเคลือบ สักหลาด แพร กำมะถัน ยาง เชลแลค คลั่ง เอโบไนต ปาแรฟฟีน แก้ว อากาศ ฯลฯ.

หมายเหตุ อากาศชื้นไม่เป็นฉนวนที่ดี ฉะนั้นวันไหนอากาศชื้น เราจึงทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่องไฟฟ้าตอนสแตติคส์ไม่ใคร่สำเร็จ.

๒. การกระจายของไฟฟ้าบนก้อนวัตถุ เมื่อก้อนวัตถุเป็นพวกฉนวนได้รับชาร์จ ไฟฟ้ามักเกาะติดอยู่บนก้อนวัตถุเป็นหย่อม ๆ เช่นเอาขนสัตว์ถูแท่งครั่งทางด้านหลังด้านเดียวแล้วเอาไปทดลองกับอิเลคโตรสโคป จะแสดงอำนาจไฟฟ้าที่ด้านหลังเป็นส่วนมาก ทางด้านหน้าไม่ใคร่มี แต่ก้อนวัตถุที่เป็นพวกตัวนำพอได้รับชาร์จ ไฟฟ้ากระจายรอบก้อนทั่วหมดในทันที.

ไฟฟ้ากระจายอยู่ตามผิวของก้อนวัตถุเท่านั้น ไม่ใคร่ซึมเข้าไปถึงตอนภายในไฟฟ้าเป็นเสมือนของไหล (fluid) อะไรอย่างหนึ่งที่ฉาบก้อนวัตถุอยู่.

๓. ไฟฟ้าดูดและผลักกันได้ ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยใช้วัตถุต่าง ๆ ถูกัน บางคราวก็ดูดกันบางคราวก็ผลักกัน.

แท่งแก้วสองแท่งต่างก็ใช้แพรถูเหมือนกัน เมื่อเกิดไฟฟ้าแล้วลองเอาสายไหมผูกแขวนให้อยู่ใกล้กัน จะสังเกตเห็นว่าเบนหนีออกจากกัน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยวิธีเดียวกันผลักกัน.

ถ้าแท่งแก้วถูด้วยขนสัตว์เหมือนกัน เมื่อเข้าใกล้กันจะผลักกัน แก้วถูด้วยแพรจะดูดแก้วถูด้วยขนสัตว์.

เวลาทดลองเรื่องไฟฟ้า ถ้าเพียงปรากฏว่าดูดกันเท่านั้น เราจะลงความเห็นเด็ดขาดลงไปทีเดียวยังไม่ได้ เพราะอาจมีชาร์จแต่แท่งเดียวอีกแท่งหนึ่งยังเป็นกลางก็อาจดูดกันได้.

เวลาเอาก้อนวัตถุมีไฟฟ้าทดลองกับอิเลคโตรสโคปทำด้วยไส้โสนหรือลองให้ดูผงเบา ๆ ถ้าสังเกตให้ดีจะจับความจริงได้ว่า เมื่อก้อนโสนเข้าใกล้จนกะทบก้อนที่มีไฟฟ้า แล้วจะกระเด็นหนีออกห่างทันที แสดงว่าขั้นโสนได้รับแบ่งไฟฟ้าชะนิดเดียวกันไปบ้างแล้วจึงเกิดผลักกัน และโดยเหตุนี้ถ้าจะให้อิเลคโตรสโคปแสดงอำนาจไฟฟ้าให้ละเอียดชัดขึ้น จึงทำด้วยไส้โสนสองชั้นผูกสายไหมคนละสายแขวนห้อยให้

ชิดกัน เมื่อเอาวัตถุที่มีไฟฟ้าเข้าใกล้ ฟันโสนจะแยกออกจากกันให้เห็น ถึงวัตถุจะมีไฟฟ้าเป็นจำนวนเล็กน้อยก็แสดงให้เห็นเด่นดีกว่าโสนฟันเดียว.

ความจริงที่ไฟฟ้าดูดและผลักกันได้ทำให้เรานึกเข้าใจว่าไฟฟ้าคงมีต่างกันเป็น ๒ ชะนิด เราให้ชื่อว่าเป็นชะนิดบวกพวกหนึ่ง และชะนิดลบพวกหนึ่ง.

เราสมมุติให้ไฟฟ้าชะนิดที่เกิดขึ้นที่แท่งแก้วเกลี้ยงโดยเอาแพรมาถูว่าเป็นชะนิดบวก ไฟฟ้าอื่นจะเกิดขึ้นโดยเอาอะไรถูกับอะไรก็ตาม ถ้าปรากฏว่าผลักกันกับแท่งแก้วเกลี้ยงซึ่งถูด้วยแพรย่อมเป็นชะนิดบวกทั้งสิ้น ถ้าดูดกันก็เป็นชะนิดลบ.

แก้วถูด้วยขนสัตว์หรือแก้วที่มีผิวมัวเป็นรอยผ้าถูด้วยแพร จะเกิดไฟฟ้าลบ.

โลหะต่าง ๆ เช่น เหล็ก ทองแดง ฯลฯ เมื่อถูด้วยขนสัตว์จะเกิดไฟฟ้าบวก และถ้าถูด้วยยางรับเบอร์จะเกิดไฟฟ้าลบ.

ไฟฟ้าทั้งสองชะนิดนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ ชะนิดหนึ่งเกิดขึ้นที่วัตถุที่ใช้ถู อีกชะนิดหนึ่งเกิดขึ้นที่วัตถุที่ถูกถู.

เมื่อไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยหาอะไรมาถูกันได้ ชื่อว่าเกิดขึ้นโดย ความขัดสี (friction) และเมื่อเกิดขึ้นแล้วปล่อยให้คายไปอยู่กับวัตถุอื่นโดยเอาก้อนวัตถุเดิมที่มีไฟฟ้าเกิดขึ้นไปกะทบกับก้อนวัตถุอื่น ก้อนวัตถุอื่นได้รับแบ่งไฟฟ้าเอาไปได้ ชื่อว่าได้รับ **ประจุโดยการกะทบ** (charge by contact).

พวกของเหลวและวัตถุที่เราถูไม่ได้ถนัด และเราต้องการให้วัตถุนั้นเกิดไฟฟ้า เรามักใช้วิธีประจุด้วยการกะทบ คือเราใช้ถูแท่งวัตถุที่ถูได้สะดวกเสียก่อน เมื่อเกิดไฟฟ้าแล้วก็เอาแท่งที่มีไฟฟ้านั้นมากะทบกับของเหว ๆ จะได้รับประจุ.

บัญชีแสดงชะนิดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยการขัดสี

๑. ขนสัตว์	๗. แก้วเกลี้ยง	๑๓. โลหะ
๒. สักหลาด	๘. สำลี	๑๔. ยางรับเบอร์
๓. ไม้	๙. กระดาษ	๑๕. อำพัน

๔. เชคแลค	๑๐. แพร	๑๖. กำมะถัน
๕. ยางไม้	๑๑. แก้วผิวไม่เกลี้ยง	๑๗. เอโบไนต
๖. ครั่ง	๑๒. มือ	๑๘. คอลโลเดี่ยน

ตามบัญชีข้างบน เมื่อเอาวัตถุคู่ใดถูกัน อันหมายเลขที่น้อยเกิดไฟฟ้าชะนิดบวก อันหมายเลขที่มากเกิดไฟฟ้าชะนิดลบ เช่นเอาอำพันกับกำมะถันถูกัน อำพันเกิดไฟฟ้าบวก กำมะถันเกิดไฟฟ้าลบ.

๔. **ทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดสองฟลูอิด** (two-fluid theory) ดูเฟย์เป็นผู้เริ่มอธิบายเรื่องทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดสองฟลูอิดโดยให้ความเห็นว่าไฟฟ้าคงเป็น ของไหล (fluid) ชะนิดหนึ่งที่ไหลเคลื่อนที่ได้ และคงฉาบติดอยู่ตามผิวของก้อนวัตถุ ไฟฟ้ามีสองชะนิดเป็นชะนิดบวกพวกหนึ่ง ชะนิดลบพวกหนึ่ง พวกชะนิดเดียวกันผลักกันพวกคนละชะนิดดูดกัน จำนวนไฟฟ้าที่ติดอยู่ที่ก้อนวัตถุเรียกว่าประจุ หน่วยสำหรับวัดประจุเรียกว่า **หน่วยอีเลคโตรสแตติค** (electrostatic unit) คือถือเอาจำนวนประจุคู่หนึ่งที่เท่ากัน เมื่อวางห่างจากกัน ๑ ซม. เกิดแรงผลักกัน ๑ ดายน์ ประจุอันหนึ่ง ๆ ถือว่าเป็นจำนวนหนึ่งหน่วย ประจุคนละชะนิดเมื่อพบกันจะฆ่าซึ่งกันและกัน และถ้าจำนวนประจุเท่ากันต่างก็จะหมดอำนาจกลายเป็นกลาง.

วัตถุที่ประจุไฟฟ้าย่อมสามารถส่งแรง **อิทธิพล** (influence) หรือแรง **ชักนำ** (induction) ออกไปในที่ว่างนอกก้อนวัตถุได้ทำนองแท่งแม่เหล็กส่งอำนาจแม่เหล็กออกนอกแท่งได้ และเรื่องนี้แสดงให้เห็นจริงได้โดยเอาวัตถุประจุไฟฟ้าเข้าใกล้อีเลคโตรสโคปทำด้วยไส้โสนสองชิ้น ไส้โสนจะแยกห่างออกจากกัน.

ทฤษฎีนี้อธิบายข้อความต่าง ๆ ของเรื่องไฟฟ้าได้ดี แต่ตอนที่ไฟฟ้าฆ่าอำนาจซึ่งกันและกันหมดไปได้ฟังไม่สู้สนิทนัก ไฟฟ้าเป็นกำลังงาน ฉะนั้นจะศูนย์หายไปเงียบ ๆ ไม่มีร่องรอยอย่างไรได้.

๕. **ทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดฟลูอิดเดียว** (one-fluid theory) เบ็นจามินแฟรงกลินให้ทฤษฎีใหม่นี้ แฟรงกลินยอมรับอย่างดูเฟย์ ว่าไฟฟ้าคงเบ็นของไหลชะนิดหนึ่งที่ไหลเคลื่อนที่ได้ แต่แฟรงกลินเข้าใจว่าไฟฟ้ามีชะนิดเดียว การที่ไฟฟ้าแสดงอำนาจต่างกันนั้นเบ็นด้วยมีฐานะการเบ็นอยู่ไม่เหมือนกัน แฟรงกลินยกตัวอย่างเรื่องของน้ำเข้ามาเปรียบเทียบว่าน้ำก็เบ็นน้ำชะนิดเดียวและตามปกตินั้นมักนิ่ง แต่ที่น้ำแสดงว่าไหลได้หรือแสดงอำนาจได้ก็ต่อเมื่อระดับของน้ำต่างกัน ฉะนั้นไฟฟ้าคงมีอะไรที่เปลี่ยนฐานะได้อย่างน้ำเปลี่ยนฐานะในเรื่องระดับ ไฟฟ้าคงมีอะไรอย่างหนึ่งทำนองน้ำมีระดับเหมือนกัน แฟรงกลินให้ชื่อแก่สิ่งที่คล้าย ๆ กับระดับของน้ำนี้ว่า **ศักย์ของไฟฟ้า** (potential) เมื่อไรไฟฟ้ามีศักย์เบ็นปกติก็แสดงสมบัติเบ็นปกติเฉย ๆ ก้อนวัตถุทุกชะนิดถือว่ามีไฟฟ้าประจำอยู่ด้วยเสมอแล้ว หากแต่ศักย์ของไฟฟ้าเบ็นปกติจึงไม่แสดงอำนาจอะไร วัตถุก้อนไหนมีศักย์สูงกว่าปกติขึ้นชื่อว่าวัตถุนั้นมีประจุไฟฟ้าบวก และถ้าวัตถุก้อนไหนมีศักย์ต่ำกว่าปกติขึ้นชื่อว่าวัตถุนั้นมีประจุไฟฟ้าลบ ลบบวกในที่นี้ไม่ได้หมายถึงชะนิดของไฟฟ้า แต่หมายถึงสภาวะของศักย์ของไฟฟ้า เมื่อวัตถุประจุไฟฟ้าบวกเข้าใกล้วัตถุประจุไฟฟ้าลบก็เบรียบเหมือนน้ำสองถังที่มีระดับสูงต่ำกว่ากันเข้าถึงกัน น้ำก็เฉลี่ยกันใหม่ระหว่างสองถังนั้น ส่วนไฟฟ้าก็เช่นเดียวกันคงเฉลี่ยกันใหม่ระหว่างวัตถุสองก้อนจนศักย์เท่ากันเบ็นปกติ ทฤษฎีนี้พึงดูสนิทดีกว่าทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดสองฟลูอิด ถ้าไฟฟ้าบวกมากกว่า เมื่อเฉลี่ยกันแล้วก็คงได้ศักย์สูงกว่าปกติคือยังคงเบ็นบวก ถ้าลบมากกว่า เมื่อเฉลี่ยกันแล้วก็คงได้ศักย์ต่ำกว่าปกติคือยังคงเบ็นลบ.

บวกลบไม่ใช่ชะนิดของไฟฟ้า เบ็นเครื่องหมายบอกฐานะของไฟฟ้าเท่านั้น แก้วกับแพรเมื่อก่อนถูกัน ต่างก็มีไฟฟ้าอยู่ในตัวแล้ว แต่ศักย์ยังเบ็นปกติอยู่ครั้นเมื่อเอาถูกันเข้า แฟรงกลินถือว่าเราออกแรงถูเพื่อเปลี่ยนฐานะของไฟฟ้าในแพรและแก้ว ในที่สุดแก้วได้รับไฟฟ้าไปจากแพรบ้าง แก้วจึงมีศักย์สูงกว่าปกติและ

กลายเป็นพวก มีฐานะเป็นบวก ส่วนแพรในขณะเดียวกันเกิดไฟฟ้าพร่องไปเสียบ้าง ก็เหลือศักย์ต่ำกว่าปกติและกลายเป็นพวกมีฐานะเป็นลบ เมื่อแก้วกับแพรเข้าใกล้กัน ไฟฟ้าเฉลี่ยกันใหม่ ต่างคนต่างมีฐานะกลับเป็นปกติเช่นเดิม ตอนที่ไฟฟ้าเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งสองอย่างและตอนที่ไฟฟ้าฆ่าฤทธิ์กันได้ทฤษฎีนี้อธิบายได้แจ่มแจ้งน่าเชื่อ.

ทฤษฎีนี้อธิบายข้อความต่าง ๆ ได้กว้างขวางและเข้าใจง่ายกว่าทฤษฎีชะนิดสอง ฟลูอิดแต่ตอนไฟฟ้าเป็นประกายกะโดดข้ามที่ว่างไปได้ชักขลุกขลัก.

๖. ทฤษฎีอีเลคตรอน สมัยนี้เราจับความจริงได้ว่าประกายไฟฟ้าคือผงละอองไฟฟ้าที่ปลิวอยู่ในที่ว่าง เราเข้าใจว่าไฟฟ้าเป็นเม็ดผงเล็ก ๆ และตั้งทฤษฎีที่สามขึ้นเรียกว่า **ทฤษฎีละอองไฟฟ้า** (corpuscular theory หรือ electron theory) ตามทฤษฎีนี้มีความเข้าใจกันว่าไฟฟ้าเป็นเม็ดละอองเล็ก ๆ และมีเป็น ๒ ชะนิด เราสมมุติให้เป็นเม็ดบวกพวกหนึ่งและเม็ดลบพวกหนึ่ง พวกเม็ดบวกเรียกว่าเม็ด **โปรตอน** (proton) พวกเม็ดลบเรียกว่าเม็ด **อีเลคตรอน** (electron) โปรตอนกับโปรตอนด้วยกันผลักกัน อีเลคตรอนกับอีเลคตรอนผลักกัน โปรตรอนกับอีเลคตรอนดูดกัน.

เนื้อธาตุของวัตถุทุกชะนิดประกอบขึ้นด้วยเม็ดโปรตอนกับเม็ดอีเลคตรอนเป็นจำนวนเท่ากัน โปรตอนเป็นตัวเนื้อธาตุ ปรมาณูของธาตุต่าง ๆ ประกอบด้วยโปรตอนเป็นจำนวนจำกัด แต่เมื่อมีโปรตอนเป็นจำนวนเท่าใดย่อมมีอีเลคตรอนเป็นจำนวนเท่านั้นด้วย ธาตุถ่านประกอบขึ้นด้วยโปรตอนปรมาณูละ ๑๒ โปรตอน ในโตรเจนปรมาณูละ ๑๔ โปรตอน ฯ ล ฯ เพียงบัดนี้มนุษย์ยังไม่สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนโปรตอนในปรมาณูของธาตุต่าง ๆ ได้ ยังไม่สามารถทำให้โปรตอนเคลื่อนที่ได้.

อีเลคตรอนเป็นผู้แสดงฐานะในเรื่องอำนาจไฟฟ้าในวัตถุ อีเลคตรอนเคลื่อนที่ไปไหนมาไหนได้ อีเลคตรอนอาจออกจากวัตถุก้อนหนึ่งและเข้าไปอยู่ในวัตถุอีกก้อนหนึ่งได้ ตามปกติเมื่อวัตถุเป็นกลาง จำนวนโปรตอนและอีเลคตรอนในก้อนวัตถุเท่ากันพอดี ถ้าอีเลคตรอนออกจากก้อนใด ก้อนนั้นพร่องอีเลคตรอนและจำนวน

โปรตอนซึ่งเคยเท่ากับจำนวนอิเลคตรอนก็ปรากฏมีมากกว่าจำนวนอิเลคตรอนที่เหลืออยู่ ก้อนวัตถุนั้นจึงแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวก ก้อนวัตถุอันที่รับอิเลคตรอนเข้าไปอยู่ด้วยก็มีอิเลคตรอนเป็นจำนวนมากกว่าโปรตอนที่มีอยู่เดิม จึงแสดงอำนาจเป็นลบ ครั้นก้อนวัตถุทั้งสองนั้นเข้าใกล้กัน อิเลคตรอนเฉลี่ยกันใหม่ ต่างก้อนมีจำนวนโปรตอนกับอิเลคตรอนเท่ากันอย่างเดิม และกลับเป็นกลางทั้งคู่.

เวลาใช้แพรถูแก้ว อิเลคตรอนวิ่งออกจากแก้วไปหาแพร แก้วจึงแสดงอำนาจบวกแพรแสดงอำนาจลบ.

ตัวนำเป็นวัตถุที่ยอมให้อิเลคตรอนแล่นผ่านได้สะดวก ส่วนฉนวนเป็นวัตถุที่ไม่ยอมให้อิเลคตรอนแล่นผ่านได้ ฉะนั้นเมื่อเอาวัตถุที่ประจุไฟฟ้าแล้ววางลงบนฉนวน วัตถุจึงรักษาประจุอยู่ในก้อนได้นาน เพราะอิเลคตรอนวิ่งเข้าออกไม่ได้ สมมุติว่าวัตถุนั้นประจุชาร์จบวกแปลว่าก้อนวัตถุพร่องอิเลคตรอน อิเลคตรอนจากอื่นวางผ่านฉนวนเข้าไปเติมไม่ได้ และถ้าวัตถุนั้นประจุชาร์จลบซึ่งแปลว่าก้อนวัตถุมีอิเลคตรอนเกินกว่าปกติ อิเลคตรอนออกจากก้อนผ่านฉนวนไปอยู่ที่อื่นไม่ได้.

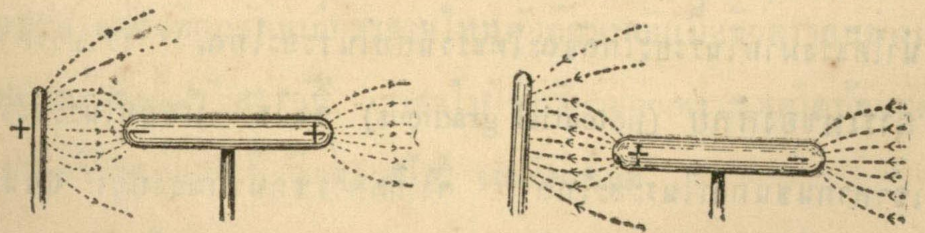
๗. สนามไฟฟ้า ก้อนวัตถุที่ประจุชาร์จย่อมส่งแรงดูดออกไปพ้นแท่งได้อย่างแม่เหล็กส่งเส้นอำนาจออกจากแท่ง แรงดูดไฟฟ้าคืออะไรแน่เราไม่รู้ แต่เราทดลองให้ดูได้ เอาขนไก่ผูกสายไหมห้อยไว้ แล้วเอาแท่งวัตถุที่ประจุชาร์จเข้าใกล้จะดูดขนไก่เข้ามาหา ถือแท่งวัตถุให้ห่างจากขนไก่พอควรก็คงยังดูดขนไก่ได้บ้าง แต่พอเอาออกห่างจากขนไก่ให้มากหน่อยจะดูดขนไก่ไม่ถึง นี่แสดงว่าขนไก่อยู่พ้นอาณาเขตต์ของแรงไฟฟ้าของแท่งวัตถุนั้น อาณาเขตต์รอบแท่งวัตถุที่วัตถุส่งแรงไฟฟ้าไปถึงเรียกว่า สนามไฟฟ้า (electric field).

แรงดูดไฟฟ้าที่ส่งออกจากก้อนวัตถุพุ่งทะลุก้อนวัตถุอื่นที่ขวางทางอยู่ได้ไม่ว่าวัตถุนั้นจะเป็นตัวนำหรือฉนวน แต่ถ้าวัตถุที่ขวางทางอยู่นั้นมีสายดินถึงดินแรงไฟฟ้าพุ่งผ่านไม่ได้.

เมื่อฉนวนวางอยู่กลางโดยมีไฟฟ้าขนาบอยู่ทั้งสองข้าง เราให้ชื่อฉนวนในเวลานี้ว่า **กำบังไฟฟ้า** (dielectric) ดังเช่นในเรื่องคอนเดนเซอร์ซึ่งเราจะกล่าวถึงต่อไป.

สนามไฟฟ้ามีเรื่องราวทำนองเดียวกันกับสนามแม่เหล็ก ถ้าระยะยิ่งห่างออกไปจากก้อนวัตถุที่ประจุชาร์จ แรงไฟฟ้าที่พุ่งไปถึงมีแรงน้อยเข้า และน้อยลงตามส่วนของระยะทางกำลังสอง อีกอย่างหนึ่งในสนามไฟฟ้าออกจะมีอะไรคล้าย ๆ กับเรื่องรัดแตนซของแม่เหล็ก คือแรงไฟฟ้าที่พุ่งไปถึงจุดอื่น ๆ ย่อมเกี่ยวกับชะนิดของกำบังไฟฟ้าด้วย เช่นเมื่อแรงไฟฟ้าพุ่งเข้าไปในอากาศ พุ่งเข้าไปได้แรงอย่างหนึ่ง ถ้าพุ่งเข้าไปในกำบังไฟฟ้าอย่างอื่นก็ได้แรงอีกอย่างหนึ่ง.

๔. การชักนำไฟฟ้า ไฟฟ้าแสดงการแนะนำได้อย่างเช่นแม่เหล็ก เมื่อเอาก้อนวัตถุที่ประจุชาร์จเข้าใกล้ก้อนที่เป็นกลาง ก้อนที่เป็นกลางจะแสดงอำนาจไฟฟ้าได้ชั่วคราวตลอดเวลาที่ก้อนประจุชาร์จวางอยู่ใกล้ ๆ การที่เกิดอำนาจไฟฟ้าชั่วคราวขึ้นในก้อนที่เป็นกลางเช่นนี้เราเรียกว่าเกิดขึ้นโดยการชักนำหรือโดย อิทธิพล และก้อนที่เป็นกลางซึ่งวางอยู่ใกล้ ๆ นั้นแสดงความจริงต่อไปอีกชั้นหนึ่ง คือส่วนของก้อนที่อยู่ทางใกล้ของก้อนที่ประจุชาร์จแสดงอำนาจไฟฟ้าคนละชะนิดกับไฟฟ้าในก้อนประจุชาร์จ ส่วนของก้อนที่อยู่ทางไกลของก้อนที่ประจุชาร์จแสดงอำนาจไฟฟ้าชะนิดเดียวกับไฟฟ้าในก้อนประจุชาร์จ ความจริงนี้ทดลองให้เห็นได้โดยใช้ก้อนวัตถุที่เป็นกลาง ๒ ก้อนวางห่างกันพอสมควร และต่างก็วางอยู่บนฉนวน เอาลวดเล็ก ๆ โยงระหว่าง ๒ ก้อนให้เชื่อมถึงกัน เอาก้อนวัตถุที่ประจุชาร์จเข้า



รูป ๓๑

ใกล้ก้อนใดก้อนหนึ่งที่วางอยู่บนฉนวนและมิลวดโยงถึงกัน เมื่อวางไว้สักประเดี๋ยวหนึ่ง รีบตัดลวดที่โยงให้ขาด แล้วเอาก้อนทั้งสองไปลองกับอีเลคโตรสโคป ก้อนที่อยู่ใกล้ก้อนประจุชาร์จจะแสดงอำนาจไฟฟ้าคนละชะนิด ก้อนที่อยู่ไกลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าชะนิดเดียวกัน เราอธิบายเหตุผลประกอบเรื่องนี้หลายวิธี.

ก. **อนุโลมตามทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดสองฟลูอิด** เราพูดว่า ไฟฟ้าบวกก็ดีไฟฟ้าลบก็ดี อย่างหนึ่ง ๆ ย่อมต่างก็พุ่งเส้นอำนาจไฟฟ้าบวกหรือไฟฟ้าลบออกไปจากก้อนที่ประจุชาร์จทำนองแท่งแม่เหล็กพุ่งเส้นแรงออกไปจากแท่ง เมื่อเส้นแรงไฟฟ้าพุ่งไปถึงก้อนนิวตราลที่ขวางทางอยู่ ก็ซึมหรือไชทะลุก้อนนิวตราลและไปโผล่ออกหรือตุงอยู่ที่ด้านไกล ด้านไกลจึงแสดงอำนาจไฟฟ้าชะนิดฟลูอิดเดียวกับในก้อนที่ประจุชาร์จ.

ข. **อนุโลมตามทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดฟลูอิดเดียว** เราให้เหตุผลคล้อยตามทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดสองฟลูอิด แต่ตามทฤษฎีหลังเรายอมรับว่าไฟฟ้ามีต่างกันสองชะนิดฉะนั้นเมื่อชาร์จบวกเข้าใกล้ก้อนนิวตราลก็แสดงการชักนำอย่างหนึ่ง และเมื่อชาร์จลบเข้าใกล้ก็แสดงการชักนำอีกอย่างหนึ่ง ส่วนในทางทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดฟลูอิดเดียวเรายอมรับว่ามีไฟฟ้าแต่ชะนิดเดียว ฉะนั้นจึงมีปัญหาขึ้นว่าเราจะให้เหตุผลอย่างไรจึงจะฟังสนิทว่าเมื่อชาร์จบวกเข้าใกล้เกิดการชักนำอย่างหนึ่ง และเมื่อชาร์จลบเข้าใกล้เกิดการชักนำอีกอย่างหนึ่ง เราต้องหาเหตุผลที่เกี่ยวกับเรื่องระดับมาช่วยอธิบาย ฉะเพาะเรื่องการชักนำได้แรงมากในระยะใกล้และได้แรงน้อยในระยะไกล เราประดิษฐ์ศัพท์ว่า **การเทของศักย์** (potential gradient) ขึ้นใช้ เมื่ออยู่ในระยะใกล้ศักย์เทเข้าหากันชันกว่าในระยะไกล จึงเกิดการชักนำได้แรงกว่า ส่วนความจริงในตอนที่ด้านใกล้ของก้อนนิวตราลแสดงประจุคนละชะนิดกับประจุของก้อน

ที่ใช้เอามาชักนำ และด้านไกลแสดงประจุชนิดเดียวกับประจุในก้อนที่เอามาชักนำนั้น เราอาศัยศัพท์การเทของศักย์นี้อธิบายด้วย ตามทฤษฎีนี้เราเปรียบอำนาจไฟฟ้าด้วยระดับ เวลาพวกบวกให้การชักนำ พวกนี้มีไฟฟ้าเกินปกติ อำนาจการชักนำก็เทออก เมื่อผ่านก้อนนิวตราดกระแสการชักนำเทออกไปทางด้านไกล ด้านไกลจึงแสดงอำนาจบวก ครั้นเวลาพวกลบให้การชักนำ พวกนั้นมีระดับไฟฟ้าต่ำกว่าปกติอำนาจการชักนำก็เทเข้าและเทซึมผ่านก้อนนิวตราดเข้ามาหาด้านใกล้ ด้านใกล้จึงแสดงอำนาจบวก

ค. อนุโลมตามทฤษฎีอิเลคตรอน เราพูดว่า ก้อนวัตถุที่เป็นกลางมีจำนวนโปรตอนกับอิเลคตรอนเท่ากันพอดี เมื่อก้อนนิวตราดเข้าใกล้ก้อนที่ประจุชาร์จก็มีการดูดต่อเกิดขึ้น สุดแต่ก้อนที่มีชาร์จนั้นประจุชาร์จชนิดใด สมมุติว่าประจุชาร์จบวกซึ่งแปลว่าก้อนนั้นพร่องอิเลคตรอนและเด่นโปรตอน อิเลคตรอนในก้อนนิวตราดก็ถูกดูดมาออกันที่ด้านใกล้ ด้านใกล้ก็แสดงอำนาจลบชั่วคราว และเมื่ออิเลคตรอนในก้อนนิวตราดเซกันมารวมเสียที่ด้านใกล้ ที่ด้านไกลก็มีอิเลคตรอนเหลืออยู่น้อยและเด่นโปรตอน ด้านไกลจึงแสดงอำนาจบวก ถ้าก้อนที่ใช้ชักนำประจุชาร์จลบซึ่งแปลว่าก้อนนั้นเกินอิเลคตรอน อิเลคตรอนในก้อนนิวตราดถูกผลักร่นไปรวมกันอยู่ที่ด้านไกล ด้านไกลก็แสดงอำนาจลบชั่วคราว ด้านใกล้เหลือเด่นโปรตอนก็แสดงอำนาจบวก เมื่อยกก้อนชักนำออกไปเสียให้พ้น อิเลคตรอนในก้อนที่ถูกชักนำก็กระจายใหม่ทั่วก้อนกลับเป็นนิวตราดอย่างเดิม การดูดต่อที่เกิดขึ้นชั่วคราวนี้ เอาไปใช้อธิบายว่าเพราะเหตุใดก้อนวัตถุที่ประจุชาร์จจึงดูดก้อนที่เป็นนิวตราดได้ และก็พังขึ้นดิ.

๙. การประจุก้อนวัตถุที่เป็นกลาง เวลาเราเอาไฟฟ้าบวกมาประจุก้อนวัตถุที่เป็นกลางโดยการกระทบ อิเลคตรอนจากก้อนที่เป็นกลางวิ่งเข้าไปอยู่ในก้อนที่เอามาประจุเสียบ้าง เพราะก้อนที่เอามาประจุเป็นบวกนั้นแปลว่าพร่องอิเลคตรอน เมื่อเป็นเช่นนี้ก้อนที่เป็นกลางก็พร่องอิเลคตรอนไปบ้าง เลยปรากฏว่าถูกประจุไฟฟ้าบวกเพราะโปรตอนเด่นขึ้น ส่วนก้อนที่ใช้ประจุเมื่อได้รับอิเลคตรอนเพิ่มขึ้นบ้าง โปรตอนก็เด่นน้อยลง และปรากฏเป็นอำนาจไฟฟ้าบวกน้อยลง เพราะเอาไปใช้ประจุก้อนอื่นเสียบ้าง.

เวลาเอาไฟฟ้าลบมาประจุก้อนวัตถุที่เป็นกลางโดยการกระทบ อิเลคตรอนจากก้อนที่ใช้ประจุวิ่งเข้าไปอยู่ในก้อนที่เป็นกลางเสียบ้าง เพราะก้อนที่เอามาประจุเป็นลบนั้นแปลว่าเกินอิเลคตรอน เมื่อเป็นเช่นนี้ก้อนที่เป็นกลางก็แสดงอำนาจลบ ส่วนก้อนที่ใช้ประจุมีจำนวนอิเลคตรอนที่เกินน้อยเข้า เลยปรากฏเป็นอำนาจไฟฟ้าลบน้อยลงเพราะเอาไปใช้ประจุก้อนอื่นเสียบ้าง.

เมื่อประจุก้อนที่เป็นกลางโดยการกระทบ ก้อนที่เป็นกลางได้ประจุประจำติดตัวซึ่งเราให้ชื่อว่าฟรีชาร์จ และต่างกับอินดิวส์ตชาร์จซึ่งเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวโดยการชักนำ อิเลคตรอนถูกต่อให้ไปรวมกันอยู่ที่ด้านส่วนหนึ่งของก้อนที่เป็นกลาง แต่ก็คงอยู่ในก้อนเดียวกันนั่นเอง.

๑๐. ศักย์ คำว่าศักย์ได้เริ่มนำมาใช้ในเรื่องทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดฟลูอิดเดียว โดยให้ความหมายเปรียบเทียบกับระดับของน้ำ หรือความดันของแกส หรืออุณหภูมิของความร้อน และเรานึกเข้าใจเอาทำนองเดียวกันว่าไฟฟ้าไหลจากศักย์สูงมายังศักย์ต่ำ.

บางตำราเรียกศักย์ว่า **ความดันไฟฟ้า** (electric pressure) หรือ **ความดึงไฟฟ้า** (electric tension) เช่นพูดว่าความดันไฟฟ้าตามบ้านเท่ากับ ๑๐๐ วอลต์ และที่สายรถรางเท่ากับ ๕๐๐ วอลต์.

ถ้าพูดตามทฤษฎีอิเลคตรอนน่าจะเป็นความดันมากกว่า เพราะเกิดจากอิเลคตรอนเบียดและผลักกัน ทำนองอากาศโดนและเบียดกันในยางในฟุตบอลล์ อิเลคตรอนกระจายออกจากแถบที่มีอิเลคตรอนออเบียดกันอยู่มากไปหาแถบที่มีอิเลคตรอนเบียดกันน้อยกว่า นักเรียนจะชอบพูดอย่างไหนก็ได้ แต่ขออย่าลืมว่าตัวพูดถึงทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดฟลุอิดเดียวหรือทฤษฎีอิเลคตรอน จะใช้ทฤษฎีไหนก็ใช้ให้ตลอดอย่าให้ปนกัน ประเดี๋ยวจะเกิดยุ่งกลางคัน.

๑๑. **หลักของบั๋วะซอง** บั๋วะซองได้ตั้งหลักไว้มีใจความว่าวัตถุที่ประจุชาร์จ จะเป็นก้อนเดียว หรือหลายก้อนแต่มีตัวนำโยงติดต่อถึงกันก็ตาม ศักย์จะเฉลี่ยจนเท่ากันทั่วหมดทั้งก้อน ใจความอันนี้ถ้าจะแปลเป็นภาษาอิเลคตรอนก็ว่า อิเลคตรอนในตัวนำจะพยายามดันกันจนเฉลี่ยความดันระหว่างอิเลคตรอนเสมอทั่วกันหมด ทำนองอากาศในยางในฟุตบอลล์ทำให้ยางตึงเท่ากันหมด.

คำเตือน สำหรับวัตถุที่เป็นฉนวน ความจริงออกจะแย้งหลักของบั๋วะซองอยู่บ้าง เพราะอิเลคตรอนกระจายออกไม่สะดวกหรือกระจายออกแทบไม่ได้เสียเลย.

สำหรับแผ่นดินเราถือว่าศักย์เป็นศูนย์เสมอ แต่ทั้งนี้มิได้แปลว่าแผ่นดินไม่มีศักย์เสียเลย ตรงกันข้ามเราหมายความว่าไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเท่าที่มีประจุอยู่ตามก้อนวัตถุต่าง ๆ จะเอาไปเติมหรือจะเอาออกมาจากแผ่นดิน ย่อมไม่ได้ทำให้แผ่นดินเปลี่ยนฐานะในเรื่องอำนาจไฟฟ้าให้เห็น ศักย์ของแผ่นดินเป็นปกติอยู่อย่างไรก็คงเป็นปกติเป็นศูนย์อยู่อย่างนั้น ซึ่งถ้าจะเปรียบก็เหมือนกับน้ำในมหาสมุทร เราเทน้ำเติมไปสองสามปี๊บหรือตักน้ำขึ้นมาสองสามปี๊บจะไม่ทำให้ระดับทะเลผิดแปลกขึ้นเลย ระดับยังคงเป็นปกติอยู่เช่นนั้น.

๑๒. **ศักย์กับประจุ** สองศัพท์นี้หมายความต่างกัน แต่เป็นสิ่งที่ต้องติดต่อ

กันและเป็นเสมือนเงาตามตัวซึ่งกันและกัน มีศักย์ก็ต้องมีประจุ ถ้าไม่มีอย่างหนึ่งจะมีอีกอย่างหนึ่งไม่ได้.

ศักย์หมายถึงส่วนต่างกันระหว่างฐานะหรือระหว่างระดับ ฝ่ายประจุหมายถึงจำนวนที่ต่างกัน.

น้ำสองแห่งระดับอาจต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นครึ่งเซ็นติเมตร แต่จำนวนน้ำอาจต่างกันมากมายเป็นหมื่นเป็นแสนปี๊บ บางคราวระดับอาจต่างกันมากตั้งสิบเมตร แต่จำนวนน้ำต่างกันเพียงสองสามหยด สุดแต่ที่ขังน้ำเป็นทะเลสาปหรือถังเล็ก ๆ หรือเป็นหลอดมีรูเท่าเส้นผม.

พูดตามทฤษฎีอีเลคตรอน ศักย์หมายถึงความดันที่เกิดจากแรงผลักหรือแรงเบียดระหว่างอีเลคตรอน ส่วนประจุหมายถึงจำนวนอีเลคตรอนในก้อนวัตถุที่มากหรือน้อยกว่าจำนวนโปรตอนในก้อนนั้น.

ที่ไหนมี **ประจุอิสสระ** (free charge) ที่นั้นก็มี **ศักย์อิสสระ** (free potential) ที่ไหนมี **ประจุโดยการชักนำ** (induced charge) ที่นั้นมี **ศักย์โดยการชักนำ** (induced potential).

๑๓. **อีเลคโตรสโคปแผ่นทองเปลว** (gold leaf electroscope) อีเลคโตรสโคปที่ไวกว่าและใช้เพราะหลายกว่าชะนิดที่ทำด้วยไส้โสนคือชะนิดที่ทำด้วยแผ่นทองเปลว ซึ่งเรียกกันว่าอีเลคโตรสโคปแผ่นทองเปลว วิธีทำใช้แผ่นทองเปลว ๒ แผ่นติดปลายลวดขนาดใหญ่ให้แผ่นทองเปลวห้อยยาวเท่ากัน แล้วหย่อนลงไปในขวดแก้วเพื่อกันไม่ให้กระแสลมและความชื้นเข้าไปถึง ที่ปากขวดมีแผ่นฉนวนผนึกให้สนิท และตรงกลางแผ่นมีรูรับพอให้ก้านลวดลอดขึ้นมาได้ เมื่อเอาวัตถุที่ประจุไฟฟ้าแล้วแม้แต่เล็กน้อยเข้าใกล้ก้านลวดที่โผล่พ้นฝาขวด แผ่นทองจะอ้าออกจากกันทันที.



รูป ๓๒

การประจุอิเลคโตรสโคปมีทำกัน ๒ วิธี.

(๑) **ประจุโดยการกะทบ** (charge by contact) คือนำวัตถุที่ประจุแล้วมากะทบปุ่มอิเลคโตรสโคป แล้วยกวัตถุออกไปให้พ้น อิเลคโตรสโคปจะได้รับประจุชนิดเดียวกัน เช่นวัตถุมีประจุบวกซึ่งแปลว่าพร่องอิเลคตรอน พอกะทบปุ่มอิเลคโตรสโคป อิเลคตรอนในอิเลคโตรสโคปก็วิ่งเข้าไปหาวัตถุนั้น และเมื่อยกวัตถุออกไปให้พ้น อิเลคโตรสโคปก็พร่องอิเลคตรอนไปบ้าง เลยแสดงอำนาจเป็นบวก ถ้าวัตถุมีประจุลบซึ่งแปลว่ามีอิเลคตรอนเกินกว่าโปรตอน พอกะทบปุ่มอิเลคโตรสโคป อิเลคตรอนก็วิ่งจากวัตถุเข้าไปหาอิเลคโตรสโคป และเมื่อยกวัตถุนั้นออกไปให้พ้น อิเลคโตรสโคปก็มีอิเลคตรอนเกินกว่าโปรตอนและแสดงอำนาจเป็นลบ.

(๒) **ประจุโดยการชักนำ** (Charge by Induction) คือใช้วัตถุที่ประจุแล้วเข้ามาล่อให้ใกล้ปุ่มอิเลคโตรสโคป (แต่อย่าให้ชิดจนกะทบ) ขณะที่ล่ออยู่แผ่นทองเปลวกางอ้าออก จงรีบเออร์ทอิเลคโตรสโคปโดยใช้มือแตะที่ปุ่มแล้วรีบตัดเออร์ท (เอามือออกจากปุ่ม) และยกก้อนวัตถุที่ใช้ล่อออกไปให้พ้นให้พร้อมกัน อิเลคโตรสโคปจะได้รับประจุอิสสระและเป็นประจุคนละชนิดกับวัตถุที่ใช้ล่อ เมื่อแรกเออร์ทแผ่นทองจะหุบทันที แต่พอตัดเออร์ทเกิดประจุอิสสระ แผ่นทองอ้าออกได้.

สมมุติว่าใช้วัตถุมีประจุชนิดบวกเอามาล่อซึ่งแปลว่าวัตถุนั้นพร่องอิเลคตรอน เมื่อเข้าใกล้อิเลคโตรสโคปซึ่งเป็นกลางคืออิเลคตรอนกระจายอยู่ทั่วเท่ากับโปรตอน ก็ล่ออิเลคตรอนในอิเลคโตรสโคปมาออกันอยู่ที่ปุ่ม ที่แผ่นทองก็มีอิเลคตรอนน้อยไปและแสดงอำนาจบวกชั่วคราว พอเราเออร์ทอิเลคโตรสโคปแผ่นทองจะหุบทันที โดยอิเลคตรอนจากโลกและจากมือเราวิ่งไปเพิ่มที่แผ่นทองจนครบและเป็นกลาง พอเราตัดเออร์ทและยกวัตถุที่ล่อไปเสีย อิเลคตรอนที่ถูกล่อออกันอยู่ที่ปุ่มกระจาย

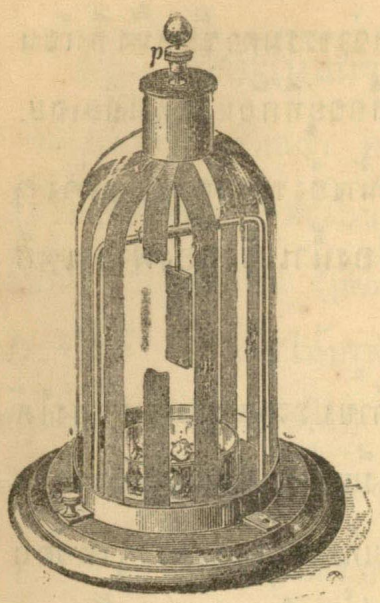
เฉลี่ยกันใหม่ทั่วอิเลคโตรสโคป ทำให้อิเลคโตรสโคปมีประจุอิสสระเป็นลบ ขณะที่อิเลคตรอนถูกล่อรวมอยู่ที่บุ้มบางคนก็ให้ชื่อว่า ประจุชะนิดถูกล่อ (bound charge).

ถ้าใช้วัตถุมีประจุชะนิดลบเอายาล่อ วัตถุนั้นเกินอิเลคตรอน ก็เกิดผลักอิเลคตรอนในอิเลคโตรสโคปให้ไปรวมอยู่ที่แผ่นทอง แผ่นทองกางออกแสดงว่าเป็นลบชั่วคราว ส่วนที่บุ้มอิเลคโตรสโคปพร่องอิเลคตรอนไปบ้าง พอเราเออร์ทอิเลคโตรสโคปแผ่นทองจะหุบทันทีโดยอิเลคตรอนจากแผ่นทองหนีเข้าน้ำมือเราลงไปสู่โลก ครั้นเราตัดเออร์ทและยกวัตถุที่ใช้ล่อนั้นไปให้พ้น อิเลคตรอนกระจายเฉลี่ยกันใหม่ทั่วอิเลคโตรสโคป ทำให้อิเลคโตรสโคปพร่องอิเลคตรอนและมีประจุอิสสระเป็นบวก.

อิเลคโตรสโคปมีประโยชน์ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับสอบชะนิดของประจุในวัตถุได้ โดยในขั้นต้นประจุอิเลคโตรสโคปให้เกิดประจุอิสสระเสียก่อนและต้องรู้ด้วยว่าประจุอิสสระที่ประจุนั้นเป็นประจุชะนิดใด เมื่อนำวัตถุที่สงสัยเข้าใกล้ ถ้าแผ่นทองกางมากเข้า วัตถุนั้นมีประจุชะนิดเดียวกันกับในอิเลคโตรสโคป ถ้าแผ่นทองหุบวัตถุมีประจุคนละชะนิด เรื่องทั้งหมดนี้นักเรียนต้องคิดถึงเรื่องการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนให้เข้าใจ.

อิเลคโตรสโคปจะใช้เป็นเครื่องมือสำหรับเปรียบเทียบศักย์ก็ได้ ขั้นต้นทำให้อิเลคโตรสโคปเป็นกลางเสียก่อน แล้วใช้ลวดต่อจากอิเลคโตรสโคปถึงวัตถุที่จะเทียบศักย์คราวละหน อันไหนทำให้แผ่นอิเลคโตรสโคปกางมากกว่ากันอันนั้นก็มีศักย์มากกว่า.

อิเลคโตรสโคปที่พูดมานี้ง่ายหรือลับเพราะเกินไป เวลาใช้เข้าจริงไม่ไวและคลาดดังที่พูด เช่นเวลาจะประจุอิเลคโตรสโคปโดยการกะทบ ประจุไม่ได้เร็วทันใจเมื่อเอาวัตถุที่ใช้ประจุให้กะทบบุ้มอิเลคโตรสโคปแผ่นทองอ้าออก แต่พอยกวัตถุออกไปให้พ้น แผ่นทองหุบเสียอีกแสดงว่าไม่มีประจุอิสสระเหลือติดอยู่ เท่ากับเป็น



รูป ๓๓

เพราะประจุโดยการชักนำส่งไปถึงผิวแก้วข้างขวดแล้ว รบกวนกับแผ่นทองในอิเลคโตรสโคป ถ้าจะให้ไว คือ พอให้วัตถุที่ใช้ประจุถูกบุ่มแล้วยกออกก็ให้มีประจุอิสสระเหลือติดอยู่ที่อิเลคโตรสโคปทันที จำเป็นต้องหาวิธีทำให้ผิวแก้วข้างขวดเป็นกลางจริง ๆ ไม่มีประจุคั่งอยู่ เรามักใช้แผ่นโลหะติดไว้กับข้างขวดสำหรับจะได้เออร์ทได้ ไม่ปล่อยให้ประจุโดยการชักนำคั่งอยู่ได้ หรือมิฉะนั้นก็เลิกใช้ขวดแก้ว ใช้หีบโลหะทำอิเลคโตรสโคปเพื่อได้ใช้ตัวหีบเออร์ทได้โดยตรง หีบไม่ควรให้ทึบหมดทุกด้าน ควรเปิดไว้สัก ๒ ด้านเสียใช้กรุด้วยแผ่นกระจกจะได้มองแลเห็นข้างใน.

๑๔. **การทดลองของฟาราเดย์** จงเอาลวดเล็กๆโยงจากกะป๋องทองแดงกว้างราว ๗ ซม. สูงราว ๑๕ ซม. แล้วต่อไปให้ถึงอิเลคโตรสโคปหรือจะเอากะป๋องทองแดงวางบนอิเลคโตรสโคปก็ได้.

เอาไฟฟ้าบรรจุก้อนโลหะแล้วใช้ฉนวนจับก้อนโลหะนั้นห้อยลงไปในกะป๋อง แต่อย่าให้กะทบกะป๋อง แผ่นอิเลคโตรสโคปจะกางออก และเมื่อย้ายก้อนโลหะไปมาตามที่ว่างในกะป๋อง แผ่นอิเลคโตรสโคปก็คงกางอยู่เท่าเดิมเสมอ ก้อนโลหะประจุกะป๋องโดยการชักนำ (ถ้าย้ายก้อนโลหะมาอยู่ใกล้ปากกะป๋องตอนบนแผ่นอิเลคโตรสโคปจะหุบลงบ้างเล็กน้อย ต้องแขวนอยู่ลึก ๆ).

ทีนี้ลองให้ก้อนโลหะกะทบกะป๋อง แผ่นอิเลคโตรสโคปคงอ้าเท่าเดิม แต่คราวนี้กะป๋องได้รับประจุอิสสระ.

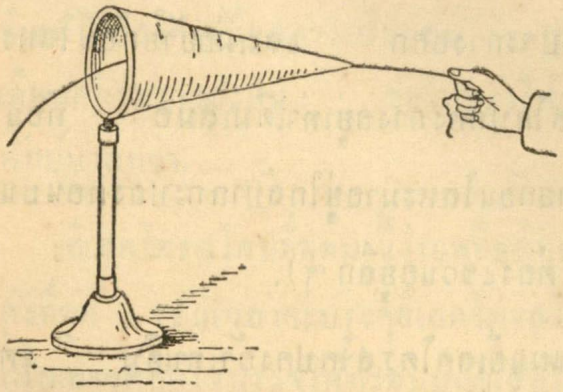
การประจุกะป๋องโดยการกะทบที่ข้างในมีเรื่องแปลกกว่าธรรมดาข้อหนึ่งที่ก้อนโลหะกายประจุให้แก่กะป๋องจนหมดเกลี้ยง ไม่มีประจุเหลืออยู่ที่ก้อนโลหะเลยเลย.

ฟาราเดย์เป็นผู้แรกทดลองเรื่องนี้โดยใช้กะป๋องสำหรับใส่น้ำแข็งธรรมดาขนาดต่าง ๆ กันมาทดลอง จึงขนานชื่อคิดปากว่า **การทดลองโดยกะป๋องน้ำแข็งของฟาราเดย์** (Faraday's ice pail experiment).

สิ่งสำคัญที่ได้จากการทดลองนี้คือเราได้วิธีที่จะให้วัตถุถ่ายประจุจนหมดเกลี้ยงได้ และโดยวิธีเดียวกันนี้เราสามารถประจุวัตถุให้ได้รับประจุเป็นกี่เท่าของจำนวนที่เราต้องการได้พอดีกับอีกอย่างหนึ่งเราใช้วิธีนี้สำหรับเปรียบเทียบจำนวนประจุในวัตถุต่าง ๆ ได้ ที่แล้วมาเราใช้อิเลคโตรสโคปแต่สำหรับเปรียบเทียบศักย์เท่านั้น.

การทดลองโดยวิธีนี้ช่วยให้เราพิสูจน์ความจริงที่ว่าไฟฟ้าบวกและไฟฟ้าลบเกิดขึ้นพร้อมกันและเกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่ากันได้ โดยเอาวัตถุที่ใช้ถูกับวัตถุที่ถูกถูมาใส่ในกะป๋องของฟาราเดย์คราวละหน แล้วสังเกตดูว่าแผ่นอิเลคโตรสโคปจะกางออกคราวละเท่ากันหรือไม่.

๑๕. ทฤษฎีบทของบิโอต์ (Biot's theorem) ประจุอิสระในวัตถุต่าง ๆ ไม่ว่าจะมีรูปตันหรือกลวงข้างในอย่างกะป๋องก็ตาม ย่อมเฉลี่ยอยู่แต่ผิวนอกเท่านั้น.



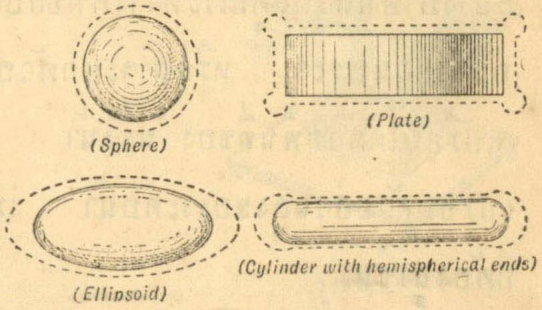
รูป ๓๔

บิโอต์เคยทดลองโดยเอาไฟฟ้าประจุถุงผ้าลินินมีรูปร่างอย่างถุงจับผีเสื้อ เมื่อประจุแล้ว เอามาลองกับอิเลคโตรสโคป และพบประจุอยู่แต่ที่ส่วนพื้นนอกของถุงเท่านั้น ครั้นกลับถุงเสียให้พื้นนอกกลับข้างใน ประจุหมดไปทันทีและปรากฏอยู่ที่พื้นที่กลับมาเป็นนอกใหม่.

๑๖. **ความแน่นผิว** จำนวนประจุที่มีเฉลี่ยอยู่ตามผิววัตถุตามพื้นที่จำกัด (หน่วยพื้นที่) เรียกว่า **ความแน่นผิว** (surface density) คูลอมบ์เป็นผู้ทดลองเรื่องนี้โดยใช้แผ่นโลหะแบนๆ มีด้ามฉนวนสำหรับจับแผ่นโลหะนี้ เครื่องมือนี้ชื่อเรียกว่า **ปรูฟเพลน** (proof plane) คูลอมบ์ใช้ปรูฟเพลนนาบบนพื้นวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า เมื่อให้ปรูฟเพลนได้รับประจุโดยการกะทบ แล้วยกปรูฟเพลนมาทดลองกับอิเลคโตรสโคป โดยวิธีนี้ปรูฟเพลนย่อมได้รับประจุจากพื้นที่เท่ากันทุกคราว ฉะนั้นเราจึงเทียบความแน่นผิวได้ถูกต้อง ผลของการทดลองคูลอมบ์แสดงว่า.

(๑) ถ้าวัตถุเป็นรูปทรงกลม จำนวนประจุตามพื้นวัตถุเฉลี่ยเท่ากันทุกแห่ง.

(๒) ถ้าวัตถุมีรูปทรงกะบอก จำนวนประจุรวมกันมากตามส่วนโค้งตอนปลาย.



รูป ๓๕

(๓) วัตถุมีรูปเป็นเหลี่ยม จำนวนประจุรวมกันอยู่มากที่ใกล้เหลี่ยมหรือสัน.

(๔) ถ้าวัตถุมีรูปปลายแหลม จำนวนประจุยิ่งรวมกันอยู่ที่ปลายแหลมมากที่สุด.

เหตุผลของเรื่องนี้จงฟังคำอธิบายจากปากครูที่สอนดีกว่าจะอธิบายด้วยตัวหนังสือ.

๑๗. **ความจุไฟฟ้า** (electrostatic capacity) ความจุในที่นี้นักเรียนต้องคิดให้เข้าใจว่ามีความหมายอย่างไรแน่ แล้วจึงจะจำได้แม่นไม่ลืม ควรคิดหาเหตุผลจากผลของการทดลองต่อไปนี้ เอาแผ่นดีบุกอย่างบางกว้างประมาณ ๑๐ ซม. ยาว ๓๐ ซม. ห้อยติดกับแท่งแก้ว และเมื่อหมุนแท่งแก้วแล้วจะม้วนแผ่นดีบุกได้

ด้วย ใช้ลวดเล็กๆโยงจากปลายต่างของแผ่นดีบุก ไปถึงอิเลคโตรสโคบ ประจุแผ่นดีบุกด้วยวิธีใดก็ได้ ให้แผ่นดีบุกได้รับประจุอิสระ แผ่นอิเลคโตรสโคบจะกางออก คราวนี้ค่อยๆม้วนแผ่นดีบุกตอนบนที่ติดกับแท่งแก้ว ส่วนที่ห้อยอยู่ตอนล่างจะหดเหลือน้อยเข้าๆ ในขณะเดียวกันนี้แผ่นอิเลคโตรสโคบจะกางออกมากขึ้นทุกที ซึ่งแสดงว่าศักย์บนแผ่นดีบุกมากขึ้นด้วย.

จำนวนประจุของแผ่นดีบุกคงเท่าเดิม แต่เมื่อแผ่นเล็กลง ความจุก็น้อยเข้า เพราะฉะนั้นเพื่อจะให้จำนวนประจุคงเท่าเดิม ศักย์ก็ต้องมากขึ้น พูดอย่างภาษาเลขผลคูณระหว่างศักย์กับความจุต้องคอยแก้กันให้เป็นจำนวนตายตัวคือเท่ากับจำนวนประจุ หรือถ้าจะยกตัวอย่างของจริงอย่างอื่นเอามาเปรียบเทียบ ความจุเปรียบได้ด้วยพื้นที่ของ น้ถังน้ำ จำนวนประจุเปรียบด้วยจำนวนน้ำในถัง ศักย์เปรียบด้วยส่วนสูงของระดับน้ำ เมื่อก้นถังเล็กลงและจะให้คงจุน้ำเท่าเดิม ระดับก็ต้องสูงขึ้น.

ฉะนั้นถ้า Q = จำนวนประจุ

V = ศักย์

C = ความจุ

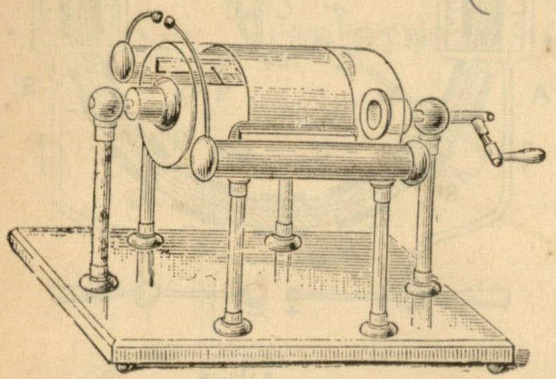
แล้ว $Q = CV$

หรือ $C = \frac{Q}{V}$

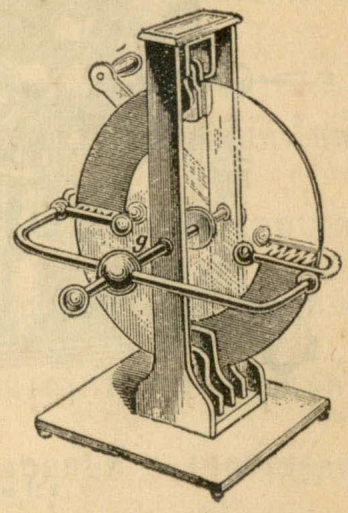
๑๔. **เครื่องสำหรับทำไฟฟ้า** เครื่องมือที่ใช้ทำให้เกิดไฟฟ้าเราเรียกว่า **เครื่องทำไฟฟ้า** (electrical machine) เครื่องมือพวกนี้มีหลักประกอบขึ้นต่างกันเป็น ๒ ชนิดคือพวกทำให้เกิด **ไฟฟ้าโดยการขัดสี** (frictional machine)พวกหนึ่ง กับพวกทำให้เกิด **ไฟฟ้าโดยการล่อ** (influence machine) พวกหนึ่ง.

(๑) **เครื่องทำไฟฟ้าโดยการขัดสี** อาศัยหลักอย่างเดียวกันกับเอาแพรหรือ

สักหลาดถูแก้ว และเพื่อจะให้เกิดประจุได้มาก ๆ แทนจะใช้แท่งแก้ว เราใช้แผ่นแก้วหรือกะบอกแก้วให้โตเพื่อได้พื้นที่มาก มีด้ามสำหรับทำให้กะบอกหมุนได้และใช้สักหลาดหรือของอื่นทาบบนพื้นแก้วที่หมุนจะได้ถูกันเกิดไฟฟ้า.



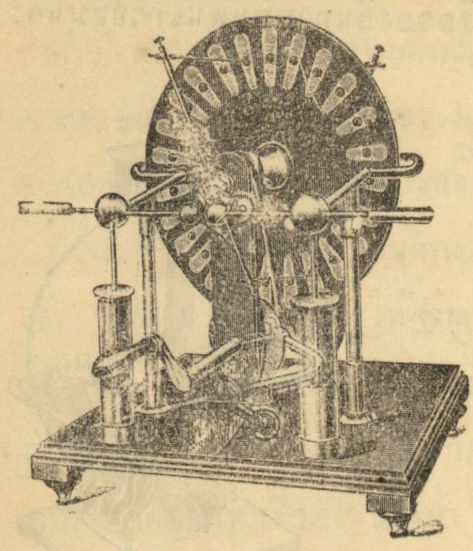
รูป ๓๖



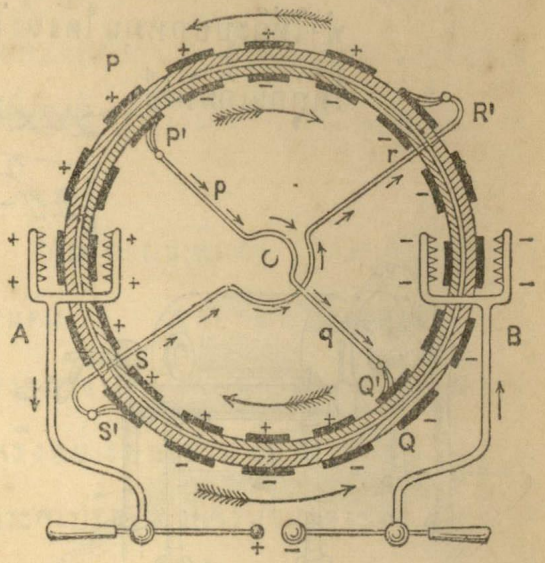
รูป ๓๗

(๒) **เครื่องทำไฟฟ้าโดยการล่อ** มักใช้แผ่นแก้วหมุนใกล้ ๆ กันแต่ไม่ให้กะทบกัน แผ่นทั้งสองที่หมุนต่อกันจนเกิดการชักนำกันขึ้น เครื่องแบบนี้หมุนได้คล่องและออกแรงน้อยกว่าแบบที่ถูกน และได้ไฟแรงดีกว่า เกิดประกายไฟได้ยาวตั้ง ๖ นิ้ว (เรื่องประกายไฟฟ้าในอากาศถ้าจะให้เกิดประกายยาว ๑ นิ้วต้องมีศักย์แสนวอลต์) เครื่องในพวกนี้มีนิยมกันหลายแบบ เช่น **แบบโทเอแปลร์** (Toepler) หรือ **โฟสส์** (Voss) **แบบโฮลต์ส** (Holtz) และ **แบบวิมส์เฮิสต์** (Wimshurst) เครื่องแบบวิมส์เฮิสต์ประกอบด้วยแผ่นแก้วกลมและแบนสองแผ่นวางขนานใกล้กันและบนแกนเดียวกัน แผ่นแก้วกะทบกันไม่ได้และหมุนรอบตัวสวนทิศกัน บนพื้นแก้วด้านที่อยู่ใกล้กันมีแผ่น

โลหะบาง ๆ ติดอยู่ที่ใกล้ขอบเป็นระยะเท่ากันทั้งสองแผ่น โลหะที่อยู่ตรงกันข้ามดูดล่อกัน เวลาหมุนแผ่นแก้ว มีแปรงทองเหลืองถู



รูป ๓๘



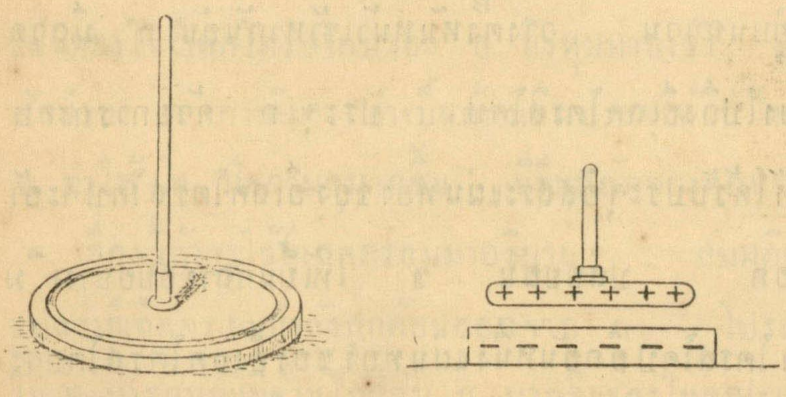
รูป ๓๙

แผ่นโลหะเพื่อให้เกิดไฟฟ้า แผ่นโลหะทางซีกครึ่งหนึ่งของแผ่นแก้วมีชาร์จอย่างหนึ่ง ทางซีกอีกครึ่งหนึ่งมีชาร์จอีกอย่างหนึ่ง ชาร์จบนแผ่นโลหะเหล่านี้เก็บเอาไปใช้ได้ ตามรูป ๓๙ วงกลมขอบในสมมุติว่าเป็นแผ่นแก้วอันอยู่ข้างหน้าในรูป ๓๘ รอยขีดดำ ๆ คือแผ่นโลหะที่ติดอยู่บนแผ่นแก้ว วงกลมขอบนอกสมมุติว่าเป็นแผ่นแก้วอันอยู่ข้างหลังและรอยขีดดำ ๆ คือแผ่นโลหะที่ติดอยู่บนแผ่นแก้ว.

สมมุติ S′R′ ให้เป็นลวด อันที่ระแผ่นโลหะบนแก้วแผ่นหน้า สมมุติ P′Q′ ให้เป็นลวดอันที่ระแผ่นโลหะบนแก้วแผ่นหลัง ขณะที่แผ่นแก้วหมุนสวนกันตามลูกศร สมมุติว่าแผ่นโลหะตอนบนของแก้วแผ่นหลังมีชาร์จบวกเล็กน้อย (คือก่อนตั้งต้นหมุนเราเอาแท่งแก้วอื่นถูด้วยแพรแล้วเอามาทาบแผ่นโลหะตอนบนนั้น) เมื่อแผ่นโลหะเหล่านั้นหมุนมาที่ตรงกับ P′ ก็จะล่อแผ่นโลหะ ที่ P′ กำลังระอยู่ให้เป็น

ลบและต่อให้แผ่นโลหะที่ Q′ กำลังระอยู่ให้เป็นบวก แผ่นโลหะที่ P′ พ้นมาแล้วคงเป็นลบ และคงต่อแผ่นตรงข้ามที่หมุนมาถึง ระให้เป็นบวก ส่วนแผ่นโลหะที่พ้น Q′ มาแล้วคงเป็นบวก ก็ต่อแผ่นตรง ข้ามที่ S′ ระให้เป็นลบ เมื่อหมุนแผ่นแก้วให้เรื่อยไปแผ่นโลหะที่หมุนเข้าหาหวีสำหรับต่อเก็บชาร์จทางขวามือก็เป็นลบทั้งสองแผ่นแก้ว และโลหะที่หมุนเข้าหาหวีสำหรับต่อเก็บชาร์จทางซ้ายมือก็เป็นบวกทั้งสองแผ่นแก้ว.

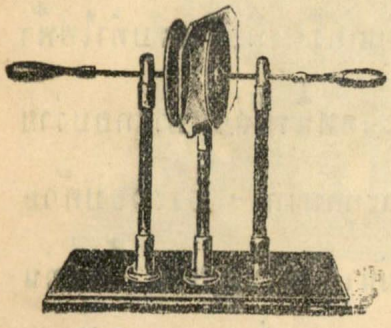
๑๙. **อีเลคโตรฟอรัส** (electrophorus) เป็นเครื่องมือสำหรับทำไฟฟ้าชะนิดหนึ่งมีส่วนประกอบง่ายและถูกมาก ประกอบด้วย แผ่นเอโบไนตกลมเป็นแท่นวางอยู่กับที่ เวลาใช้จงทำให้แผ่นเอโบไนตนั้นได้รับประจุอิสสระ โดยหาอะไรมาถูเช่นเอาสักหลาดมาถูก็จะได้ประจุอิสสระเป็นลบ แล้วใช้แผ่นเอโบไนตที่ประจุแล้วนั้นเป็นเครื่องต่อต่อไป คือเมื่อต้องการจะได้ประจุสำหรับเอาไปใช้ที่อื่นต่อไป ก็ใช้แผ่นทองเหลืองแบนๆมีด้ามเป็นฉนวนสำหรับเอามือจับยกมาวางให้ใกล้แผ่นเอโบไนต ต่อให้แผ่นทองเหลืองเกิดประจุอิสสระโดยการชักนำโดยเอานิ้วมือแตะแผ่นทองเหลืองขณะที่อยู่ใกล้แผ่นเอโบไนต พอปล่อยนิ้วออกจากแผ่นทองเหลืองก็ยกแผ่นทองเหลืองให้ห่างออกมาจากแผ่นเอโบไนต เมื่อแผ่นทองเหลืองหมดประจุแล้วก็นำมาประจุจากแผ่นเอโบไนตโดยการต่อหรือชักนำได้อีก ทำได้เช่นนี้เสมอไปโดยแผ่นเอโบไนตไม่ต้องหมดเปลือง วิธีนี้เบาแรงและคล่องทันใจดี ได้ประจุพอทำการทดลองต่างๆได้ และพอทำให้เกิดประกายได้.



รูป ๔๐

๒๐. คอนเดนเสอร์ ตามศัพท์แปลว่าผู้รวบรวมให้อัดแน่นได้มากเข้า ในเรื่องไฟฟ้าได้แก่เครื่องมือที่จัดเป็นพิเศษให้รับประจุได้อย่างมากยิ่งกว่าตามปกติ.

วัตถุชิ้นหนึ่งย่อมมีความจุไฟฟ้าจำกัดซึ่งเปรียบได้เหมือนกับถังน้ำ แต่สำหรับเรื่องไฟฟ้าถ้าใช้วัตถุสองชิ้นวางใกล้กันจะสามารถรับประจุได้มากกว่าเมื่ออยู่โดยลำพังแต่ชิ้นเดียว.



รูป ๔๑

สมมุติว่า ก ข เป็นแผ่นโลหะแบนๆ และต่างก็ตั้งอยู่บนฉนวน วางตั้งหันหน้าเข้าหากันอัน ก มีลวดโยงไปถึงอิเลคโตรสโคป ประจุ ก ด้วยการกะทบให้ได้รับประจุอิสระแผ่นทองของอิเลคโตรสโคปจะอ้าออก ปล่อยอัน ข ให้เป็นกลางอยู่อย่างเดิม ถ้าอัน ข ถ้ามีลวดโยงถึงอิเลคโตรสโคปอีกอันหนึ่งแผ่นทองของอิเลคโตรสโคปจะอ้าเหมือนกันโดยเหตุที่อัน ข ได้ประจุโดยการชักนำ แผ่นทองเหลืองของอิเลคโตรสโคปของ ข จะแสดงประจุชนิดเดียวกันกับประจุของ ก ขณะที่อัน ข อยู่ใกล้กับอัน ก เช่นนี้จงเอาลวดอีกเส้นหนึ่งต่อจาก ข ลงดิน แผ่นทองในอิเลคโตรสโคปที่ติดต่อกับ ข จะหุบหมดทันที และแผ่นทองในอิเลคโตรสโคปที่ติดต่อกับ ก จะหุบแคบเข้า เพราะถ้า ก มีประจุ (สมมุติว่าบวก) ก ชักนำหรือล่อให้เกิดไฟฟ้าลบบนพื้นของ ข ที่ด้านอยู่ใกล้ ก และ ก ตอนหรือไล่ไฟฟ้าบวกใน ข ไปอยู่ด้านหลังไปอยู่ที่อิเลคโตรสโคป ไฟฟ้าลบใน ข ที่เกิดโดยการล่อก็ดูดไฟฟ้าบวกจากอิเลคโตรสโคปอันที่ติดต่อกับ ก ให้มาออยู่ที่ด้านหน้าของ ก มากเข้า แผ่นทองในอิเลคโตรสโคปหุบแคบเข้า คราวนี้ถ้าเอาลวดต่อจาก ข ลงดิน ไฟฟ้าบวกใน ข เลยถูกไล่ลงดินเลย เรื่องนี้ถ้าจะเอาศักย์มาช่วยอธิบาย เราให้เหตุผล

ดังนี้ เมื่อ ก ได้รับประจุอิสระแล้ว ก กับอิเลคโตรสโคปจะเกิดศักย์บวกแผ่นทองก็กางออก ข ศักย์ต่ำกว่า และถ้าต่อลงดินศักย์จะเป็นศูนย์ เมื่อ ข ยังไม่ต้องลงดินและร่น ข ให้ใกล้ ก เข้ามา ศักย์ของ ข เพิ่มขึ้น และเมื่อ ข เป็นกลางซึ่งมีศักย์ต่ำกว่า ก ครั้นร่นเข้ามาใกล้ ก ศักย์ของ ก ก็ลดน้อยลง แผ่นทองในอิเลคโตรสโคปของ ก หุบแคบเข้า ส่วนแผ่นทองในอิเลคโตรสโคปของ ข อ้ามากขึ้น.

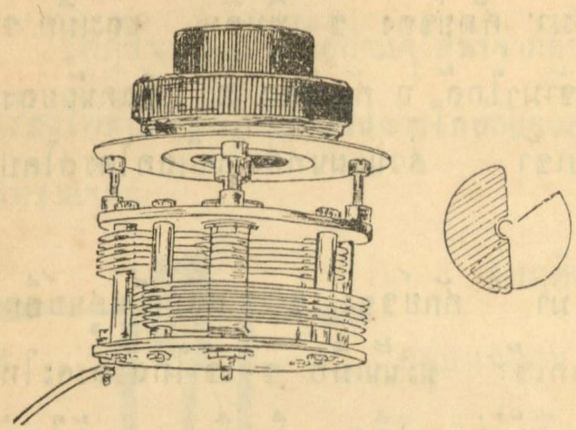
ถ้า ข ต่อลงดินขณะที่ร่นใกล้ ก เข้ามา ศักย์ของ ข กลับเป็นศูนย์อีก แผ่นทองในอิเลคโตรสโคปของ ก ยิ่งหุบมากเข้า ฉะนั้นเมื่อ ข เข้าใกล้และจะให้ศักย์ของ ก คงเดิม จำเป็นต้องเพิ่มประจุให้แก่ ก อีก คือเมื่อ ข เข้าใกล้ ข ทำให้ ก มีความจุมากขึ้น นี่คือหลักของคอนเด็นเสอร์.

เรื่องนี้ถ้าจะใช้อิเลคตรอนมาอธิบาย สมมุติว่า ก กำลังรับประจุบวกซึ่งแปลว่าอิเลคตรอนกำลังถูกดึงออกจาก ก โปรตอนใน ก ก็ชักนำอิเลคตรอนใน ข มารวมกันที่ด้านใกล้กับ ก มากขึ้นและในขณะเดียวกันเลยไล่อิเลคตรอนออกจาก ก ได้อีกหน่อย.

ก จุประจุบวกได้มากกว่าเมื่ออยู่โดดๆ โดยลำพัง ถ้าสมมุติว่า ก กำลังรับประจุลบซึ่งแปลว่าอิเลคตรอนกำลังถูกดึงให้เข้ามาอยู่ใน ก อิเลคตรอนใน ก ก็อินดิวส์หรือแบ่งไล่อิเลคตรอนใน ข ให้หนีไปรวมอยู่ที่ด้านไกลจาก ก โปรตอนใน ข ทางด้านที่อยู่ใกล้ ก ช่วยชักนำอิเลคตรอนเข้าไปอยู่ใน ก มากกว่า ก จะรับไว้ได้เมื่ออยู่โดยลำพัง.

ถ้า ข ต่อลงดินยิ่งดีขึ้น เพราะอิเลคตรอนใน ข หนีได้ไกล โปรตอนทางด้านใกล้ ก มีว่างมากขึ้นและชักนำอิเลคตรอนเข้ามาใน ก ได้มากขึ้น ส่วนในเรื่องแรกเมื่อ ก กำลังประจุบวก อิเลกตรอนจากดินเข้ามาหา ข มารวมกันอยู่ที่ด้านไกล ก ได้มากขึ้น

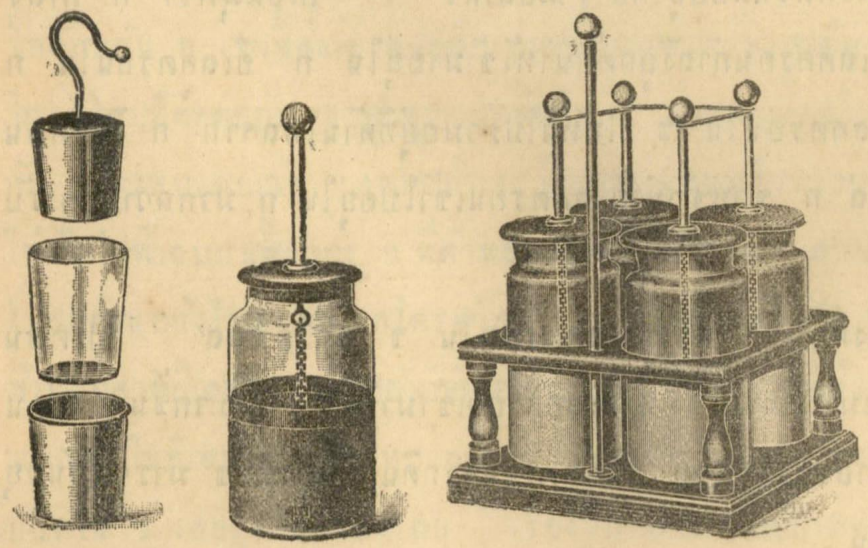
คอนเดนเสอร์อย่างง่ายๆคือใช้แผ่นโลหะ ๒ แผ่นวางใกล้ๆกันโดยใช้อากาศขั้นระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองและแผ่นโลหะวางอยู่บนฉนวน คอนเดนเสอร์เช่นนี้มักเรียกกันว่าคอนเดนเสอร์แบบ **เอปีนัส**(Aepinus) คอนเดนเสอร์ที่ใช้ในเครื่องวิทยุมักใช้แบบนี้บ่อยๆ และเพื่อให้กะทัดรัดและกินที่น้อย มักตัดโลหะเป็นแผ่นเล็กๆเรียงเป็นระยะอย่างพัดหงิดแล้วเอาสวมกันให้อากาศขั้นระหว่างพัน และหมุนให้ผิวโลหะเหลื่อมกันได้มากน้อยตามต้องการ.



รูป ๔๒

การใช้อากาศขั้นสู้ใช้ฉนวนอื่นที่เป็นกำบังไฟดีกว่าอากาศไม่ได้ เช่นใช้แผ่นแก้ว เอโบไนต หรือไมคา เพราะเราเร่แผ่นโลหะให้ต่อหรือชักนำกันได้ใกล้มาก และไฟฟ้ารั่วถึงกันไม่ได้ คงเป็นแต่ต่อกันเท่านั้น ทำให้จุได้มาก.

ถ้าจะใช้แก้วเป็นกำบังไฟฟ้า ขวดแก้วธรรมดาก็เป็นคอนเดนเสอร์ได้ดี โดยเอาแผ่นโลหะบางๆ เช่นแผ่นดีบุกห่อยาซิคาเรตกรุพนขวดทั้งข้างนอกข้างใน คอนเดนเสอร์เช่นนี้มักเรียกกันว่า **ลีเดนจาร์** (Leyden jar).



รูป ๔๓

ลีเดนจาร์ที่ใช้เป็นตัวอย่างให้นักเรียนดูในห้องเรียน และเพื่อให้ถอดออกแลเห็นส่วนประกอบได้ชัดเจน มักใช้ทำด้วยถ้วยแก้วก้นสอบเล็กน้อย และใช้ถ้วยทองเหลือง๒ใบใหญ่มีส่วนสูงขนาดเท่า

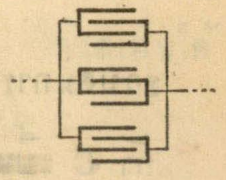
ถ้วยแก้ว ใบหนึ่งสวมนอกแก้วพอดีริ่สนิทดี อีกใบหนึ่งใส่ข้างในถ้วยให้ดีริ่สนิทเช่นกัน.

คอนเดนเสอร์ทำด้วยขวดมีรูปร่างเรียวและมีพื้นที่น้อย ที่นิยมใช้กันเป็นส่วนมากใช้แผ่นดีบุกบางๆ วางซ้อนกันและมีฉนวนเช่นแผ่นไมคาหรือกระดาษชุบปาแรฟฟีนขั้นระหว่างแผ่นดีบุก แผ่นพวกจำนวนคู่รวมเป็นพวงเดียวกันพวงหนึ่งแผ่นจำนวนคี่รวมเป็นพวงเดียวกันอีกพวงหนึ่ง.

๒๑. การต่อคอนเดนเสอร์ การต่อคอนเดนเสอร์ใช้รวมกันมีวิธีต่อใช้ต่างกันเป็น ๒ วิธี.–

(๑) **ต่อเป็นอันดับ** (in series) แผ่นโลหะอันนอกขวดของขวดใบที่หนึ่งต่อกับแผ่นโลหะอันในขวดของขวดที่สอง อันนอก ---⊏⊐⊏⊐--- ของขวดที่สองกับอันในของขวดที่สาม ฯลฯ เช่นนี้เรื่อยไป.

(๒) **ต่อเป็นขนาน** (in parallel) แผ่นโลหะอันใน



รูป ๔๔

ของทุกขวดต่อกันหมดและแผ่นโลหะอันนอกของทุกขวดต่อรวมกันหมด.

ความจุของคอนเดนเสอร์ได้ส่วนโดยตรงกับขนาดพื้นที่ของแผ่นโลหะและได้ส่วนตรงกันข้ามกับระยะระหว่างแผ่นโลหะ ดังนี้เราย่อมเพิ่มความจุได้โดยเพิ่มพื้นที่ของแผ่นโลหะก็ได้ หรือร่นระยะระหว่างแผ่นโลหะให้ใกล้กันเข้าก็ได้ แต่เรื่องหลังร่นได้ภายในระยะจำกัด ถ้าแผ่นโลหะใกล้กันมากเกินไป ไฟฟ้าก็จะโดดถึงกันได้.

การต่อคอนเดนเสอร์อย่างขนาน ความจุรวมทั้งหมดเท่ากับผลรวมของความจุของคอนเดนเสอร์เดี่ยว เพราะต่อวิธีนี้เหมือนกับเอาพื้นที่มาต่อกันให้กว้างเข้า.

การต่อคอนเดนเสอร์อย่างอันดับ ความจุรวมเท่ากับเอาจำนวนกลับเศษเป็นส่วนของความจุของคอนเดนเสอร์เดี่ยวทุกอันรวมกัน แล้วเอาไปหารหนึ่ง.

สมมุติว่าเอาประจุ Q ไปประจุแผ่นโลหะอันในของคอนเดนเสอร์อันที่หนึ่งและเกิดศักย์ V_1 สมมุติศักย์ของอันต่อๆไปเป็น V_2, V_3 ฯลฯ ประจุ Q ชักนำแผ่นโลหะอันนอกของคอนเดนเสอร์อันแรกเป็นจำนวน $-Q$ และชักนำต่อๆไปเป็นจำนวนเช่นเดียวกัน สมมุติให้ความจุของคอนเดนเสอร์เป็น C_1, C_2, C_3 ฯลฯ

สำหรับอันหนึ่งอันหนึ่ง $$Q = C_1 (V_1 - V_2)$$

$$Q = C_2 (V_2 - V_3)$$

ฯลฯ

เขียนสมการเสียใหม่ $$V_1 - V_2 = \frac{Q}{C_1}$$

$$V_2 - V_3 = \frac{Q}{C_2}$$

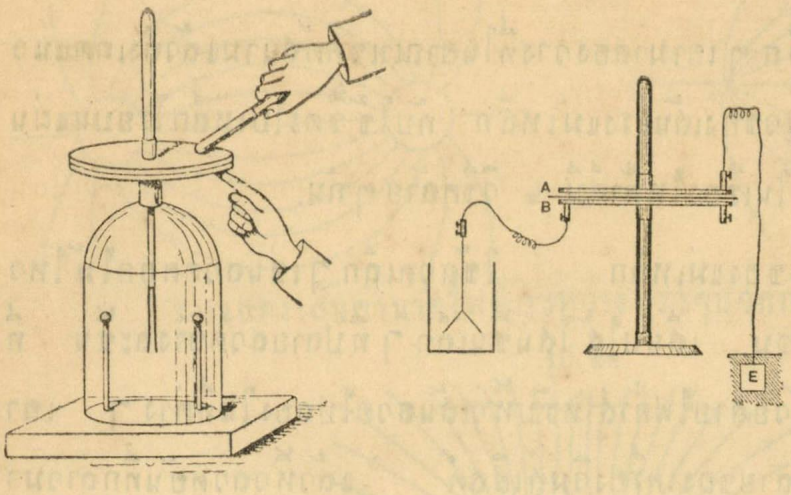
ฯลฯ

รวมสมการทั้งหมด $$V_1 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + ---- \frac{1}{Cn}\right)$$

ถ้า C เป็นความจุรวมของคอนเดนเสอร์ทั้งหมด.

คือ $$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ---------- \frac{1}{Cn}$$

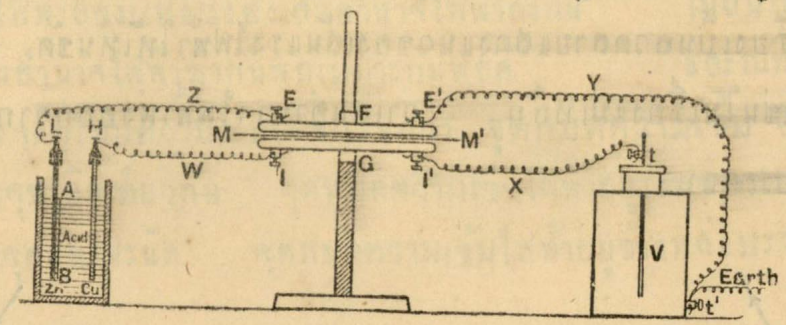
๒๒. คอนเดนสิงอีเลคโตรสโคป อีเลคโตรสโคปที่ทำด้วยแผ่นทองคำตามปกตินั้นใช้ลองได้ผลแต่สำหรับไฟฟ้าที่มีศักย์มาก ไฟฟ้าศักย์น้อยๆ อย่างไฟฟ้าเดิรทางเมื่อเอาไปลองกับอีเลคโตรสโคป แผ่นทองจะไม่อ้าออกให้เห็นได้ เมื่อเป็นเช่นนี้เราต้องหาวิธีให้อีเลคโตรสโคปไวขึ้น ที่บุมอีเลคโตรสโคปแทนที่จะเป็นบุมทรงกลมมักทำเป็นแผ่นแบน และมีแผ่นแบนอีกแผ่นหนึ่งมีขนาดเท่ากัน มีด้ามทำด้วยฉนวนอยู่ตรงกลางแผ่นสำหรับเอามือจับยกแผ่นนั้น ที่ใต้แผ่นทาน้ำมันวานิชหรือเชลแลค เพื่อเมื่อจับแผ่นวางทับแผ่นของอีเลคโตรสโคป น้ำมันวานิชจะได้เป็นกำบังไฟฟ้าระหว่างแผ่นทั้งสอง และแผ่นทั้งสองกลายเป็นคอนเดนเสอร์มีความ



รูป ๔๕

จุมากเพราะกำลังไฟฟ้าในที่นั้นบางมากแผ่นอันบนใช้ต่อกับวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า แผ่นล่างต่อลงดินโดยใช้นิ้วมือแตะสักประเดี๋ยว ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทั้งสองไม่สู้มากนักแต่โดยเหตุที่แผ่นบนมีความจุมาก จึงชักนำประจุชะนิดตรงกันข้ามมาอยู่ที่แผ่นอันล่างได้มาก และเมื่อตัดสายลงดิน (ยกนิ้วมือที่แตะแผ่นอันล่างออก) แล้วประจุอิสสระคงติดอยู่ที่แผ่นอันล่าง ครานี้ยกแผ่นอันบนออกห่างประจุที่ต่อรวมอยู่ที่แผ่นอันล่างก็เฉลี่ยลงมาที่แผ่นทอง แผ่นทองจึงอ้าออกให้เห็น.

อีเลคโตรสโคปที่ดัดแปลงเช่นนี้เพื่อใช้ทดลองกับไฟฟ้าศักย์น้อย ๆ ให้แลเห็นได้ชัดเรียกว่า **คอนเดนสิงอีเลคโตรสโคป** (condensing electroscope).



รูป ๔๖

๒๓. สนามไฟฟ้าและเส้นแรงไฟฟ้า ก้อนวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าย่อมดูดและผลักกันได้ทำนองแท่งแม่เหล็ก ฉะนั้นจึงย่อมมีสนามไฟฟ้าและเส้นแรงหรือหลอดแรงไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับเรื่องแม่เหล็ก.

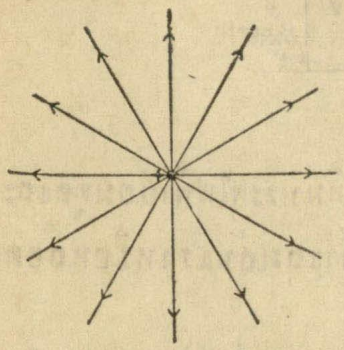
สนามไฟฟ้าก็หมายถึงอาณาเขตที่ก้อนมีประจุส่งอำนาจไฟฟ้าไปถึงได้ และคงส่งไฟฟ้าออกจากก้อนเป็นเส้น ๆ หรือเป็นหลอดเช่นแม่เหล็ก วิธีเขียนรูปแสดงเส้นแรงไฟฟ้าโดยการทดลองก็คงดำเนินเรื่องคล้อยตามวิธีของแม่เหล็ก ในเรื่องแม่เหล็ก

มี ๒ วิธี คือใช้เข็มทิศเล็ก ๆ เอามาลองวางที่ในอาณาเขตต์สนามแล้วสังเกตแนวของแท่งแม่เหล็กอันเล็กเป็นแนวของเส้นแรงแม่เหล็ก กับใช้ขี้ตะไบเหล็กโรยบนแผ่นกระดาษที่วางทับแม่เหล็ก ในเรื่องไฟฟ้าก็มี ๒ วิธีคล้าย ๆ กัน.

(๑) คล้อยตามวิธีที่ ๑ ของแม่เหล็ก ใช้ลวดเล็ก ๆ เช่นลวดดอกไม้ไหว ยาวประมาณ ๕ ซม. เสียบไส้โสนชิ้นเล็ก ๆ ที่ปลายลวดข้างละชิ้น ที่กลางเส้นลวดผูกด้วยสายไฟฟ้าสำหรับหิ้วเส้นลวดไปลองในที่ต่าง ๆ เอาก้อนวัตถุโยงกับปลายของเครื่องวิมส์เฮิสต์ แล้วหิ้วลวดอันที่กล่าวมาแล้วเอามาห้อยใกล้ ๆ กับก้อนวัตถุ แนวที่ลวดนั้นตั้งอยู่อย่างไรเป็นแนวเส้นแรงไฟฟ้าณที่นั้น.

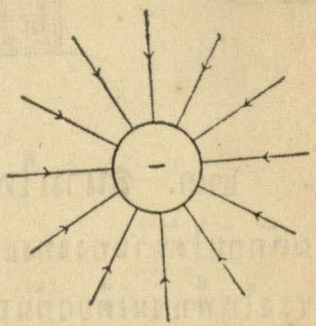
(๒) คล้อยตามวิธีโรยขี้ตะไบของแม่เหล็ก เอาแผ่นดีบุกบาง ๆ ตัดเป็นวงกลมเล็ก ๆ วางบนแผ่นกระดาษ แล้วเอาลวดโยงจากแผ่นดีบุกไปที่ปลายเครื่องวิมส์เฮิสต์ ค่อย ๆ เอาขี้เลื่อยแห้ง ๆ โรยบนแผ่นกระดาษขี้เลื่อยจะเรียงเป็นลวดลายแสดงแนวของเส้นแรงไฟฟ้าให้เห็นชัด.

เราสมมุติเช่นในเรื่องแม่เหล็ก ว่าเส้นอำนาจไฟฟ้าพุ่งออกจากประจุบวกแล้วแล่นวกเข้าหาประจุลบ.



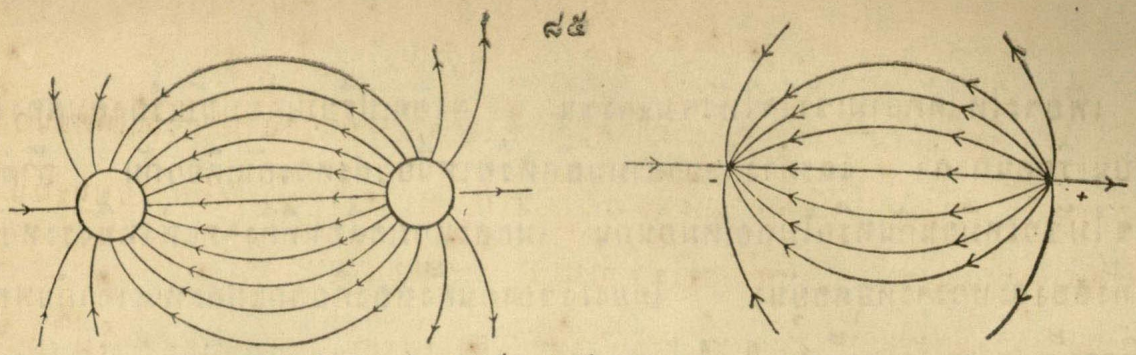
รูปแสดงเส้นอำนาจไฟฟ้าออกจากประจุบวก

รูป ๔๗



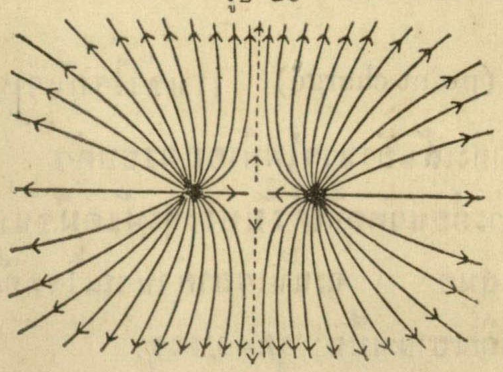
รูปแสดงเส้นอำนาจไฟฟ้าเข้าหาประจุลบ

รูป ๔๘



รูปแสดงเส้นอำนาจไฟฟ้าระหว่างประจุบวกกับประจุลบ.

รูป ๔๙



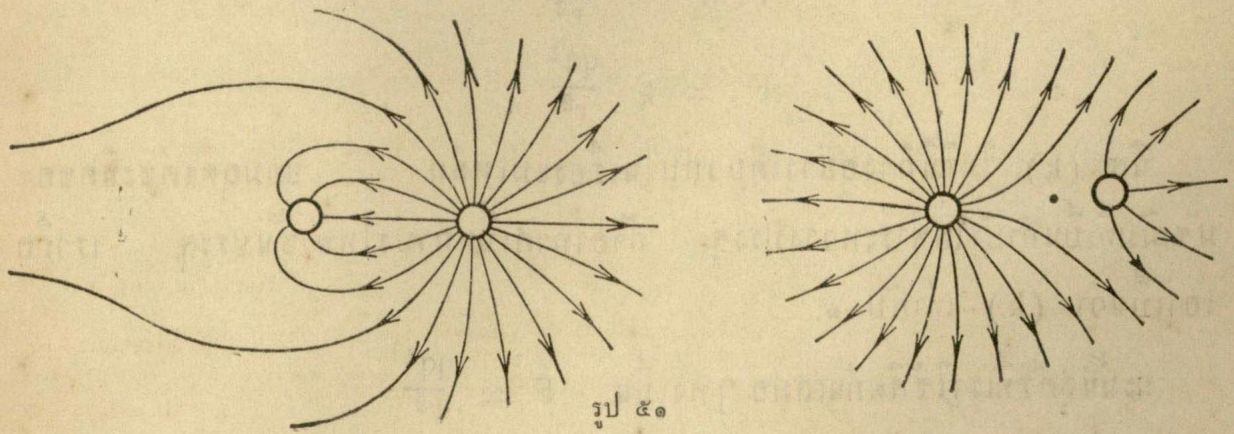
รูป ๕๐

รูปแสดงเส้นอำนาจไฟฟ้าระหว่างประจุบวกกับประจุบวก.

เมื่อมีประจุไฟฟ้าสองแห่งซึ่งส่งเส้นอำนาจไฟฟ้าถึงกัน ในสนามร่วมนั้นย่อมมีที่แห่งหนึ่งที่เส้นอำนาจไฟฟ้าฆ่ากันพอเหมาะกันพอดี และณที่นั้นไม่มีความเข้มไฟฟ้า ตรงจุดที่ไม่มีความเข้มไฟฟ้าเรียกว่า **จุดหมดความเข้ม** (null point).

สำหรับประจุชะนิดเดียวกัน จุดหมดความเข้มไฟฟ้าอยู่ระหว่างประจุทั้งสอง.

สำหรับประจุคนละชะนิด จุดหมดความเข้มไฟฟ้าอยู่ข้างหลังประจุอันที่มีกำลังน้อยกว่า.



รูป ๕๑

เพื่อจะให้ได้ความเข้าใจให้แจ่มแจ้งขึ้น จงคิดเปรียบเทียบนับเรื่องคนสองคนอยู่บนเรือคนละลำ และต่างก็พยายามผลักหรือเหนี่ยวสะหวะอันเดียวกัน ถ้าต่างก็ใช้ไม้ขอเหมือนกันหรือไม้ถ่อเหมือนกัน เมื่อสะหวะเคลื่อนที่ถึงจุดแห่งหนึ่งระหว่างคนทั้งสองสะหวะจะหยุดอยู่นิ่ง โดยแรงของคนทั้งสองที่ออกแก่สะหวะเท่ากันพอดีณที่จุดนั้น แต่ถ้าคนทั้งสองใช้ไม้คนละชะนิด สะหวะจะหยุดนิ่งณที่จุดแห่งหนึ่งอยู่ข้างหลังของคนที่มีกำลังน้อยกว่า.

๒๔. จุด—ประจุ (point-charge) เราเข้าใจกันว่าประจุไฟฟ้ารวมกันอยู่เป็นจุด ๆ และจุดหนึ่ง ๆ เปล่งเส้นอำนาจไฟฟ้าออกรอบตัว แต่ในเรื่องเช่นนี้ย่อมหาตัวอย่างของจริงไม่ได้เพราะก้อนวัตถุที่ได้รับประจุแม้แต่มีขนาดเล็กปานใดก็ยังไม่เป็นจุด ยังคงเป็นก้อนอยู่เสมอ ฉะนั้นเวลาคำนวณโจทย์เลขที่เกี่ยวกับเรื่องเช่นนี้ถ้าวัตถุก้อนเล็ก ๆ เราถือเอาว่าเป็น จุด–ประจุ.

ถ้าวัตถุที่ได้รับประจุเป็นก้อนโต โดยฉะเพาะเป็นวัตถุทรงกลม สำหรับในตอนต้น ๆ เช่นนี้ให้คำนวณโดยถือว่าประจุรวมกันเป็นจุดอยู่ที่ศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมไปก่อน.

การคำนวณแรงดูดหรือแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าคงอาศัยสูตรอย่างเดียวกับสูตรเรื่องแม่เหล็ก คือแรงดูดหรือแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าย่อมได้ส่วนตามผลคูณระหว่างประจุและได้ส่วนตรงกันข้ามกับระยะทางระหว่างประจุกำลังสอง.

$$F \propto \frac{qq^1}{r^2}$$

$$F = k \frac{qq^1}{r^2}$$

นิจ (k) ในที่นี้ก็คงอย่างเดียวกับในเรื่องแม่เหล็ก ย่อมสุดแต่ชะนิดของมัชฌิมที่เป็นกำบังไฟฟ้าระหว่างประจุ ถ้าอากาศเป็นกำบังไฟฟ้าขั้นประจุ เราถือเอาเป็นว่า (k) เท่ากับ ๑.

ฉะนั้นสูตรที่เราใช้คิดกันเสมอ ๆ คงเป็น $F = \frac{qq^1}{r^2}$

ตัวอย่าง.– (๑) จุดประจุคู่หนึ่ง ๒ หน่วยกับ ๓ หน่วยวางห่างกัน ๔ นิ้ว อีกคู่หนึ่ง ๕ หน่วยกับ ๖ หน่วยวางห่างกัน ๙ นิ้ว จงเทียบแรงผลักระหว่างจุดประจุ ๒ คู่นั้น.

$$\frac{\text{แรงระหว่างคู่ที่หนึ่ง}}{\text{แรงระหว่างคู่ที่สอง}} = \frac{\frac{2\times 3}{4^2}}{\frac{5\times 6}{9^2}} = \frac{81}{80}$$

(๒) วัตถุทรงกลมก้อนเล็ก ๆ คู่หนึ่งมีประจุ ๑๕ หน่วยกับ ๔๐ หน่วย วางห่างกัน ๑๐ ซม. (จากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางของวัตถุ) ให้หาแรงผลักระหว่างวัตถุสองก้อนนั้น.

$$F = \frac{15\times 40}{10^2} = 6 \text{ ดายน์}$$

(๓) กขคง เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กข กว้าง ๕ ซม. ขค ยาว ๑๒ ซม. ที่ ก มีประจุบวก ๑๒ $\frac{1}{2}$ หน่วย ที่ ข มีประจุบวก ๖๐ หน่วย ที่ ค มีประจุลบ ๙๖ หน่วย ให้หาแรงร่วมที่จุด ข.

ประจุที่ ก และ ข เกิดแรงผลักตามแนว กข $= \frac{12\frac{1}{2}\times 60}{5^2} = 30$ ดายน์

ประจุที่ ข และ ค เกิดแรงดูดตามแนว ขค $= \frac{60\times 96}{12^2} = 40$ ดายน์

สองแรงนี้ตั้งได้ฉากแก่กัน แรงร่วมทั้งหมด $= \sqrt{30^2\times 40^2}$

$= 50$ ดายน์

๒๕. ความจุจำเพาะสำหรับการนำของกำบังไฟฟ้า (specific inductive capacity of a dielectric)

หมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงดูดหรือแรงผลักที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุมีประจุสองก้อน เมื่ออากาศขั้นวัตถุทั้งสองเทียบกับเมื่อกำบังไฟฟ้าอย่างอื่นขั้นวัตถุทั้งสอง และต่างก็วางห่างจากกันเป็นระยะเท่ากันทั้งสองคราว.

เช่นวัตถุมีประจุสองก้อน เมื่อวางอยู่ในอากาศห่างจากกัน r หน่วยเกิดแรงผลัก x หน่วย ครั้นเอาวางในน้ำมันปาแรฟฟีนห่างจากกัน r หน่วยเหมือนกันเกิดแรงผลัก $\frac{1}{2}$ x หน่วย ดังนี้ความจุจำเพาะสำหรับการนำของน้ำมันปาแรฟฟีนเท่ากับ x เทียบกัน $\frac{1}{2}$ x คือ ๒.

และถ้าเอาวางโดยมีแท่งกำมะถันขั้นเกิดแรงผลัก $\frac{1}{4}$ x หน่วย ความจุจำเพาะสำหรับการนำของกำมะถันเท่ากับ ๔ (จำนวนที่ถูกสำหรับปาแรฟฟีน ๑.๙๒ และสำหรับกำมะถัน ๓.๙๗).

ตัวอย่าง.— วัตถุทรงกลมก้อนเล็ก ๆ คู่หนึ่งมีประจุ ๑๐ หน่วยกับ ๑๕ หน่วย เมื่อวางห่างจากกัน ๕๐ ซม. โดยใช้กำบังไฟฟ้าชะนิดหนึ่งขั้น เกิดแรงผลัก .๐๒ ดายน์ กำบังไฟฟ้านั้นมีความจุจำเพาะสำหรับการนำเท่าไร ?

ถ้าใช้อากาศขั้น ควรเกิดแรงผลัก $\frac{10 \times 15}{50^2} = .06$ ดายน์

ฉะนั้นความจุจำเพาะสำหรับการนำเท่ากับ $.06 \div .02 = 3$

หมายเหตุ อัตราส่วนนี้บางตำราก็ให้ชื่อว่า **นิจของกำบังของไฟฟ้า** (dielectric constant) และบางตำราก็ให้ชื่อว่า **การนำจำเพาะ** (specific inductivity)

๒๖. ความเข้มของไฟฟ้าที่จุดแห่งหนึ่ง (electric intensity at a point)

หมายถึงแรงดูดหรือแรงผลักที่เกิดรู้สึกขึ้น เมื่อเอาประจุหนึ่งหน่วยมาต่อณที่จุดนั้น เช่น ประจุไฟฟ้า ๑๐๐ หน่วย จะได้ความเข้มไฟฟ้าณจุดห่างจากประจุนั้น ๑๐ ซม. เป็นจำนวน ๑ ดายน์ ถ้าจุดนั้นห่างจากประจุเป็นระยะ ๕ ซม. ความเข้มไฟฟ้าณจุดนั้นก็เท่ากับ ๔ ดายน์ เราใช้คำนวณจากสูตร

$$I = \frac{q \times 1}{r^2}$$

๒๗. หน่วยสำหรับวัดศักย์ (electrostatic unit of potential) ความหมายของศักย์ไฟฟ้าจะบรรยายเปรียบเทียบกับระดับของของเหลว กับความดันของแกสกับอุณหภูมิของความร้อน ฯลฯ ก็พอเข้าใจความหมายได้ดีโดยปริยาย แต่การจะตั้งอะไรเป็นหน่วยสำหรับวัดศักย์ไฟฟ้าย่อมเข้าใจกันได้ยากกว่า เพราะต้องวัดจากจุดตั้งต้นซึ่งหาหลักได้ยาก ถ้าเพียงแต่วัดความต่างศักย์ไม่สู้ยากเท่า.

จุดสองจุดมีศักย์ต่างกัน เมื่อเอาประจุ ๑ หน่วยมาต่อที่จุดทั้งสอง จะรู้สึกเกิดแรงดูดหรือแรงผลักต่างกัน ที่จุดศักย์สูงจะรู้สึกมีแรงมากและที่จุดศักย์ต่ำจะรู้สึกมีแรงน้อยกว่า สมมุติว่าแรงที่รู้สึกเป็นแรงผลัก เมื่อเอาประจุ ๑ หน่วยวางที่จุดศักย์สูง พอปล่อยมือประจุจะถูกผลักกะเด็นห่างจากจุดนั้นออกไป จนถึงจุดศักย์ต่ำ แล้วผ่านจุดศักย์ต่ำเลยไปอีกจนถึงจุดหรืออาณาเขตต์ที่ไม่มีศักย์เลย หรือเมื่อเอาประจุ ๑ หน่วยวางที่จุดศักย์ต่ำ แล้วเราออกแรงดันประจุไปทางทิศสู่จุดศักย์สูง ประจุจะเขยิบใกล้จุดศักย์สูงเข้าไปทุกที และเราจะต้องออกแรงดันประจุมากหรือน้อยย่อมสุดแต่ความต่างศักย์ที่มีอยู่ระหว่างจุดทั้งสองนั้นว่าจะมากหรือน้อย ดังนี้เราจึงอาศัยแรงงานที่ใช้ผลักประจุสำหรับเป็นเครื่องสังเกตหรือเป็นหน่วยสำหรับวัดความต่างศักย์ได้ ถ้าต้องออกแรงดันประจุหน่วยจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งเป็นแรงงาน ๑ หน่วย ซี. จี. เอส. คือ ๑ เออร์ก เราถือว่าความต่างศักย์ระหว่างจุดทั้งสองนั้นเป็น ๑ หน่วย อี. เอส. ยู.

ตัวอย่าง.–วัตถุทรงกลมก้อนเล็ก ๆ มีประจุบวก ๕ หน่วยวางอยู่ในสนามไฟฟ้า ต้องออกแรงดันเปลืองงาน ๑๐๐๐ เออร์กจึงเคลื่อนที่ได้ไกล ๕ ซม. ให้หาความต่างศักย์ระหว่างจุดเดิมกับจุดใหม่ของวัตถุทรงกลมนั้น กับให้หาความเข้มไฟฟ้าในสนามนั้น.

ในเรื่องนี้ ถ้าออกแรงดันประจุแต่เพียงหน่วยเดียว จะเปลืองงาน

งานแรงดันเพื่อง ๑๐๐๐ ÷ ๕ = ๒๐๐ เออร์ก

ฉะนั้นความต่างศักย์ ระหว่างสองจุดนั้นเท่ากับ ๒๐๐ หน่วย.

สำหรับคำถามที่สอง เราคิดดังนี้ งานเท่ากับแรงคูณด้วยระยะทาง ในเรื่องนี้ งานเท่ากับ ๑๐๐๐ เออร์ก ระยะทางเท่ากับ ๕ ซม. ฉะนั้นแรงผลักเท่ากับ ๑๐๐๐ ÷ ๕ = ๒๐๐ ดายน์

ตามบัญญัติ ความเข้มคือแรงที่รู้สึกด้วยประจุ ๑ หน่วย แต่แรงที่รู้สึก ๒๐๐ ดายน์รู้สึกด้วย ๕ หน่วย ฉะนั้นความเข้มไฟฟ้าในสนามเท่ากับ ๒๐๐ ÷ ๕ = ๔๐ ดายน์

สำหรับหน่วยวัดศักย์เราก็คงให้คำไขไว้คล้าย ๆ กัน คือเมื่อเราออกแรงดันประจุ ๑ หน่วยจากจุดที่ไม่มีศักย์เลยจนมาถึงอีกจุดหนึ่งที่มีศักย์บ้าง ถ้าเราต้องเปลืองแรงงานไป ๑ เออร์กพอดี ที่จุดหลังถือว่ามีศักย์ ๑ หน่วยศักย์อี. เอส. ยู. นักเรียนต้องตรองดูคำพูดนี้ให้เข้าใจ ระยะทางระหว่างจุดที่มีศักย์ ๑ หน่วยกับจุดที่ไม่มีศักย์เลยห่างจากกันเท่าไร? ต้องห่างจากกันมากเหลือเกิน ห่างจากกันเป็นระยะอินฟินิตี้ ฉะนั้นเราพูดได้อีกอย่างหนึ่งว่า จำศักย์ที่จุด ๆ หนึ่งก็คือจำนวนงานที่ต้องเปลืองไปสำหรับผลักประจุ ๑ หน่วยออกไปให้พ้นจุดนั้นจนไกลถึงอินฟินิตี้

ที่พูดให้ฟังนี้นักเรียนคงจับความหมายของหน่วยศักย์ได้ แต่วิธีคำนวณจริง ๆ จะคิดกันอย่างไร? เพราะมีจำนวนอินฟินิตี้เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ลองคิดดูดังนี้ สมมุติว่าที่จุด O มีประจุ Q ที่จุด P ซึ่งห่างจาก O เป็นระยะ r จะมีศักย์เท่าไร?

ลากเส้น OP แล้วต่อ OP ออกไปถึงจุด P_1 ; P_2; P_3;..... ฯลฯ จนในที่สุดถึงอินฟินิตี้

สมมุติว่า P_1 ; P_2 ; P_3 ; ..... ฯลฯ ห่างจาก O เป็นระยะ r_1 ; r_2; r_3 ;..... ฯลฯ

ความเข้มที่ P_1 เท่ากับ $\frac{Q}{r_1^2}$ ที่ P_2 เท่ากับ $\frac{Q}{r_2^2}$..... ฯลฯ

ถ้า P_1 อยู่ใกล้ P_2 มาก r_1 จะเกือบเท่าหรือนับว่าเท่ากับ r_2 ได้ และ r_1^2 หรือ r_2^2 ก็เขียนว่าเท่ากับ $r_1\ r_2$ ได้ ส่วนความเข้มที่ P_1 กับ P_2 ก็นับเท่ากันได้ คือเท่ากับ $\frac{Q}{r_1 r_2}$

เมื่อระยะ P_1P_2 คือ $r_2 - r_1$ เป็นระยะที่สั้นมาก แรงงานที่ต้องเปลืองไปสำหรับดันประจุ ๑ หน่วยจาก P_2 ให้ถึง P_1 จะเท่ากับ $\frac{Q}{r_1 r_2} \times (r_2 - r_1)$ (แรงคูณด้วยระยะ) และแรงงานจำนวนนี้คือความต่างศักย์ระหว่าง P_1 กับ P_2

ถ้าศักย์ที่ $P; P_1; P_2; P_3;$..... ฯลฯ เท่ากับ $V; V_1; V_2; V_3;$..... ฯลฯ

$$V_1 - V_2 = \frac{Q(r_2 - r_1)}{r_1 r_2} = \frac{Q}{r_1} - \frac{Q}{r_2}$$

และการเขียนสมการสำหรับความต่างศักย์เขียนต่อไปทีละนิด ๆ ได้ดังนี้. –

$$V_1 - Y_2 = \frac{Q}{r_1} - \frac{Q}{r_2}$$

$$V_2 - V_3 = \frac{Q}{r_2} - \frac{Q}{r_3}$$

$$V_3 - V_4 = \frac{Q}{r_3} - \frac{Q}{r_4}$$

$$\vdots \qquad \vdots$$

$$V_{n-1} - V_n = r\frac{Q}{n-1} - \frac{Q}{r_n}$$

ผลรวมทั้งหมด $V_1 - V_n = \frac{Q}{r_1} - \frac{Q}{rn}$

ถ้า P_1 กับ Pn เป็นจุดคู่ใดคู่หนึ่งบนเส้น OP และเราให้ชื่อจุดทั้งสองนี้

เสียใหม่ว่าจุด P P และถ้าศักย์ที่จุดทั้งสองนั้นเท่ากับ V และ V เรา ก็เข้าสมการได้อีกดังนี้. –

$$V - V' = \frac{Q}{r} - \frac{Q}{r}$$

และถ้า P′ อยู่ห่างจาก P เป็นระยะไกลมาก ยิ่งเป็นอินฟินิตียิ่งดี V′ จะเท่ากับศูนย์ และเมื่อ r มีค่ามาก $\frac{Q}{r}$ ก็นับว่าเป็นศูนย์ด้วยได้.

ดังนั้นเราจึงเขียนสมการได้ว่า $V = \frac{Q}{r}$ และสมการนี้เป็นสูตรสำหรับใช้คำนวณศักย์อิเลคโตรสแตติคส์.

ตัวอย่าง. (๑) วัตถุทรงกลมรัศมี ๕ ซม. มีประจุ ๒๐๐ หน่วย ให้หาศักย์ของวัตถุนั้นกับศักย์ซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของวัตถุนั้น ๒๕ ซม.

ได้พูดไว้แล้วว่า สำหรับวัตถุทรงกลมก้อนโตให้ถือว่าประจุรวมกันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวัตถุ และศักย์ของวัตถุนั้นก็คือศักย์ตามจุดต่าง ๆ บนพื้นของวัตถุซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากับรัศมีของวัตถุ

ฉะนั้นศักย์ของวัตถุ = ๒๐๐ ๕ ÷ ๕ = ๔๐ หน่วยอี.เอส.ยู.

ส่วนศักย์ที่จุด ๒๕ ซม. จากจุดศูนย์กลาง = ๒๐๐ ÷ ๒๕ = ๘ หน่วยอี.เอส.ยู.

(๒) ในข้อ ๑ ถ้าวัตถุก้อนนั้นจมอยู่ในน้ำมันปาแรฟฟีนมีความนำจำเพาะ ๓ จะได้คำตอบสำหรับคำถามข้อ ๒ เป็นเท่าไร?

สำหรับคำถามข้อ ๑ คำตอบคงเดิม แต่ถ้าน้ำมันปาแรฟฟีนซึมเข้าในก้อนวัตถุได้ ต้องคิดคำตอบใหม่.

ศักย์ของวัตถุ = ๒๐๐ ÷ (๒×๕) = ๒๐ หน่วยอี.เอส.ยู.

ศักย์ที่จุด ๒๕ ซม. จากจุดศูนย์กลาง = ๒๐๐ ÷ (๒×๒๕)

= ๔ หน่วย อี.เอส.ยู.

(๓) ประจุ +๑๐ หน่วย −๒๐ หน่วย +๓๐ หน่วย และ −๔๐ หน่วย วางอยู่ตามมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีเส้นทะแยงมุมยาว ๑๐ ซม. ให้หาศักย์ที่จุดเส้นทะแยงมุมตัดกัน.

จุดนี้อยู่ห่างจากมุมเป็นระยะเท่ากันทุกมุม คืออยู่ห่างจากมุม ๕ ซม. ดังนั้นศักย์รวมที่จุดนั้นเท่ากับ $\frac{10}{5}+\frac{-20}{5}+\frac{30}{5}+\frac{-40}{50}=-4$ หน่วย อี.เอส.ยู.

๒๘. หน่วยสำหรับวัดความจุ ความจุไฟฟ้าของวัตถุ (โดยฉะเพาะเมื่อวัตถุถูกกั้นไม่ให้ติดต่อถึงสิ่งที่อยู่ใกล้เคียงได้ และสิ่งที่อยู่ใกล้เคียงนั้นมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์) ย่อมหมายถึงอัตราส่วนระหว่างประจุเทียบกับศักย์ของวัตถุนั้น.

$$C=\frac{Q}{V} \text{ หรือ } V=\frac{Q}{C}$$

สูตรสำหรับศักย์มีว่า $V=\frac{Q}{r}$

ดังนั้น $C=r$ คือความจุเท่ากับรัศมีของวัตถุ.

ตัวอย่าง (๑) วัตถุทรงกลมมีรัศมี ๑๐ ซม. ได้รับบรรจุ ๒๐๐ หน่วย วัตถุนั้นมีศักย์เท่าไร? และมีความจุเท่าไร? (อย่าตอบง่าย ๆ ว่าความจุเท่ากับรัศมี จงคิดตามเหตุผลเป็นขั้น ๆ ให้ครบวิธี).

$$V=\frac{Q}{r}$$

$$=\frac{200}{10}$$

$$=20 \text{ หน่วยศักย์อี.เอส.ยู.}$$

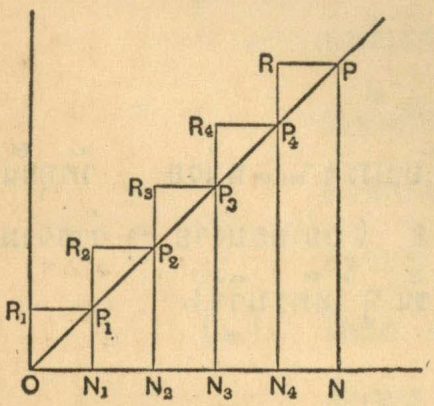
$$C = \frac{Q}{V}$$

$$= \frac{200}{20}$$

10 หน่วยความจุอี. เอส. ยู.

๒๙. กำลังงานของวัตถุที่มีประจุ เมื่อเราผลักหรือดันประจุ ๑ หน่วยเข้าไปถึงจุดซึ่งมีศักย์ V แรงงานที่ต้องเปลืองไปก็คือ V (ดังได้พูดไว้แล้วในหัวข้อ ๒๗ ว่าศักย์กับแรงงานเป็นจำนวนเดียวกัน แต่เป็นคนละหน่วย) ดังนั้นถ้าเราผลักประจุ Q เข้าไปถึงจุดที่มีศักย์ V หน่วย แรงงานที่ต้องเปลืองไปก็คือ V Q.

เราลองสมมุติว่าเรามีวัตถุก้อนหนึ่งไม่มีประจุเลยและถูกกั้นไม่ให้ติดต่อถึงสิ่งที่อยู่ใกล้เคียงได้ และเราค่อย ๆ ประจุวัตถุก้อนนั้นคราวละนิดหน่อยด้วยประจุ $q_1; q_2; q_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ และเมื่อประจุคราวหนึ่ง ๆ ศักย์เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยคราวละ $q_1; v_2; v_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ ดังนั้นแรงงานที่ใช้ประจุคราวหนึ่ง ๆ เท่ากับ $q_1v_1; q_2v_2; q_3v_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ



รูป ๕๒

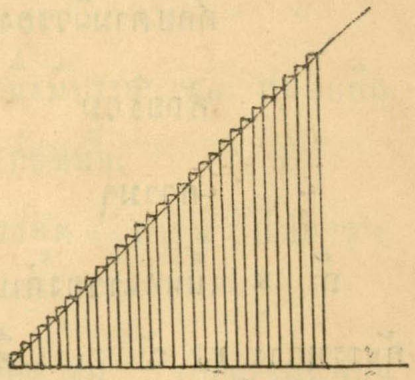
ลองเขียนกราฟแสดงจำนวนเหล่านี้ดูบ้าง สมมุติว่าเส้นนอน ON แสดงประจุ Q เขียน PN ตั้งได้ฉากกับ ON สำหรับให้แสดงศักย์ V แบ่ง ON ออกเป็นส่วนย่อย $n_1; n_2; n_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ ให้มากช่องที่สุดที่จะเป็นได้ ช่องย่อยเหล่านี้แสดงประจุ $q_1; q_2; q_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ ลากเส้น $N_1P_1; N_2P_2; N_3q_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ ตั้งได้ฉากกับ ON เส้นหนึ่งเส้นหนึ่งแสดงศักย์ $v_1; v_2; v_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ

เขียนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $ON_1P_1R_1; N_1N_2P_2R_2; N_2N_3P_3R_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ ให้ครบบริบูรณ์ส่วนแรงงาน $q_1v_1; q_2v_2; q_3v_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ แสดงด้วยพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $ON_1P_1R_1; N_1N_2P_2R_2; N_2N_3P_3R_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ

ดังนั้น แรงงานทั้งหมด $= q_1v_1; q_2v_2; q_3v_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ

$=$ พื้นที่รวมของรูป $ON_1P_1R_1; N_1N_2P_2R_2; N_2N_3P_3Q_3; \ldots\ldots$ ฯ ล ฯ

ปัญหาต่อไปมีว่า เราจะมีวิธีคำนวณหาผลรวมของพื้นที่ย่อยเหล่านั้นทั้งหมดได้อย่างไร ตามรูปจะเห็นได้ว่า ถ้าเราแบ่ง ON ออกเป็นช่องเล็ก ๆ ให้มากที่สุดที่จะแบ่งได้ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็ก ๆ จะแคบมาก พื้นที่อยู่นอกเส้น OP เป็นจำนวนที่ไม่ต้องสนใจ ตัดทิ้งเสียก็ไม่รู้สึกว่าผิดไปมาก พื้นที่รวมของรูปสี่เหลี่ยมย่อยทั้งหมดจึงถือเอาว่าเป็นเท่ากับพื้นที่ของรูปสามเหลี่ยม O P ก็นับว่าใช้ได้ ไม่รู้สึกว่าผิดไปมาก.



รูป ๕๓

พื้นรวมของรูปสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ทั้งหมด $=$ พื้นที่ของรูปสามเหลี่ยม ONP

$= \frac{1}{2}PN.ON.$

คือกำลังงานรวม $(E) = \frac{1}{2}V.Q$

$= \frac{1}{2}CV$ (เพราะ $Q = CV$)

$= \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$ (เพราะ $V = \frac{Q}{C}$)

๓๐. ความจุของคอนเดนเสอร์ ความจุและกำลังงานของคอนเดนเสอร์คงคำนวณจากสูตรเดียวกันกับความจุและกำลังงานของวัตถุธรรมดาอย่างในหัวข้อ ๒๘ – ๒๙

แต่มีบางคราวเรานิยมคำนวณจากขนาดของแผ่นคอนเดนเสอร์โดยตรง สมมุติว่าเราเอาแผ่นวัตถุบาง ๆ โค้งเป็นรูปทรงกลมสองอัน มีรัศมีต่างกัน และเอา

ส่วนทับกันให้จุดศูนย์กลางอยู่ที่เดียวกัน ให้ A เป็นรูปทรงกลมอันในมีรัศมี r_1 และ B เป็นรูปทรงกลมอันนอกมีรัศมี r_2

เมื่อเราโยงอันใดลงดิน (สมมุติว่า B) แล้วประจุอีกอันหนึ่ง (สมมุติว่าอัน A) ด้วยประจุ + Q อัน B จะได้รับประจุโดยการล่อหรือการชักนำ − Q

ศักย์ตามผิวของ $A = \frac{Q}{r_1}$

ศักย์ตามผิวของ $B = \frac{-Q}{r_2}$

ศักย์รวม $V = \frac{Q}{r_1} - \frac{Q}{r_2} = Q\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = Q\left(\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}\right)$

ความจุ $C = \frac{Q}{V} = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$

ถ้า x เป็นหนาของกำบังไฟฟ้าที่ขั้นแผ่นคอนเดนเสอร์ทั้งสอง x ก็คือส่วนต่างกันระหว่าง r_2 กับ r_1 คือ $r_2 = r_1 + x$ และถ้าส่วนหนาของกำบังไฟฟ้าน้อยมาก r_2 ถือว่าเท่ากับ r_1 ได้

ฉะนั้น $C = \frac{r_1 r_2}{r_2 r_1}$ เขียนเสียว่า $C = \frac{r_1^2}{x}$ ได้เอา 4π คูณทั้งเศษและส่วน

สมการก็คงเป็นอยู่อย่างเดิม $C = \frac{4\pi r_1^2}{4\pi x}$

$= \frac{A}{4\pi x}$ (A คือผิวของทรงกลมคือพื้นที่ของแผ่นคอนเดนเสอร์)

นี่เป็นสูตรสำหรับใช้คำนวณความจุของคอนเดนเสอร์จากขนาดของแผ่นคอนเดนเสอร์โดยตรงและเมื่อใช้อากาศขั้น ถ้าใช้กำบังไฟฟ้าชะนิดอื่นขั้น เราต้องรู้ค่าของความนำจำเพาะของกำบังไฟฟ้าที่ใช้ ถ้าแผ่นคอนเดนเสอร์เป็นแผ่นเรียบ (คือไม่โค้ง) ก็คงใช้สูตรอันเดียวกันนี้เพราะเราถือเสียว่าแผ่นเรียบก็คือแผ่นโค้งที่มีรัศมีเป็นอินฟินิตี้

โจทย์แบบฝึกหัดอีเลคโตรสแตติคส์

๑. ให้หาแรงดูดระหว่างประจุ ๑๘ หน่วยและ ๑๒๘ หน่วยวางห่างกัน ๑๐ ซม.

๒. วัตถุสองก้อนมีประจุก้อนละ ๑๕ หน่วยจะต้องวางห่างกันเป็นระยะเท่าใดจึงจะเกิดแรงผลัก ๒๕ ดายน์ ?

๓. วัตถุก้อนหนึ่งมีประจุ ๖ เท่าของอีกก้อนหนึ่ง เมื่อวางห่างจากกัน ๒.๕ ซม. เกิดแรงผลัก ๒๔ ดายน์ วัตถุมีประจุก้อนละเท่าไร ?

๔. วัตถุทรงกลมสองก้อนวางห่างกัน ๓๐ ซม ก้อนหนึ่งมีประจุ ๒๗ หน่วยอีกก้อนหนึ่ง ๓๖ หน่วย ให้หาแรงร่วมระหว่างสองก้อนนั้น.

๕. วัตถุสองก้อนเมื่อวางห่างจากกัน ๔ ซม. เกิดแรงดูด ๑๐ ดายน์ ถ้าเอาวางห่างจากกัน ๑๐ ซม. จะเกิดแรงดูดเท่าไร ?

๖. วัตถุสองก้อนมีประจุเท่ากัน เมื่อวางห่างจากกัน ๓๐ ซม. เกิดแรงผลักกัน ๐.๑๖ ดายน์ วัตถุสองก้อนนั้นมีประจุก้อนละเท่าไร ?

๗. ประจุต่างชนิดกัน ๑๖ หน่วยและ ๔๘ หน่วย อยู่ห่างจากกัน ๓๐ ซม. ให้หาแรงร่วมที่จุดห่างจากประจุอันน้อย ๕ ซม. และห่างจากประจุอันมาก ๒๕ ซม.

๘. ประจุ ๒๐, ๔๐ และ ๘๐ หน่วยวางอยู่ตามมุมของรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าด้านยาว ๒๐ ซม. ให้หาแรงร่วมระหว่างประจุ ๔๐ และ ๘๐ หน่วยที่มีต่อก้อน ๒๐ หน่วย.

๙. วัตถุก้อนเล็ก ๆ สองก้อนมีประจุ ๒๐ และ ๔๐ หน่วย วางห่างกัน ๑๐ ซม. ให้หาแรงผลักระหว่างวัตถุสองก้อนนั้น กับเมื่อเอาวัตถุสองก้อนนั้นมาแตะให้ถูกกันแล้วแยกไปวางห่างจากกันเช่นเดิม จงหาแรงผลักระหว่างกันดูอีกครั้งหนึ่ง.

๑๐. ประจุละ ๑๐๐ หน่วยเอาวางไว้ที่มุมตรงกันข้ามคู่หนึ่งของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมี

ด้านยาว ๕ ซม.กับเอาประจุอีก ๒๐๐ หน่วยวางไว้ที่มุมที่สาม ให้หาแรงร่วมที่ส่งไปถึงมุมที่สี่.

๑๑. วัตถุทรงกลมมีรัศมี ๑๐ ซม. มีความแน่นผิว ๑.๕ หน่วยให้หาจำนวนประจุทั้งก้อน ($\pi = ๓.๑๔$).

๑๒. วัตถุเป็นแผ่นกลมมีรัศมี ๑๕ ซม.ได้รับประจุไฟฟ้า ๑๔๑.๓ หน่วย ให้หาความแน่นผิวของวัตถุแผ่นนั้น.

๑๓. ประจุชะนิดเดียวกัน ๑๐ หน่วยและ ๔๐ หน่วยวางห่างกัน ๑๒ ซม. ให้หาที่อยู่ของจุดระหว่างประจุทั้งสองที่มีความเข้มเป็นศูนย์

๑๔. ประจุ ๓๐๐ หน่วยและ ๘๐๐ หน่วยวางอยู่ที่มุมตรงข้ามคู่หนึ่งของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านยาว ๒๐ ซม. ที่มุมตรงข้ามอีกคู่หนึ่งจะมีศักย์แห่งละเท่าไร ?

๑๕ ประจุละ ๑๐ หน่วยวางอยู่ตามมุมทั้งสามของรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ด้านยาว ๑๐ ซม. ให้คำนวณศักย์ที่จุดศูนย์กลางของรูปสามเหลี่ยม.

๑๖. ประจุบวก ๖, ๑๒ และ ๒๔ หน่วยวางอยู่ที่มุมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถามว่าจะต้องเอาประจุกี่หน่วยวางที่มุมที่สี่ จึงจะได้ศักย์ที่จุดศูนย์กลางของรูปสี่เหลี่ยมเป็นศูนย์.

๑๗. ตามมุมของรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า ด้านยาว ๒๐ ซม. มีประจุ ๑, -๒, ๓, -๔, ๕ และ ๖ หน่วย ให้หาศักย์ที่จุดศูนย์กลางของรูปหกเหลี่ยมนั้น.

๑๘. วัตถุทรงกลมมีรัศมี ๖ ซม. เมื่อได้รับประจุบวก ๘๐ หน่วยจะมีศักย์เท่าไร ?

๑๙. วัตถุทรงกลมได้รับประจุ ๑๐๐๐ หน่วยเกิดศักย์ ๓๐๐ หน่วย วัตถุนั้นมีรัศมีเท่าไร ?

๒๐. กขคง เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้านยาว ๕ ซม. ที่ ข มีประจุ ๔๐ หน่วย ที่ ง มีประจุ ๔๐ หน่วย ที่ ค มีประจุ -๒๐ หน่วย ให้หา (๑) ศักย์ (๒) ความเข้มที่จุด ก.

๒๑. วัตถุมีความจุ ๑๐ เมื่อเพิ่มศักย์ให้เป็น ๕๐ หน่วย จะมีประจุเท่าไร ?

๒๒. วัตถุทรงกลมมีรัศมี ๑๕ ซม. เมื่อเพิ่มให้ศักย์เป็น ๒๐ หน่วยจะมีประจุเท่าไร ?

๒๓. วัตถุทรงกลมมีรัศมี ๑๐ ซม. และ ๒๐ ซม. ได้รับประจุจนได้ศักย์ ๑๖ และ ๑๐ หน่วย เมื่อเอาลวดโยงให้ถึงกัน จะคงมีศักย์เท่าไร ?

๒๔. ก้อนกลมสองก้อนมีศักย์ ๕ และ ๘ และมีประจุ ๓๐ และ ๔๘ เมื่อเอาลวดโยงให้ถึงกันแล้ว จะคงเหลือศักย์และประจุก้อนละเท่าไร ?

๒๕. ก้อนกลมสองก้อนมีรัศมี ๒ ซม. และ ๔ ซม. ได้รับประจุก้อนละ ๒๔ หน่วย เมื่อเอาลวดโยงให้ถึงกันจะเหลือประจุก้อนละกี่มากน้อย ?

๒๖. วัตถุทรงกลมสองก้อนมีรัศมี ๕ ซม. และ ๑๐ ซม. ได้รับประจุ ๑๐๐ หน่วย และ ๕๐๐ หน่วย เมื่อเอาลวดโยงให้ถึงกันจะคงมีศักย์เท่าไร ?

๒๗. วัตถุได้รับประจุ ๒๔ หน่วยและศักย์ ๕ หน่วย วัตถุนั้นมีความจุเท่าไร ?

๒๘. คอนเดนเสอร์ประกอบด้วยแผ่นแบน ๆ ขนานกันสองแผ่น มีพื้นที่แผ่นละ ๑๐๐ ตาราง ซม. เมื่อเอาวางขนานหันหน้าเข้าหากันห่างจากกัน ๕ มม. และที่ว่างระหว่างกลางเป็นอากาศ คอนเดนเสอร์นั้นมีความจุเท่าไร ?

๒๙. แผ่นคอนเดนเสอร์สองแผ่นวางในอากาศห่างกัน ๓ มม. และมีพื้นที่แผ่นละ ๙๐๐ ตาราง มม. จะมีความจุเท่าไร ?

๓๐. วัตถุมีความจุ ๑๐๐ และได้รับประจุจนมีศักย์ ๑๒๐๐ วอลต์ เมื่อเอาไปต่อกับวัตถุอีกอันหนึ่งศักย์ลดเหลือ ๙๐๐ วอลต์ วัตถุอันหลังมีความจุเท่าไร?

๓๑. ลีย์เดนจาร์ได้รับประจุจนมีศักย์ ๑๘๐๐ วอลต์ แล้วเอาต่อให้ถึงกับลีย์เดนจาร์อีกใบหนึ่ง มีพื้นที่สองเท่าของใบก่อน ให้หาศักย์เมื่อต่อกันแล้ว.

๓๒. ในข้อ ๒๘ ถ้าที่ว่างระหว่างแผ่นเป็นแก้วซึ่งมีความจุจำเพาะสำหรับการนำ (specific inductive capacity) ๓ คอนเดนเสอร์นั้นมีความจุเท่าไร ?

๓๓. ดีย์เดนซาร์มีพันที่ ๒๐๐ ตาราง ซม. แก้วหนา ๔ ซม. และแก้วมีความจุจำเพาะสำหรับการนำ ๒.๘ ดีย์เดนซาร์นั้นมีความจุเท่าไร ?

๓๔. วัตถุทรงกลมมีประจุ ๕๐ หน่วยและมีศักย์ ๑๐ หน่วย เมื่อเอาลวดต่อไปยังวัตถุทรงกลมอีกก้อนหนึ่ง ศักย์ลดเหลือ ๔ หน่วย ก้อนวัตถุหลังมีรัศมีเท่าไร ?

๓๕. วัตถุมีความจุ ๕ ได้รับประจุ ๓๕๐ หน่วย วัตถุมีความจุ ๔ ได้รับประจุ ๑๐๐ หน่วย เมื่อเอาลวดโยงระหว่างวัตถุทั้งสองให้ถึงกัน ไฟฟ้าจะไหลตามสายลวดเป็นจำนวนเท่าไร ?

๓๖. ประจุ ๓ , ๓ และ ๔ หน่วยวางอยู่ตามมุมของรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ด้านยาว ๑๐ ซม. ศักย์ลดความเข้มที่จุดศูนย์กลางของรูปสามเหลี่ยมจะเป็นเท่าไร ?

๓๗. กขค เป็นรูปสามเหลี่ยม กข ยาว ๑๖ ซม. ขค ยาว ๑๒ ซม. คก ยาว ๒๐ ซม. ที่ ก และ ค มีประจุแห่งละ ๑๐ หน่วย ที่ ข มี ๒๐ หน่วย ให้หาแรงร่วมระหว่าง ก และ ค ที่มีแก่ ข.

๓๘. ก้อนกลมเล็ก ๆ สองก้อนอยู่ห่างกัน ๒๐ ซม. ก้อนหนึ่งมีประจุ ๓ หน่วย อีกก้อนหนึ่งมีประจุ ๔ หน่วย ให้หาที่อยู่ของจุดระหว่างก้อนทั้งสองที่มีความเข้มเป็นศูนย์

๓๙. ตัวนำสองอันมีความจุ ๒๐ และ ๖๐ อันหนึ่งได้รับประจุ ๘๐๐ หน่วย ถ้าตัวนำทั้งสองมีลวดโยงถึงกัน ตัวนำอันหนึ่ง ๆ จะมีประจุเท่าไร ? และจะมีศักย์เท่าไร ?

๔๐. วัตถุทรงกลมสามอัน รัศมี ๔,๑๐ และ ๓๕ ซม. อันหนึ่ง ๆ ได้รับประจุ ๓๐๐ หน่วย เอาลวดโยงให้ทั้งสามก้อนติดต่อถึงกัน จะเหลือประจุอันละเท่าไร และมีศักย์เท่าไร ?

๔๑. วัตถุทรงกลมมีรัศมี ๑๐ ซม. ได้รับประจุจนมีศักย์ ๕๐๐ วอลต์ แล้วเอาวัตถุทรงกลมอีกอันหนึ่งรัศมี ๒๐ ซม. มาแตะ ให้เทียบความแน่นผิวของวัตถุทรงกลมทั้งสอง.

๔๒. แผ่นคอนเดนเสอร์คู่หนึ่งมีพื้นที่อันละ ๕๐ ตาราง ซม. วางในอากาศห่างกัน ๔ มม. ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นคู่นั้นเท่ากับ ๑๐๐ หน่วย ให้หากำลังงานของแผ่นคอนเดนเสอร์คู่นั้น.

๔๓. วัตถุทรงกลมสองก้อนมีรัศมี ๖ ซม. และ ๘ ซม. และได้รับประจุอันละ ๒๔ หน่วย ให้หากำลังงานของวัตถุสองก้อนนั้น เมื่อเอาลวดโยงให้ถึงกันจะคงมีกำลังงานเท่าไร ?

๔๔. วัตถุทรงกลมมีรัศมี ๑๐ ซม. แบ่งประจุให้แก่วัตถุทรงกลมอีกก้อนหนึ่งซึ่งเป็นปกติและมีรัศมี ๕ ซม. จงพิสูจน์ว่ากำลังงานลดน้อยลงไปเหลือ $\frac{2}{3}$ ของเดิม.

๔๕. พื้นที่ของแผ่นดีบุกที่กรุด้วยเดนจาร์เท่ากับ ๑๐๐๐ ตาราง ซม. เนื้อแก้วหนา ๔ มม. และมีความจุจำเพาะสำหรับการนำ ๓ ถ้าด้วยเดนจาร์นั้นได้รับประจุจนมีศักย์ ๑๐๐ หน่วย ให้หาความจุและกำลังงานเมื่อปล่อยประจุ.

๔๖. คอนเดนเสอร์ประกอบขึ้นด้วยพื้นวัตถุทรงกลมครอบกัน อันในมีรัศมี ๒๐ ซม. อันนอกมีรัศมี ๒๒ ซม. ให้หาความจุ (๑) เมื่อมีอากาศขั้น (๒) เมื่อมีปาแรฟพีนขั้น ปาแรฟพีนมีความจุจำเพาะสำหรับการนำ ๒.๒
ถ้าความต่างศักย์ระหว่างผิวทั้งสองเท่ากับ ๒๐๐ หน่วย ให้คำนวณกำลังงานที่ใช้ประจุคอนเดนเสอร์นั้นทั้งมีอากาศขั้นและมีปาแรฟพีนขั้น.

๔๗. วัตถุทรงกลมสองก้อนมีรัศมี ๒๐ ซม. และ ๓๐ ซม. ได้รับประจุจนมีศักย์ ๑๐ และ ๑๕ หน่วย ให้หากำลังงานไฟฟ้าที่หายไปเมื่อเอาเส้นลวดโยงต่อวัตถุทั้งสองนั้น.

๔๘. คอนเดนเสอร์อันหนึ่งใช้อากาศขั้นและมีความจุ ๒๐๐ และความต่างศักย์ระหว่างแผ่นคอนเดนเสอร์ ๕๐ หน่วย คอนเดนเสอร์อีกอันหนึ่งเป็นอย่างเดียวกับอันที่กล่าวมาแล้วแต่แผ่นคอนเดนเสอร์ขั้นด้วยวัตถุมีความจุจำเพาะสำหรับการนำ ๗ และไม่มีประจุเลย เมื่อเอาเส้นลวดโยงให้คอนเดนเสอร์ทั้งสองติดต่อถึงกัน ให้หากำลังงานของคอนเดนเสอร์อันที่สอง.

๔๙. กำลังงานของวัตถุทรงกลมเมื่อได้รับประจุจนมีศักย์ ๑๐๐ หน่วยเท่ากับ ๓๐,๐๐๐ เออร์ก ให้คำนวณประจุและความแน่นผิวของวัตถุนั้น.

๕๐. คอนเดนเสอร์ประกอบด้วยแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสสองแผ่น ด้านมีส่วนยาว ๓๐ ซม. และวางห่างกัน ๓ มม. มีอากาศขั้น กำลังงานของคอนเดนเสอร์เท่ากับ ๙๖๐๐ เออร์ก ให้หาความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทั้งสองและประจุในแผ่นหนึ่ง ๆ

ภาค ๓

อีเลคโตรไดแนมิคส์

๑. **ความจริงตอนต้น** เวลาเอาแท่งสังกะสีลงแช่ในกรดสัลฟิวริคอย่างเจือจาง จะเกิดการผะสมธาตุระหว่างสังกะสีกับกรด สังกะสีจะค่อย ๆ ละลายหมดไปเป็นน้ำยา และจะมีปุดแกสไฮโดรเจนเกิดขึ้น เอามือจับถ้วยที่ใส่กรดดูจะรู้สึกร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นได้มาจาก กำลังงานเคมี (chemical energy) ของสังกะสี.

$$Zn^{\circ} + H^{+} + H^{+} + S\bar{O}_4^{-} = Zn^{++} + SO_4^{--} + + H_2^{\circ} + \text{ความร้อน.}$$

แต่ถ้าใช้แท่งสังกะสีบริสุทธิ์หรือปรอทฉาบแท่งสังกะสีธรรมดาเสียก่อน สังกะสีจะอยู่เฉย ๆ กรดไม่กัดอย่างง่ายดายเช่นคราวก่อน เอาแท่งทองแดงแช่ลงไปในกรดด้วยก็ยังคงเฉย ๆ ทั้งสองแท่ง แต่พอให้แท่งสังกะสีกับแท่งทองแดงถูกกันหรือหาลวดมาโยงให้แท่งทั้งสองติดต่อถึงกัน แท่งสังกะสีจะเกิดการผะสมธาตุกับกรดทันที แท่งทองแดงนับว่าคงอยู่เฉย ๆ ลองเอามือจับถ้วยแก้วดูจะไม่รู้สึกร้อนอย่างคราวก่อน ถึงจะร้อนบ้างก็ไม่มาก คราวนี้ความร้อนหายไปไหนเสียบ้าง ความร้อนกลายเป็นอำนาจไฟฟ้าอยู่ในเส้นลวดที่โยงแท่งทั้งสอง ไฟฟ้าที่อยู่ในเส้นลวดไม่อยู่กับที่ดังที่เรากล่าวถึงในภาค ๒ ไฟฟ้าไหลตลอดเส้นลวด และการไหลของไฟฟ้าในลวดทำให้ลวดเกิดสมบัติดังนี้. —

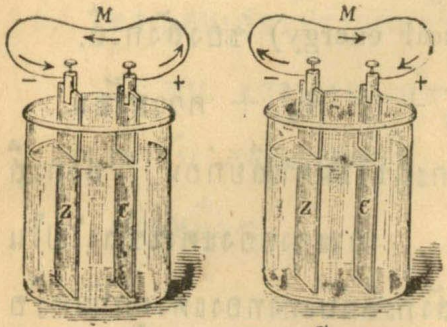
ก. เกิดอำนาจแม่เหล็กรอบเส้นลวด

ข. ทำให้เส้นลวดร้อน และถ้าแรงมากจะถึงกับมีแสง

ค. ทำให้เกิดการผะสมธาตุ ตัดเส้นลวดให้ขาดแล้วเอาปลายที่ตัดจุ่มลงไปในน้ำยาของเกลือต่าง ๆ เช่นเงินไนเตรต ทองแดงสัลเฟตหรือตะกั่วแอซิเตต ฯ ล ฯ โดยะ

ที่ผะสมอยู่ในเกลือจะแยกออกจากน้ำยามาเกาะอยู่ที่ปลายลวดข้างหนึ่งหรือถ้าเอาปลายลวดที่ตัดออกวางใกล้กันบนกระดาษมีโปแตสเซียมไอโอไดคละลายติดอยู่ ปลายลวดข้างหนึ่งจะขึ้นกระดาษเป็นเส้นสีแดง (สีของไอโอดีน) และปลายลวดที่ขึ้นเป็นเส้นสีแดงนี้เป็นคนละปลายกับปลายที่โลหะเกาะติด.

เครื่องมือที่ประกอบด้วยแท่งโลหะและน้ำยาหรือกรดสำหรับทำให้เกิดอำนาจไฟฟ้าได้นั้นเรียกว่า **หม้อไฟฟ้า** (voltaic cell หรือ galvanic cell)



กระแสไฟฟ้า กระแสอิเลคตรอน

รูป ๕๔

เรื่องราวที่จะเรียนต่อไปในภาคนี้เกี่ยวกับสมบัติลักษณะการไหล ฯลฯ ของอำนาจไฟฟ้าในเส้นลวด แต่ในขั้นต้นมีปัญหาที่จะต้องทำความเข้าใจกันอยู่ ๒ ข้อคือ.—

(๑) ไฟฟ้าในเส้นลวดไหลทางไหน?

(๒) อะไรทำให้ไฟฟ้าในเส้นลวดไหล?

ความจริงของเรื่องเหล่านี้เราออกจะไม่รู้แน่ใจนัก แต่เพื่อพวกเราจะได้มีความเข้าใจตรงกัน เราให้ความเข้าใจกันไว้ดังนี้.

สำหรับปัญหาข้อ ๑ เราให้เกณฑ์กันไว้ดังนี้ เอาเส้นลวดที่โยงระหว่างขั้วทั้งสองของหม้อไฟฟ้าซึ่งทาบข้างบนเข็มทิศตามแนวเมอริเดียน แล้วสังเกตว่าขั้วเหนือของเข็มทิศเบนไปทางไหน ถ้าเบนไปทางทิศตะวันตก ให้ถือว่าขั้วไฟฟ้าที่อยู่ทางทิศใต้ของเส้นลวดเป็นขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าที่อยู่ทางทิศเหนือของเส้นลวดเป็นขั้วลบ ถ้าขั้วเหนือของเข็มทิศเบนไปทางตะวันออก เรื่องก็เป็นตรงกันข้ามคือขั้วไฟฟ้าที่อยู่ทางทิศเหนือของเส้นลวดเป็นขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าทางทิศใต้ของเส้นลวดเป็นขั้วลบ อีกเกณฑ์หนึ่งมีดังนี้ ตัดลวดที่ขั้วโยงระหว่างของหม้อไฟฟ้าให้ขาด แล้ว

เอาปลายลวดที่ต่อจุ่มลงในน้ำยาเกลือต่าง ๆ เส้นไหนมีโลหะเกาะ ขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับเส้นนั้นเป็นขั้วลบ ขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับเส้นที่ไม่มีโลหะเกาะ เป็นขั้วบวก.

เรื่องเครื่องหมายบวกลบของขั้วไฟฟ้ามีความหมายแยกออกเป็นสองโรงเรียน โรงเรียนที่พูดตาม **ทฤษฎีไฟฟ้าชะนิดฟลูอิดเดียว** (one fluid theory) ถือว่าขั้วบวกเป็นขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงและขั้วลบเป็นขั้วมีศักย์ไฟฟ้าต่ำ ไฟฟ้าซึ่งเป็นฟลูอิดไหลจากขั้วบวกไปหาขั้วลบจนศักย์ที่ขั้วทั้งสองเท่ากันก็หยุดไหล การไหลเป็น **กระแสไฟฟ้า** (electric current) ส่วนโรงเรียนที่พูดตาม **ทฤษฎีอิเลคตรอน** (electron theory) ถือว่าขั้วบวกพร่องอิเลคตรอน ขั้วลบมีอิเลคตรอนรวมออกันอยู่มากและความดันของอิเลคตรอนมีมาก ความดันนี้แบ่งดันอิเลคตรอนให้ไหลผ่านเส้นลวดไปหาขั้วบวก จนความดันที่ขั้วทั้งสองเท่ากันก็หยุดไหล การไหลเป็น **กระแสอิเลคตรอน** (electronic current).

การไหลในเรื่องทั้งสองนี้อุปมาเหมือนเอาก้อนหินทิ้งไว้ในรางไม้มีน้ำเต็ม ถ้าผลักก้อนหินให้เคลื่อนที่ใต้น้ำไปทางขวามือ ฟองละอองบนผิวน้ำจะกะเพื่อมมาทางซ้ายมือ ทางที่ฟองละอองกะเพื่อมเปรียบด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นการกะเพื่อมของอิเทอร์โดยถูกอิเลคตรอนแหวกวิ่งผ่าไป ก้อนหินเปรียบด้วยอิเลคตรอน.

สำหรับปัญหาข้อ ๒ สิ่งที่ทำให้ไฟฟ้าไหลในเส้นลวดต้องเป็นกำลังงาน เราให้ชื่อว่า **แรงเคลื่อนไฟฟ้า** (electromotive force) เขียนตัวอักษรย่อว่า E. M. F. และได้มาจากกำลังงานรูปอื่น ในเรื่องหม้อไฟฟ้าได้มาจากกำลังงานเคมี แต่จะได้มาอย่างไรกัน เวลาเอาแท่งสังกะสีและแท่งทองแดงจุ่มลงในกรดสัลฟิวริคแล้วมีอำนาจไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างไร เราไม่รู้แน่อีก เราเป็นแต่เพียงให้ความเข้าใจกันตามความเห็นของเนอร์นส์ต์ว่าดังนี้.

เวลาเอาแท่งของแข็งจุ่มลงในของเหลว ของแข็งบางชะนิดละลายเป็นน้ำยาได้มาก และบางชะนิดได้น้อย ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น ทำไมดินประสิวละลาย

ในน้ำได้มากกว่าเกณฑ์ธรรมดา เราไม่รู้เหตุผลจริง ที่เป็นเช่นนั้นเราพูดว่าดินประสิว มี **ความดันน้ำยา** (solution pressure) มากกว่าเกณฑ์ธรรมดา ของแข็งชะนิดที่มีความดันน้ำยามากก็ดันอณุจากแท่งลงไปอยู่ในน้ำยาได้มากอย่างเดียวกันกับของเหลวที่มี **ความดันไอ** (vapour pressure) มากก็ดันอณุระเหยขึ้นไปแทรกอากาศอยู่ได้มาก.

โลหะบางชะนิดเช่นโซเดียมและโปแตสเซียมเมื่อจุ่มลงในน้ำจะละลายได้ง่ายมาก และไม่ละลายเพียงเป็นอณุ แต่ละลายละเอียดยิ่งกว่า คือละลายละเอียดเป็น **ไอออน** (ion) ที่เดียว คือเป็นปรมาณุที่พร่องอิเลคตรอนและมีชาร์จไฟฟ้าบวก อำนาจที่ดันปรมาณุของโลหะจากแท่งลงไปอยู่ในน้ำยาเป็นไอออนเราให้ชื่อว่า **ความดันน้ำยาไฟฟ้า** (electrolytic solution pressure) โลหะต่างชะนิดมีความดันน้ำยาไฟฟ้าต่างกัน และเรียงกันตามลำดับอิเลคโตรโมติฟเสร์ีส์ของธาตุต่าง ๆ (ดูบัญชีในตำราเคมี).

แท่งโลหะตามปกติมีอำนาจไฟฟ้าเป็นศูนย์ เพราะทุก ๆ ปรมาณุที่รวมอยู่ในแท่งประกอบด้วยโปรตอนและอิเลคตรอนเป็นจำนวนเท่ากัน เวลาเอาแท่งโลหะจุ่มลงไปในน้ำ ความดันน้ำยาไฟฟ้าของโลหะเบ่งปรมาณุลงไปอยู่ในน้ำเป็นไอออนของโลหะและเหลืออิเลคตรอนฝากไว้กับแท่ง แท่งจึงมีอำนาจไฟฟ้าเป็นลบ แต่ตามปกตินอกจากโลหะพวกโปแตสเซียมแล้วจะละลายไม่ได้มากนัก มากกว่ากันเป็นแต่เพียงเปรียบเทียบ และเป็นส่วนมากไอออนคงยังเกาะอยู่ที่ใกล้ ๆ ผิวแท่งนั่นเองโดยอิเลคตรอนในแท่งดึงไว้ แต่ถ้าในน้ำมีฤทธิ์กรด คือมีไฮโดรเจนไอออนปนอยู่ด้วย H^+ คอยเสาะหาอิเลคตรอนอยู่ทั่วไป H^+ เข้าแย่งอิเลคตรอนเพื่อกลายเป็นไฮโดรเจนปกติ H° แล้วปุดขึ้นจากน้ำเป็นแกสไฮโดรเจน เมื่ออิเลคตรอนในแท่งโลหะหมดไปเช่นนี้ โลหะก็ละลายเป็นไอออนออกจากแท่งได้มากเข้าจนหมดแท่ง เวลาเอาแท่งสังกะสีบริสุทธิ์จุ่มลงในน้ำ ความดันน้ำยาไฟฟ้าของสังกะสีเบ่ง

ปรมาณูสังกะสีละลายเป็น Zn^{++} ลงไปอยู่ในน้ำ และมี Zn^{++} สำรองที่เตรียมจะออกจากแท่งและเกาะผิวแท่งอยู่รอบแท่ง ฉะนั้นแม้มีน้ำกรดปนคือมี H^{+} H^{+} เข้าไปรับอิเลคตรอนที่แท่งไม่ได้ Zn^{++} ซึ่งมีอำนาจไฟฟ้าบวกเช่น H^{+} และมีอยู่รอบแท่งคอยกันหรือผลักออกจากแท่ง และโดยเหตุนี้กรดสัลฟิวริคจึงไม่กัดสังกะสีบริสุทธิ์ แต่ถ้าสังกะสีไม่บริสุทธิ์ มีธาตุอื่นปนอยู่ด้วย โดยฉะเพาะธาตุที่มีความดันน้ำยาไฟฟ้าน้อยเช่นธาตุถ่าน จะไม่มีไอออนถ่ายออกมามาก ปล่อยให้ผิวแท่งตรงนั้นว่าง เมื่อเป็นเช่นนี้ H^{+} ก็แวะไปหาแท่งตรงที่ว่างตรงนั้นและรับเอาอิเลคตรอนไป ทำให้อิเลคตรอนในแท่งหมดไป สังกะสีละลายเป็นไอออนออกจากแท่งได้มากจนหมดแท่ง ถ้าเอาโลหะที่มีความดันน้ำยาไฟฟ้ามากเช่นปรอทฉาบผิวที่ว่างตรงนั้นเสีย ไอออนปรอทจะออกมาอยู่เต็มและคอยกันหรือผลัก H^{+} ไม่ให้เข้าถึงแท่งได้ อิเลคตรอนก็ไม่หมดไปจากแท่ง ไอออนสังกะสีไม่ออกจากแท่ง ปรากฏเป็นว่ากรดไม่กัดสังกะสีเปรียบเหมือนเป็นแท่งสังกะสีบริสุทธิ์.

ขณะที่แท่งสังกะสีอยู่เฉย ๆ ไม่มีการประสมธาตุกับกรด ถ้าเอาแท่งทองแดงหรือแท่งโลหะอื่นที่มีความดันน้ำยาไฟฟ้าน้อยกว่าสังกะสีจุ่มลงไปในกรดด้วย แท่งโลหะที่จุ่มลงไปจะมีอำนาจไฟฟ้าลบเกิดขึ้นทำนองเดียวกับแท่งสังกะสีโดยความดันน้ำยาไฟฟ้าของธาตุนั้นเบ่งปรมาณูออกจากแท่งเป็นไอออนและฝากอิเลคตรอนไว้ให้แก่แท่ง แต่เกิดอำนาจไฟฟ้าน้อยกว่าแท่งสังกะสีเพราะไอออนออกจากแท่งน้อยกว่า ตอนนี้ถ้าเอาลวดโยงจากแท่งโลหะทั้งสองให้ติดต่อถึงกัน อิเลคตรอนจะออกจากแท่งสังกะสีไหลตามเส้นลวดไปยังอีกแห่งหนึ่ง เพราะในแท่งสังกะสีมีอิเลคตรอนเบียดกันอยู่แน่นกว่า เมื่ออิเลคตรอนออกไปจากแท่งสังกะสีเสียบ้าง ไอออนสังกะสีก็ออกจากแท่งไปอยู่ในกรดได้มากขึ้น ส่วน H^{+} ซึ่งเบียด Zn^{++} เข้าไปรับอิเลคตรอนที่แท่งสังกะสีไม่ได้ ก็เลี่ยงไปรับที่โลหะอีกแท่งหนึ่ง เพราะมีไอออนคอยกันอยู่

น้อยกว่า และเมื่อเป็นเช่นนี้อิเลคตรอนที่ออกจากแท่งสังกะสีมาเพิ่มให้แก่อีกแท่งหนึ่งก็ไม่รู้จักอิ่ม คือไม่ได้เพิ่มความดันอิเลคตรอนจนเท่าในแท่งสังกะสีได้ อิเลคตรอนคงไหลในเส้นลวดเรื่อยไปจนกว่าแท่งสังกะสีจะละลายหมด หรือจนหมดฤทธิ์กรด (ไฮโดรเจนไอออนในกรดกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนหมด).

ขั้วบวกขั้วลบของหม้อไฟฟ้าเป็นเรื่องเปรียบเทียบ ไม่ใช่ของตายตัว แท่งสังกะสีไม่เป็นขั้วลบเสมอและแท่งทองแดงก็ไม่เป็นขั้วบวกเสมอ แท่งสังกะสีจะเป็นขั้วลบต่อเมื่อแช่อยู่กับแท่งโลหะอื่นที่มีความดันน้ำยาไฟฟ้าน้อยกว่าสังกะสี เพราะถ้าแท่งอื่นมีความดันน้ำยาไฟฟ้าน้อยกว่าปรมาณูที่ออกจากแท่งไปเป็นไอออนได้น้อยกว่า ทิ้งอิเลคตรอนไว้ให้แก่แท่งได้น้อยกว่า อิเลคตรอนก็ไหลตามเส้นลวดเข้ามาหาแท่งนั้น แท่งทองแดงก็เหมือนกัน จะเป็นขั้วบวกก็ต่อเมื่อแช่อยู่ด้วยกันกับโลหะอื่นที่มีความดันน้ำยาไฟฟ้ามากกว่า ความจริงอันนี้ทดลองให้เห็นได้ง่าย ลองเอาแท่งเหล็ก ทองแดง ปรอท ดีบุก เงิน ทองคำขาว ถ่าน แมกนีเซียม สังกะสี ตะกั่ว จุ่มลงไปในน้ำกรดแก้วเดียวกันทั้งสิบแท่งและอย่าให้แท่งเหล่านี้ถูกกัน แท่งต่าง ๆ มีส่วนละลายเป็นไอออนมากน้อยไม่เหมือนกัน จึงรับฝากอิเลคตรอนไว้ที่แท่งเป็นจำนวนไม่เหมือนกัน ความแน่นของอิเลคตรอนในแท่งต่าง ๆ ก็ไม่เหมือนกัน ฉะนั้นเมื่อเอาลวดโยงแท่งคู่ไหนก็ได้ จะมีกระแสอิเลคตรอนไหลในเส้นลวดทุกครั้ง แต่จะไหลมากหรือน้อยย่อมสุดแต่ความแน่นของอิเลคตรอนในแท่งที่เอาลวดโยงถึงกันแน่นต่างกันมากหรือน้อย มีวิธีโยงคู่แปลก ๆ กัน ๔๕ คู่ ธาตุ ๑๐ ธาตุ ที่ยกตัวอย่างไว้ข้างบนมีลำดับความดันน้ำยาไฟฟ้าจากมากไปน้อยดังนี้ แมกนีเซียม สังกะสี เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว ทองแดง ปรอท เงิน ทองคำขาว ถ่าน ลองเอาลวดที่โยงแท่งทั้งสองทาบบนเข็มทิศ สำหรับตะกั่วกับทองแดง ตะกั่วเป็นขั้วลบทองแดงเป็นขั้วบวก แต่สำหรับตะกั่วกับเหล็ก ตะกั่วเป็นขั้วบวก

เหล็กเป็นขั้วลบ สังกะสีเคยเป็นขั้วลบสำหรับทองแดง แต่สังกะสีจะเป็นขั้วบวกสำหรับแมกนีเซียม ส่วนกระแสอีเลคตรอนที่ไหลในเส้นลวด ถ้าความแน่นของอีเลคตรอนในแท่งทั้งสองต่างกันมากก็มีกระแสมาก เช่นในแท่งสังกะสีมีความแน่น + ๑.๗ วอลต์ และในแท่งทองแดงมี .๗ วอลต์ เมื่อเอาลวดโยงระหว่างสังกะสีกับทองแดงจะได้แรงดัน ๑ วอลต์ ถ้าเป็นสังกะสีกับถ่านยิ่งได้แรงดันมากขึ้น เพราะความแน่นของอีเลคตรอนในแท่งถ่านประมาณ ไม่ถึง .๑ วอลต์ ฉะนั้นลวดที่โยงระหว่างสังกะสีกับถ่านได้แรงตั้งวอลต์ครึ่ง ดังเช่นในหม้อไฟฟ้าสำหรับเดินทาง.

๒. สมบัติของกระแสอีเลคตรอน ได้พูดไว้แล้วว่าเมื่อกระแสอีเลคตรอนไหลในเส้นลวด เส้นลวดจะแสดงสมบัติต่าง ๆ เช่นต่อไปนี้ :—

(๑) เกิดอำนาจแม่เหล็กรอบเส้นลวด (electro–magnetic effect).

(๒) เกิดความร้อน (heat effect).

(๓) เกิดแสงสว่าง (light effect).

(๔) เกิดแยกเนื้อธาตุออกจากน้ำยาได้ (chemical effect).

(๕) เกิดจักจี้เส้นประสาท (physiological effect).

ฯ ล ฯ ฯ ล ฯ

ต่อไปนี้จะพูดถึงสมบัติของกระแสอีเลคตรอนให้ละเอียดเป็นเรื่อง ๆ ไป จนถึงการวัดจำนวนต่าง ๆ ในเรื่องไฟฟ้า และการวัดจำนวนเหล่านี้ก็ต้องอาศัยเปรียบผลอำนาจที่จะปรากฏขึ้นจะเป็นกำลังแม่เหล็ก หรือจำนวนความร้อน หรือจำนวนแสงสว่าง หรือจำนวนเนื้อธาตุที่แยกออกจากน้ำยา ย่อมใช้เปรียบเป็นจำนวนสำหรับวัดไฟฟ้าทั้งนั้น เช่นพูดง่าย ๆ หม้อไหนจักกะจี้เรามาก หม้อนั้นก็แรงมาก หม้อไหนทำให้เส้นลวดร้อนกว่ากัน หม้อนั้นก็ส่งกระแสผ่านเส้นลวดได้มากกว่าอีกหม้อหนึ่ง.

บัดนี้จะกล่าวถึงเรื่องการแยกธาตุจากน้ำยาก่อน ทั้งนี้ไม่ใช่เพราะเรื่องนี้สำคัญกว่าเรื่องอื่น แต่เพราะเคยสังเกตว่าในตอนต้นนี้นักเรียนจับความหมายของหน่วยไฟฟ้าคือ วอลต์ แอมแปร์ โอห์ม ไม่ใคร่ได้มั่น และถ้าตั้งต้นด้วยการแยกเนื้อธาตุจากน้ำยาด้วยไฟฟ้า นักเรียนมักเข้าใจได้ง่ายดีกว่าตั้งต้นด้วยเรื่องอำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้าและเรื่องกัลวานอมิเตอร์.

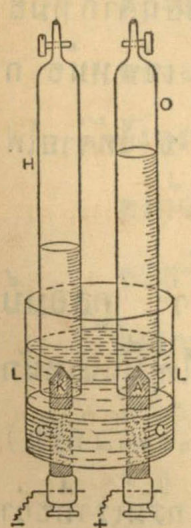
๓. **การแยกเนื้อธาตุด้วยไฟฟ้า** เมื่อเอาลวด ๒ เส้นต่อจากหม้อไฟฟ้าเส้นหนึ่งต่อจากขั้วบวก อีกเส้นหนึ่งต่อจากขั้วลบแล้วเอาปลายลวดทั้งสองจุ่มลงในน้ำยาโดยไม่ให้ปลายลวดกะทบกัน น้ำยาบางชะนิดช่วยให้กระแสไฟฟ้าแล่นผ่านได้ แต่บางชะนิดกระแสไฟฟ้าแล่นผ่านไม่ได้ น้ำยาที่กระแสไฟฟ้าแล่นผ่านได้ ๆ ชื่อว่าเป็นน้ำยาชะนิด **อิเลคโตรไลต** (electrolyte) ส่วนน้ำยาที่มีกระแสไฟฟ้าแล่นผ่านไม่ได้ได้ชื่อว่า **นอนอิเลคโตรไลต** (non-electrolyte) น้ำยาของกรดเกลือและด่างเป็นอิเลคโตรไลต น้ำยาอื่นเช่นน้ำเชื่อมแอลกอฮอลละลายน้ำเป็นนอนอิเลคโตรไลต สำหรับพวกนอนอิเลคโตรไลตเราเชื่อกันว่าตัวถูกละลายกระจายละเอียดเพียงเป็นอณูเท่านั้น ส่วนพวกอิเลคโตรไลตนั้นถูกละลายกระจายละเอียดยิ่งกว่าอณูลงไปอีกคือกระจายเป็นไอออน เช่นในน้ำยาทองแดงสัลเฟต $CuSO_4$ กระจายออกเป็นไอออน Cu^{++} กับไอออน SO^{--} ปลายลวดที่ต่อจากหม้อไฟฟ้าแล้วจุ่มลงในน้ำยามีชื่อเรียกว่า **อิเลคโตรด** (electrode) อิเลคโตรดที่ปล่อยไฟฟ้าบวกลงในน้ำยาเรียกว่า **แอโนด** (anode) อิเลคโตรดที่ปล่อยไฟฟ้าลบลงในน้ำยาเรียกว่า **แคโทด** (kathode).

เวลาเอาอิเลคโตรดจุ่มลงในน้ำยา ไอออนบวกของตัวถูกละลายวิ่งมาที่แคโทดเพื่อรับอิเลคตรอนจากแคโทด แล้วไอออนนั้นกลายเป็นปกติ ส่วนไอออนลบของตัวถูกละลายวิ่งไปที่แอโนดเพื่อคลายอิเลคตรอนให้แก่แอโนด แล้วไอออนนั้นกลายเป็นปกติ ไอออนที่วิ่งไปหาแอโนดเรียกว่า **แอไนออน** (anion) ไอออน

ที่วิ่งไปหาแคโทดเรียกว่า แคไทออน (kathion) เช่นตัวอย่างในเรื่องน้ำยาของทองแดงซัลเฟต Cu^{++} เป็นแคไทออนและวิ่งไปหาแคโทด และเมื่อได้รับอิเลคตรอนจากแคโทดแล้วก็กลายเป็นปรมาณูทองแดง Cu° คือเนื้อธาตุทองแดงตามปกติ คงเป็นกลางและหมดอำนาจไฟฟ้า เลยเกาะอยู่ที่แผ่นแคโทดและปรากฏเหมือนกับว่าถูกแยกออกจากน้ำยา ส่วน SO_4^{--} เป็นแอไนออนวิ่งไปหาแอโนดและเมื่อคายอิเลคตรอนให้แก่แอโนดแล้ว ในขณะเดียวกันนั้นแย่งไฮโดรเจนออกจากน้ำ ผะสมกันเป็นกรดซัลฟิวริคซึ่งในทันที ไอออไนส (ionise) เป็น H^+ H^+ กับ SO_4^{--} แล้วปล่อยให้นิวตราลออคซิเจนที่เหลือจากน้ำปุดขึ้นที่ตรงนั้นซึ่งปรากฏเหมือนปุดขึ้นจากแอโนด.

การแยกเนื้อธาตุจากน้ำยาด้วยไฟฟ้าเราเรียกว่า **อิเลคโตรลิสิส** (electrolysis) อิเลคตรอนออกจากขั้วลบของหม้อไฟฟ้ามาที่แคโทด แล้วเข้าไปอยู่ในแคไทออนที่มาหาแคโทดทำให้อิเลคตรอนที่ขั้วลบของหม้อไฟฟ้าค่อย ๆ หมดไป ส่วนแอไนออนเมื่อคายอิเลคตรอนให้แก่แอโนดแล้ว อิเลคตรอนไปอยู่ที่ขั้วบวกของหม้อไฟฟ้าและไปรวมกันมากเข้า ๆ จนอิเลคตรอนเบียดกันแน่นเข้า ที่ขั้วลบก็หมดกระแสอิเลคตรอน (ไฟหมดหม้อ) ความเบียดระหว่างอิเลคตรอนที่ขั้วทั้งสองของหม้อเท่ากัน.

การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าก็มีเรื่องราวทำนองเดียวกัน เมื่อแรกจุ่มอิเลคโตรดลงไปในน้ำกระแสไฟไม่เดิร เพราะน้ำเป็นนอนอิเลคโตรไลต นับว่าไม่ไอออไนส เราต้องเติมกรดลงไปด้วยสองสามหยด แล้วกระแสไฟจึงจะเดิรได้ กรดทำหน้าที่คล้าย ๆ กับว่าเป็นเรือจ้างให้แก่อิเลคตรอน สมมุติว่าเราเติมกรดซัลฟิวริค H_2SO_4 ที่เติมลงไปไอออไนส์ออกเป็น H^{++} กับ SO_4^{--}, H^+ วิ่งไปที่แคโทดเพื่อรับอิเลคตรอนจากแคโทด เมื่อได้รับอิเลคตรอนแล้วก็กลายเป็นปรมาณูนิวตราล H° คือเป็นธาตุไฮโดรเจนและปุดขึ้นข้างบนตรงที่นั้น ไฮโดรเจนหนึ่งไอออนทำให้หม้อไฟฟ้าเปลื่องอิเลคตรอนไปหนึ่งอิเลคตรอน ส่วน



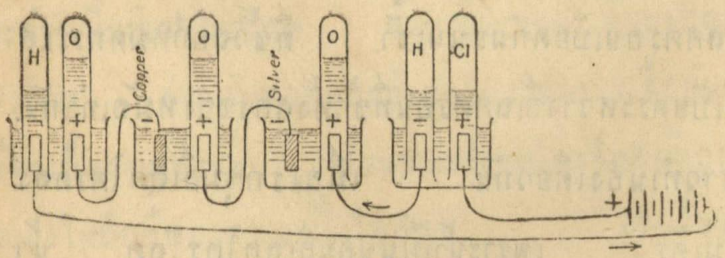
รูป ๕๕

SO_4^{--} วิ่งไปที่แอโนดเพื่อคายอิเลคตรอนให้แก่แอโนดแล้วอิเลคตรอนไปรวมอยู่ที่ขั้วบวกของหม้อไฟฟ้า ทำให้ขั้วบวกของหม้อไฟฟ้าพร่องอิเลคตรอนน้อยเข้า เมื่อ SO_4^{--} คายอิเลคตรอนให้แก่แอโนดแล้วก็แย่งไฮโดรเจนมาจากน้ำ รวมกันเป็นกรดสัลฟิวริค H_2SO_4 แล้วไอออไนส์เป็น H^+ H^+ กับ SO_4^{--} ต่อไปใหม่ ออคซิเจนที่เหลือจากน้ำก็ปุดขึ้นตรงที่แอโนด.

๔. กฎเรื่องอีเลคโตรลิสิสของฟาราเดย์ ฟาราเดย์เป็นผู้แรกพบความจริงในเรื่องอีเลคโตรลิสิส และได้ตั้งเป็นกฎไว้ ๒ ข้อ:-

(๑) จำนวนเนื้อธาตุที่แยกออกจากน้ำยาย่อมได้ส่วนตามจำนวนไฟฟ้าที่ได้ผ่านน้ำยาไปแล้ว.

(๒) ถ้าจำนวนไฟฟ้าเท่า ๆ กันผ่านน้ำยาต่าง ๆ ชะนิด จำนวนเนื้อธาตุที่แยกออกมาจากน้ำยาจะได้ส่วนตามสมมูลย์เคมีของธาตุเหล่านั้น.



รูป ๕๖

เนื่องจากความจริงตามข้างบนนี้เราเอาใช้จำนวนเนื้อธาตุที่แยกออกจากน้ำยาสำหรับวัดส่วนจำนวนไฟฟ้าที่ไหลออกจากหม้อไฟฟ้าต่าง ๆ ได้ เช่น หม้อ ก แยกทองแดงได้ ๘ กรัม หม้อ ข แยกได้ ๑๖ กรัม ก็แปลว่าหม้อ ข ได้จ่ายไฟไปแล้ว เป็นจำนวนสองเท่าของหม้อ ก.

๕. หน่วยสำหรับไฟฟ้า หน่วยสำหรับวัดจำนวนไฟฟ้าเรียกว่า คูลอมบ์ (coulomb) คือเป็นจำนวนไฟฟ้าที่แยกเนื้อเงินออกจากน้ำยาเกลือเงินได้เป็นน้ำหนัก ๐.๐๐๑๑๑๘ กรัม (หรือแยกธาตุอื่นตามจำนวนสมมูลย์เคมีของเงิน ๐.๐๐๑๑๑๘ กรัม)

ถ้าหม้อไฟหม้อหนึ่งปล่อยไฟไปแล้วแยกเนื้อเงินได้น้ำหนัก .๑๑๑๘ กรัมเราถือว่าหม้อนั้นได้จ่ายไฟไปแล้วเป็นจำนวน ๑๐๐ คูลอมบ์ และถ้าแยกตะกั่วได้ ๐.๑๐๗๑

กรัมก็เป็นจำนวนไฟ ๑๐๐ คูลอมบ์เหมือนกัน เพราะว่าตะกั่ว ๐.๑๐๗๑ กรัมเป็นสมมูลย์เคมีของเงิน ๐.๑๑๑๘ กรัม.

อิเลคตรอนมีขนาดเล็กเกินไปจนเราหมดความเข้าใจ ไม่มีหนทางนำมาใช้เป็นหน่วยสำหรับเปรียบเทียบได้.

๑ อิเลคตรอนเท่ากับ ๑๕.๙๒×๑๐^{-๒๐} คูลอมบ์ หรือกลับกันเสีย ๑ คูลอมบ์เท่ากับ ๖.๒๘๑×๑๐^{๑๙} อิเลคตรอน และจำนวนตั้ง ๑๙ ตัวเลขเช่นนี้เราย่อมเข้าใจปริมาณไม่ได้แล้ว จำนวนอิเลคตรอนเท่าที่กล่าวนี้ถ้าเอามาเรียงมิลลิเมตรละสิ่งนึงอิเลคตรอน ก็มีอิเลคตรอนพอเอามาเรียงต่อจากโลกถึงดวงอาทิตย์.

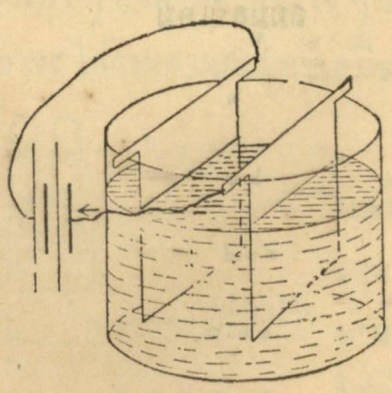
บัญชีสมมูลย์เคมีและสมมูลย์ไฟฟ้าเคมีของธาตุ

ชื่อธาตุ	สมมูลย์เคมี	สมมูลย์ไฟฟ้าเคมี
ไฮโดรเจน	๑	.๐๐๐๐๑๐๓๘
โซเดียม	๒๓	.๐๐๐๒๓๘๘
เงิน	๑๐๘	.๐๐๑๑๑๘
ทองแดง (คิวปริค)	๓๑.๖	.๐๐๐๓๒๘๑
ทองแดง (คิวปรัส)	๖๓.๒	.๐๐๐๖๕๖๒
สังกะสี	๓๒.๕	.๐๐๐๓๓๗๐
ตะกั่ว	๑๐๓.๒	.๐๐๑๐๗๑
ออคซิเจน	๘	.๐๐๐๐๘๒๘๖
ไนโตรเจน	๔.๖๖	.๐๐๐๐๔๘๔๙
ไอโอดีน	๑๒๗	.๐๐๑๓๑๔
ฯ ฉ ฯ	ฯ ฉ ฯ	ฯ ฉ ฯ

หมายเหตุ สมมูลย์เคมีคือน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่ประสมกันหรือแทนที่กันได้เหมาะส่วนพอดี.

สมมูลย์ไฟฟ้าเคมีคือน้ำหนักของเนื้อธาตุที่ไฟฟ้า ๑ คูลอมบ์สามารถแยกออกจากน้ำยาได้.

เครื่องมือที่ใช้ประกอบในเรื่องการแยกธาตุด้วยไฟฟ้าเราเรียกว่า **อิเลคโตรลิติคเซลล์** (electrolytic cell) และเครื่องมืออันเดียวกันนี้ถ้าเราใช้สำหรับเป็นเครื่องวัดจำนวนไฟฟ้าเราเรียกว่า **วอลแตมิเตอร์** (voltameter) และต่อไปเราจะพบเครื่องมืออีกชะนิดหนึ่งเรียกว่า **วอลต์มิเตอร์** (voltmeter) ซึ่งคล้ายกันแต่เป็นเครื่องมือคนละชะนิดต่างกันมาก.



รูป ๕๗

๖. คูลอมบ์ หม้อไฟฟ้ามีเรื่องราวเปรียบเทียบกับถังน้ำหรือเครื่องสูบน้ำได้เป็นอย่างดี เมื่อปล่อยให้น้ำไหลเสร็จแล้ว เราย่อมวัดหรือดวงรู้ได้ว่าน้ำไหลออกแล้วกี่ปี๊บกี่แกลลอน หม้อไฟฟ้าก็เช่นเดียวกัน เมื่อปล่อยไฟเสร็จแล้วเราย่อมวัดรู้ได้ว่าไฟไหลออกไปแล้วกี่คูลอมบ์ ขณะปล่อยไฟฟ้าจงให้ไฟผ่านวอลแตมิเตอร์ แล้วเอาแผ่นเคโทดชั่งให้รู้น้ำหนักธาตุเงินที่เกาะติดว่ากี่กรัม เอา ๐.๐๐๑๑๑๘ หารผลลัพธ์เป็นจำนวนคูลอมบ์ที่ปล่อยไฟไปแล้ว.

๗. **แอมแปร์** เวลาน้ำไหลจากท่อ อัตราไหลของน้ำย่อมต่าง ๆ กัน ในเวลาเท่ากันเรารองน้ำจากท่อต่าง ๆ ได้เป็นจำนวนไม่เท่ากัน ไฟฟ้าก็เช่นเดียวกัน กระแสหรืออัตราไหลไม่เหมือนกัน ถ้าหม้อไฟจ่ายไฟได้วินาฑีละ ๑ คูลอมบ์ เราพูดว่าหม้อไฟปล่อยกระแสหรือมีอัตราไหล ๑ **แอมแปร์** (ampère) และถ้าวินาฑีละ ๕ คูลอมบ์ก็ ๕ แอมแปร์ เช่นตัวอย่างหม้อ ก ปล่อยไฟแยกเนื้อเงินได้ .๑๑๑๘ กรัม และหม้อ ข ก็ปล่อยไฟแยกเนื้อเงินได้ .๑๑๑๘ กรัม แน่ละทั้งสองหม้อต่างก็หมดไฟไปแล้วหม้อละ ๑๐๐ คูลอมบ์ แต่ถ้าหม้อ ก กินเวลาเพียงห้าวินาฑีได้เนื้อเงิน .๑๑๑๘ กรัม ส่วนหม้อ ข กินเวลา ๕๐ วินาฑีจึงได้เนื้อเงินเท่ากัน ก็แปลว่าหม้อ ก จ่ายไฟวินาฑีละ ๒๐ คูลอมบ์ หรือ ๒๐ แอมแปร์ และหม้อ ข จ่ายไฟวินาฑีละ ๒ คูลอมบ์ หรือ ๒ แอมแปร์.

๘. **โอฮ์ม** เวลาน้ำไหลจากถังใบเดียวกันหรือจากสูบเครื่องเดียวกัน ถ้าเราเลือกต่อด้วยท่อต่าง ๆ สั้นบ้างยาวบ้าง หรือยาวเท่ากันแต่ขนาดต่างกัน หรือสั้นยาวเท่ากัน ขนาดเท่ากันแต่เป็นท่อคนละชะนิด เช่นท่อผ้าใบบ้าง ท่อเหล็กบ้าง ในเวลาเท่ากันจะรองน้ำได้เป็นจำนวนต่างกัน ท่อสั้นรองน้ำได้มากกว่าท่อยาว ท่อเกลี้ยงรองน้ำได้มากกว่าท่อมีพันขรุขระ ไฟฟ้าก็เหมือนกัน ถ้าใช้ลวดใหญ่บ้างเล็กบ้างสั้นบ้างยาวบ้าง ต่างชะนิดกันบ้าง ต่อไฟจากหม้อเดียวกัน ไฟจะออกจากหม้อไม่เหมือนกัน ไฟฟ้าแล่นผ่านลวดยาวได้ช้ากว่าลวดสั้น ลวดบางชะนิดไฟฟ้าผ่านได้ง่าย บางชะนิดผ่านได้ยาก บางชะนิดแทบผ่านไม่ได้เลย.

ลวดต่าง ๆ ให้ความสะดวกต่อการไหลของไฟฟ้าไม่เหมือนกัน ในเรื่องน้ำถ้าเราใคร่จะเปรียบเทียบความสะดวกของท่อต่าง ๆ ว่าเป็นกี่เท่าของกัน เราทดลองได้ง่าย ๆ ดังนี้ เอาท่อ ก กับท่อ ข ต่อจากถังน้ำใบเดียวกัน แล้วเทียบกระแสน้ำที่ไหลผ่านท่อทั้งสอง เช่นสมมติว่า ก ปล่อยน้ำได้วินาฑีละ ๑ ถ้วย และ ข ปล่อยน้ำได้วินาฑีละ ๓ ถ้วย ก็แปลว่า ข สะดวก ๓ เท่าของ ก (ในเรื่อง

เช่นนี้เรามีวิธีพูดให้เข้าใจได้กัน ๒ วิธี และให้ความเข้าใจต่อกันได้เหมือนกันตรงกัน คือจะพูดถึงความสะดวกก็ได้ หรือจะพูดถึงความต้านทานก็ได้ ตามตัวอย่างข้างบน ถ้าจะพูดถึงความสะดวกก็พูดว่า ข สะดวก ๓ เท่าของ ก แต่ถ้าจะพูดถึงความต้านทานก็พูดว่า ก มีความต้านทาน ๓ เท่า ของ ข)

ในเรื่องไฟฟ้าก็ทำนองเดียวกัน ถ้าใคร่จะรู้ว่าลวด ก กับลวด ข เส้นไหนจะมีความสะดวกหรือความต้านทานเป็นกี่เท่าของกัน เรามีวิธีเปรียบเทียบให้รู้ได้โดยเอาลวดทั้งสองต่อจากขั้วใดขั้วหนึ่งของหม้อไฟอันเดียวกัน แล้วแยกกันมาต่อกับวอลแตมิเตอร์เส้นละอัน แล้วหาลวดอื่นเส้นโต ๆ และสั้นต่อจากวอลแตมิเตอร์ไปยังอีกขั้วหนึ่งของหม้อไฟ แล้ววัดกระแสไฟที่ผ่านลวด ก ลวด ข เทียบกันจากจำนวนเนื้อธาตุที่แยกได้ในวอลแตมิเตอร์ เช่นสมมุติว่าวอลแตมิเตอร์ต่อกันกับลวด ก แยกเงินได้ ๒ กรัมและต่อกับลวด ข แยกได้ ๔ กรัมในเวลาเท่ากัน ดังนี้แปลว่ากระแสที่ผ่านลวด ก มีจำนวนเพียงครึ่งเดียวของกระแสที่ผ่านลวด ข ดังนั้น ก มีความต้านทานเป็นสองเท่าของลวด ข

หน่วยสำหรับวัดความต้านทานของเส้นลวดในเรื่องไฟฟ้าเรียก โอห์ม (ohm) คือเป็นจำนวนความต้านทานซึ่งเท่ากับความต้านทานของปรอทเมื่อ ๐° ซ. หนัก ๑๔.๔๕๒๑ กรัมทำให้เป็นแท่งโตเสมอต้นเสมอปลายยาว ๑๐๖.๓๐๐ ซม. โดยเอาเทใส่ในรางไม้มีขนาดยาวเท่าที่ว่า ลวดทองแดงเบอร์ ๑๘ ยาว ๗๕.๑ หลาหรือ ๖๗.๗ เมตร มีความต้านทานประมาณ ๑ โอห์ม

ในเรื่องตัวอย่างข้างบน เมื่อเทียบความต้านทานระหว่างลวด ก และ ข แล้วเรารู้เพียงแต่ว่า ก มีความต้านทานเป็นกี่เท่าของ ข แต่ถ้าจะใคร่รู้ให้ละเอียดกว่านี้คือรู้ว่า ก และ ข มีความต้านทานเส้นละกี่โอห์ม จำเป็นต้องเอารางปรอทมาต่อกับวอลแตมิเตอร์อีกอันหนึ่งสำหรับเอาเนื้อเงินที่แยกได้ไปเทียบกันดู เช่นตัวอย่างข้างบน ก ได้เนื้อเงิน ๑ กรัม ข ได้เนื้อเงิน ๔ กรัม และสมมุติว่ารางปรอท

ได้เนื้อเงิน ๒ กรัม ดังนี้เราเทียบกันได้ทันทีว่า ก มีความต้านทาน ๒ เท่าของรางปรอทคือ ๒ โอห์ม และ ข มีความต้านทาน ๑/๒ ของรางปรอทคือ ๑/๒ โอห์ม

๙. **วอลต์** เวลาต่อท่อน้ำจากถังน้ำต่าง ๆ หรือจากเครื่องสูบน้ำต่าง ๆ แม้ใช้ท่ออันเดียวกันก็รองน้ำไม่ได้เหมือนกันเสมอไป เพราะเรื่องนี้เกี่ยวกับระดับน้ำในถังและแรงดันของเครื่องสูบน้ำด้วย ท่ออันเดียวกันเมื่อต่อกับถังที่มีระดับน้ำสูง น้ำจะไหลผ่านท่อได้แรงและรองน้ำได้มาก ถ้าต่อกับถังมีระดับน้ำต่ำ น้ำจะค่อย ๆ ไหลผ่านท่อและรองน้ำได้น้อย ดังนี้ถ้าเราใคร่จะเทียบระดับน้ำในถังสองใบ เราเอาท่ออันเดียวกันไปลองต่อเบิดน้ำดู ถังไหนปล่อยน้ำได้แรง ถังนั้นมีระดับน้ำสูงกว่า ถ้าจะใคร่รู้ว่ามีระดับน้ำสูงเป็นกี่เท่าของกัน ต้องรองน้ำในเวลาเท่ากันแล้วเทียบจำนวนน้ำที่รองได้ สมมุติว่าถัง ก รองน้ำได้นาทีละ ๒ ปี๊บ ถัง ข รองน้ำได้นาทีละ ๔ ปี๊บ ก็แปลว่าถัง ข มีระดับ ๒ เท่าของถัง ก ถ้าเป็นเครื่องสูบน้ำก็แปลว่าเครื่อง ข มีแรงดัน ๒ เท่าของเครื่อง ก

หม้อไฟฟ้าก็ทำนองเดียวกัน แม้ใช้ลวดเส้นเดียวกันต่อไฟจากหม้อต่าง ๆ กัน จะได้ไฟไม่เท่ากัน เรื่องนี้เกี่ยวกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อต่าง ๆ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของทุกหม้อเท่ากันและใช้ลวดเส้นเดียวกันต่อไฟ ก็เป็นธรรมดาจะได้ไฟเท่ากัน แต่ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่เท่ากัน หม้อที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากก็จะส่งกระแสไฟผ่านเส้นลวดได้มาก ถ้าหม้อหนึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น ๓ เท่าของอีกหม้อหนึ่ง หม้อที่แรงกว่าก็ส่งกระแสไฟผ่านเส้นลวดได้ ๓ เท่าของอีกหม้อหนึ่ง ดังนี้ถ้าเราใคร่จะเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อต่าง ๆ ว่าเป็นกี่เท่าของกัน ก็ต้องใช้ลวดเส้นเดียวหรือชุดเดียวกันต่อจากหม้อไฟโยงไปที่วอลแตมิเตอร์คราวละหม้อ ซึ่งเนื้อธาตุที่แยกออกเทียบกระแสไฟว่าเป็นกี่เท่าของกัน ถ้าหม้อ ก ได้กระแส ๓ เท่าของของหม้อ ข ก็แปลว่าหม้อ ก มีศักย์ หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น ๓ เท่าของหม้อ ข.

หน่วยสำหรับวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อไฟเรียกว่า วอลต์ (Volt) คือเป็นความดันไฟฟ้าที่สามารถส่งกระแสผ่านความต้านทาน ๑ โอห์มได้ ๑ แอมแปร์ ถ้าหม้อหนึ่งส่งกระแสผ่านความต้านทาน ๖ โอห์ม ได้ ๒ แอมแปร์ หม้อนั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑๒ วอลต์.

วิธีวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อไฟต้องเอาหม้อไฟต่อกับวอลแตมิเตอร์ และต้องต่อให้ผ่านรางปรอทด้วย แล้วชั่งเนื้อเงินที่แยกได้มาคิดกระแสไฟให้รู้ ถ้าได้กระแส ๑ แอมแปร์ก็เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑ วอลต์ ถ้า ๒ แอมแปร์ก็ ๒ วอลต์ ฯลฯ.

ข้อเปรียบเทียบระหว่างหน่วยน้ำกับหน่วยไฟฟ้า

น้ำ	ไฟฟ้า
จำนวน วัดเป็นปีบ	จำนวน วัดเป็นคูลอมบ์
กระแส วัดเป็นปีบในหน่วยเวลา	กระแส วัดเป็นแอมแปร์
ความต้านทาน (ไม่มีหน่วยฉะเพาะ)	ความต้านทาน วัดเป็นโอห์ม
แรงดัน (ไม่มีหน่วยฉะเพาะ)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า วัดเป็นวอลต์

หมายเหตุ นักเรียนจงอ่านเรื่องที่กล่าวมาแล้ว ๔ หัวข้อให้เข้าใจ แล้วถามตัวเองว่า.—

(๑) ถ้าใคร่จะรู้ว่าหม้อไฟจ่ายไฟไปแล้วกี่คูลอมบ์ จะต้องตั้งเครื่องทดลองอย่างไร

(๒) ถ้าใคร่จะรู้ว่าหม้อไฟปล่อยกระแสกี่แอมแปร์ จะต้องตั้งเครื่องทดลองอย่างไร.

(๓) ถ้าใคร่จะรู้ว่าลวดของเรามีความต้านทานกี่โอห์ม จะต้องตั้งเครื่องทดลองอย่างไร.

(๔) ถ้าใคร่จะรู้ว่าหม้อไฟมีแรงเคลื่อนไฟฟ้ากี่โวลต์ จะต้องตั้งเครื่องทดลองอย่างไร.

ตัวอย่าง.— (๑) กระแสไฟ ๒.๕ แอมแปร์ ในเวลา ๒๐ นาฑีจะแยกน้ำได้หนักเท่าไร?

หนึ่งคูลอมบ์แยกไฮโดรเจนได้ .0000103 กรัม

,, ,, ออคซิเจนได้ .0000824 ,,

ฉะนั้น ,, ,, น้ำได้ .0000927 ,,

2.5 แอมแปร์ชั่วเวลา 20 นาฑี

เป็นจำนวน $2.5 \times 20 \times 60$ คูลอมบ์

จำนวนน้ำที่ถูกแยกทั้งหมด $= .0000927 \times 2.5 \times 20 \times 60$ กรัม

$= 0.2781$ กรัม

(๒) ถ้าต้องการแยกทองแดงออกจากน้ำยาให้ได้ ๒๐ กรัมในเวลา๑๐ นาฑี จะต้องใช้กระไฟแรงเท่าไร?

ใช้สูตร $m = iet.$

$m =$ จำนวนน้ำอาตุที่แยกออกจากน้ำยา.

$i =$ กระแสไฟ.

$e =$ สมมูลย์ไฟฟ้าเคมี.

$t =$ เวลาเป็นวินาฑี.

สำหรับโจทย์นี้ $20 = i \times .000326 \times 10 \times 60.$

$i = 102.2$ แอมแปร์.

(๓) กระแสไฟ ๓ แอมแปร์ชั่วเวลา ๓๐ นาฑีจะแยกไฮโดรเจนจากน้ำได้เป็นบริมาตรเท่าไร? เวลาทดลองอากาศมีความดัน ๗๕๐ มม. อุณหภูมิ ๑๐° ซ.

ความแน่นของไฮโดรเจนเมื่อ 0° ซ. 760 มม. เท่ากับ .0000896. คิดน้ำหนักของไฮโดรเจนที่แยกได้เสียก่อนตามสูตร.

ได้น้ำหนักแล้วคิดเปลี่ยนเป็นบริมาตรโดยเอาความแน่นหารน้ำหนัก.

แล้วเปลี่ยนบริมาตรให้ตรงกับความดันและอุณหภูมิตามโจทย์.

น้ำหนักไฮโดรเจน $.0000103 \times 3 \times 30 \times 60$ กรัม.

บริมาตรเมื่อ 0° ซ. 760 มม.

$$= (.0000103 \times 3 \times 30 \times 60) \div .0000896.$$

บริมาตรเมื่อ 10° ซ 750 มม.

$$= \frac{.0000103 \times 30 \times \times 30}{.0000896} \times \frac{283 \times 760}{273 \times 750}$$

$$= 652 \text{ ลบ. ซม.}$$

๗๐. ความต้านทานกับความนำไฟฟ้า (resistance กับ conductance) คำว่าตัวนำกับฉนวนสองศัพท์นี้แยกกันไม่ออก เพราะเป็นแต่เพียงสมบัติเปรียบเทียบของวัตถุเท่านั้น ใครจะนิยมจะใช้ศัพท์ไหนย่อมใช้ได้ทั้งนั้นและได้ความเข้าใจเท่ากัน ก มีมี ๕ เท่า ข หรือจะพูดว่า ข จน ๕ เท่า ก คนฟังจะเทียบฐานะของคนทั้งสองได้ดีเท่ากัน ถ้าลวด ก มีความต้านทาน ๓ เท่าของลวด ข ลวด ข ก็มีความนำ ๓ เท่าของลวด ก.

อย่างไรก็ดีจะต้องขอเตือนแต่ว่า ในเรื่องไฟฟ้านั้น ตอนอิเลคโตรสแตติคกับตอนอิเลคโตรไดนามิคเราเกี่ยวข้องกับไฟฟ้าที่มีความเป็นอยู่คนละอย่าง ในตอนอิเลคโตรสแตติคเราพูดถึงไฟฟ้าอยู่กับที่ ส่วนอิเลคโตรไดนามิคเราพูดถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ ตอนอิเลคโตรสแตติคเราเกี่ยวกับศักย์และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงมาก นับด้วยหมื่นด้วยแสนวอลต์ แต่ในเรื่องอิเลคโตรไดนามิคเราเกี่ยวกับศักย์ต่ำและแรง

เคลื่อนไฟฟ้าน้อย ๆ เพียง ๑ วอลต์ ๒ วอลต์ ถ้าถึง ๑๐๐ วอลต์ก็ว่ามากแล้ว และถ้ายิ่งถึง ๕๐๐ วอลต์ เรายิ่งกลัวกันมาก ไม่ขอเข้าใกล้ แต่ในตอนนี้จำนวนแอมแปร์ของเรามาก.

เนื่องจากศักย์ในเรื่องอิเลคโตรสแตติคกับอิเลคโตรไดนามิคต่างกันมาก ลำดับเปรียบเทียบชะนิดของตัวนำและฉนวนจึงต่างกันและละเอียดกว่ากัน เช่นน้ำเราถือว่าเป็นตัวนำที่ดีสำหรับเรื่องอิเลคโตรสแตติค สำหรับเรื่องอิเลคโตรไดนามิคเราถือว่าน้ำเป็นตัวนำที่เลวมากหรือเป็นฉนวนที่ดี สำหรับเรื่องอิเลคโตรสแตติคพวกโลหะต่าง ๆ เปรียบเทียบไม่ได้ว่าชะนิดไหนเป็นตัวนำดีกว่ากัน เพราะเมื่อเอาโลหะไปลองกับไฟฟ้าที่มีศักย์ตั้งหมื่นตั้งแสนวอลต์ โลหะย่อมเป็นตัวนำที่ดีเลิศหมด แต่สำหรับอิเลคโตรไดนามิคซึ่งเราใช้ไฟฟ้ามีศักย์น้อย ๆ เราลำดับโลหะได้ชัดเจนว่าอันไหนเป็นตัวนำดีกว่าอันไหน.

ความต้านทานกับความนำเมื่อพูดเป็นจำนวนตัวเลขย่อมเป็นจำนวนที่กลับเศษเป็นส่วนของกันและกัน เช่นถ้าลวด ก มีความต้านทาน ๕ เท่าของลวด ข ลวด ข ก็มีความนำ ๕ เท่าของลวด ก คือลวด ก มีความนำ ๑/๕ ของลวด ข ถ้าลวด ก มีความต้านทาน R ลวด ก ก็มีความนำ $\frac{1}{R}$

หน่วยวัดความต้านทานเรียกว่าโอห์ม (ohm) หน่วยความนำเราเรียกโดยกลับชื่อศาตราจารย์ที่ตั้งหน่วยโอห์มเสียว่า โมห์ (mho)

วัตถุต่าง ๆ ชะนิดมีความต้านทานมากน้อยไม่เหมือนกัน สำหรับแท่งโลหะที่มีส่วนกว้าง ยาวหนาเท่ากัน ถ้าเงินมีความต้านทานหนึ่งส่วน ธาตุอื่นมีส่วนดังนี้.—

เงิน	๑ ส่วน	ทองแดง	๑.๑ ส่วน
ทองคำ	๑.๓ ,,	อาลูมิเนียม	๒.๐ ,,
ทองเหลือง	๔.๕ ,,	ทองคำขาว	๖.๐ ,,

ฟอสฟอร์บรอนซ์	๖.๓ ส่วน	เหล็ก	๖.๔ ส่วน
ดีบุก	๙ ,,	ตะกั่ว	๑๓ ,,
เยอร์มันสิลเวอร์	๑๗ ,,	แปลตินอยด์	๒๒ ,,
แมงกานิน	๓๒ ,,	ปรอท	๖๓ ,,

สำหรับวัตถุชะนิดเดียวกัน ความต้านทานได้ส่วนตามลักษณะและขนาดของวัตถุ ความต้านทานเพิ่มขึ้นตามส่วนยาวของวัตถุและน้อยลงตามส่วนของพื้นที่รอยตัดของแท่งวัตถุ.

พูดห้วนๆ อย่างภาษาเลข ความต้านทานได้ส่วนโดยตรงกับส่วนยาวและได้ส่วนตรงกันข้ามกับพื้นที่รอยตัด.

$$R \propto \frac{l}{a}$$

$$R = k\frac{l}{a}$$

k = นิจ (constant) ตามภาษาเลข และถ้าจะพูดให้ละเอียดลงไปอีกตามศัพท์ไฟฟ้า k ในที่นี้เป็นความต้านทานจำเพาะ (specific resistance) ของวัตถุ คือ เป็นความต้านทานของวัตถุที่ยาว ๑ ซม. และมีพื้นที่รอยตัด ๑ ตาราง ซม.

l = ส่วนยาวของวัตถุเป็นเซ็นติเมตร.

a = พื้นที่รอยตัดของวัตถุเป็นตารางเซ็นติเมตร.

ถวดเส้นเดียวกัน ถ้าอุณหภูมิมากขึ้น ความต้านทานจะมากขึ้นด้วยเป็นลำดับ

$$R_t = R_o\ (1 + at)\ ;\ a = .004 \text{ ต่อ } 1^\circ C.$$

บัญชีความต้านทานจำเพาะ (หรือค่าของ k)

เงิน	๑.๔๙ ไมโครโอห์ม	เหล็ก	๑๕.๐๐ ไมโครโอห์ม
ทองแดง (บริสุทธิ์)	๑.๕๗ ,,	เยอร์มันสิลเวอร์	๒๐.๗๖ ,,

ทองแดง (ธรรมดา)	๑.๗๐	ไมโครโอห์ม	แปลตินอยด์	๓๒.๕๐	ไมโครโอห์ม
อาลูมิเนียม	๒.๙๐	,,	แมงกานิน	๔๗.๕๐	,,
ทองคำขาว	๙.๐๐	,,	ปรอท	๙๔.๐๗	,,
เหล็กกล้า	๑๒.๐๐	,,	ถ่าน	๔๐๐๐	,,
น้ำบริสุทธิ์	๒๕	เมกโอห์ม	แก้ว	๙๑,๐๐๐,๐๐๐	เมกโอห์ม

(ล้านไมโครโอห์ม เท่ากับ ๑ โอห์ม, ล้านโอห์ม เท่ากับ ๑ เมกโอห์ม).

จากบัญชีข้างบนเราย่อมคำนวณความต้านทานของเส้นลวดต่างๆได้ เช่น ลวดทองแดงเส้นหนึ่งยาว ๑๐๐ เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง .๗ มิลลิเมตร จะมีความต้านทานเท่าไร ?

$k = 1.7$ ไมโครโอห์ม.

$l = 100 \times 100$ ซม.

$k = \pi \times (\frac{.35}{10})^2$ ตาราง ซม.

$$R = k\frac{l}{a} = (1.7) \times (100 \times 100) \div (\frac{22}{7} \times \frac{.35 \times .35}{100}) \text{ ไมโครโอห์ม}$$

$$= \frac{1.7 \times 100 \times 100 \times 7 \times 100}{22 \times .35 \quad .32} \text{ ไมโครโอห์ม}$$

$$= \frac{1.7 \times 100 \times 100 \times 7 \times 100}{22 \times .35 \times .35 \times 1000000} \text{ โอห์ม}$$

$$= 4.4155 \text{ โอห์ม.}$$

๑๑. **กฎของโอห์ม** ได้พูดไว้แต่ตอนต้นแล้วว่ากระแสไฟฟ้าอุปมาเหมือนกระแสน้ำที่ไหลในท่อ กระแสจะมากหรือน้อยย่อมสุดแล้วแต่ระดับน้ำในถังและความต้านทานของท่อ ถ้าระดับน้ำสูงมากก็ได้กระแสแรงมาก และถ้าความต้านทานของท่อน้อยก็ได้กระแสแรงมาก.

โอห์มเป็นผู้วางกฎไว้ว่า กระแสไฟฟ้าในตัวนำต่าง ๆ จะน้อยหรือมากย่อมสุดแล้วแต่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากับความต้านทานของตัวนำ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากได้กระแสมาก และถ้าความต้านทานของตัวนำน้อยก็ได้กระแสมาก.

$$\text{กระแส} = \frac{\text{แรงเคลื่อนไฟฟ้า}}{\text{ความต้านทาน}}$$

หรือ $$\text{แอมแปร์} = \frac{\text{วอลต์}}{\text{โอห์ม}}$$

(ตัวย่อแบบอังกฤษ) $C = \frac{E}{R}$

(ตัวย่อแบบอะเมริกัน) $E = \frac{I}{R}$

ตัวอย่าง.– (๑) ขดลวดมีความต้านทาน ๒๐ โอห์มเมื่อต่อกับไฟ ๑๐๐ วอลต์ จะได้กระแส ๕ แอมแปร์.

(๒) พัดลมอันหนึ่งเมื่อต่อกับไฟ ๘๐ วอลต์กินไฟ ๒ แอมแปร์ พัดลมอันนั้นมีความต้านทาน ๔๐ โอห์ม.

(๓) เครื่องมอเตอร์รถรางมีความต้านทาน ๒๕ โอห์ม กินไฟ ๒๐ แอมแปร์ สายรถรางใช้ไฟ ๕๐๐ วอลต์.

๑๒. วงจรไฟฟ้า เวลาไฟฟ้าไหลในเส้นลวดเปรียบได้คล้ายกับน้ำไหลในท่อ การไหลของน้ำคือการเคลื่อนที่ของก้อนอณูของน้ำโดยอาศัยท่อเป็นทางเดิร. อิเลคตรอนเป็นละอองเล็กๆที่อยู่ในปรมาณูและเป็นส่วนหนึ่งของปรมาณู ปรมาณูเป็นส่วนหนึ่งของอณู การไหลของอิเลคตรอนอาศัยเนื้อธาตุคือแนวปรมาณูเป็นทางเดิร แต่อิเลคตรอนไม่เชิงกลิ้งไปตามแนวปรมาณูอย่างน้ำกลิ้งไปตามท่อ อิเลคตรอนไหลกลิ้งไปไม่ได้ อิเลคตรอนถูกดูดอยู่ในปรมาณูและรวมกันกับโปรตอน

ประดุจเป็นจักรวาลน้อยๆ พวกโปรตอนทั้งหมดกับอีเลคตรอนเป็นส่วนมากอยู่รวมกันเป็นกะจุบที่ใจกลางของปรมาณูเรียกว่า **นิวเคลียส** (nucleus) และมีอีเลคตรอนที่เหลือวนอยู่รอบๆนิวเคลียสทำนองดาวพระเคราะห์วนอยู่รอบดวงอาทิตย์ เมื่อเรามีลวดสายหนึ่งก็แปลว่าเรามีปรมาณูรวมเรียงกันเป็นแถว อีเลคตรอนในเส้นลวดต่างคนต่างอยู่ในปรมาณูของใครๆ ไม่จุ้นจ้านกะเด้นไปไหนมาไหนพ้นจากปรมาณูของตัวไป.

หม้อไฟหรือเครื่องทำไฟฟ้าเปรียบเหมือนสูบ แต่ไม่ใช่สูบน้ำ เป็นสูบอีเลคตรอนสำหรับดันอีเลคตรอนให้เคลื่อนที่ผ่านเส้นลวด เวลาเอาลวดต่อหม้อไฟฟ้า อีเลคตรอนอาจถูกดันเข้าไปในปรมาณูแรกของเส้นลวด แล้วถูกดันต่อๆ ไปจนถึงปรมาณูสุดท้ายที่ปลายลวดอีกข้างหนึ่ง แล้วกะเด้นกลับเข้าหม้อไฟฟ้าที่อีกขั้วหนึ่ง โปรตอนคงนิ่งอยู่กับที่ ที่ใจกลางของปรมาณูและไม่ได้เคลื่อนที่ไปไหนกับเขา กระแสไฟเดิรตามเส้นลวดไปที่อีกขั้วหนึ่งของหม้อ กลับเข้าหม้อที่ขั้วนั้น แล้วผ่านหม้อกลับมาที่ขั้วแรกของหม้อ กระแสเดิรเป็นวงรอบๆ วงที่กระแสไฟฟ้าเดิรเรียกว่า **วงจร** (circuit) ทางเดิรตอนที่อยู่ในเส้นลวดนอกหม้อเรียกว่า **วงนอก** (external circuit) ทางเดิรตอนที่อยู่ในหม้อเรียกว่า **วงใน** (internal circuit) หม้อไฟใดที่อยู่เฉยๆ ยังไม่มีตัวนำหรือเส้นลวดโยงต่อระหว่างขั้วทั้งสองของหม้อเพื่อให้ไฟเดิรได้ หม้อไฟนั้นได้ชื่อว่ายังอยู่ใน **วงเปิด** (open circuit) ส่วนหม้อไฟที่มีเส้นลวดโยงต่อระหว่างขั้วทั้งสองของหม้อ และไฟเดิรได้แล้วหม้อนั้นได้ชื่อว่าอยู่ใน **วงปิด** (closed circuit) ลวดที่มีกระแสไฟฟ้ากำลังไหลอยู่บางทีเราก็เรียกกันว่า **ลวดเป็น** (live wire) ลวดที่ไม่มีกระแสไฟเรียกว่า **ลวดตาย** (dead wire).

๑๓. **ความต้านทานภายนอกและความต้านทานภายใน** เนื่องจากกระแสไฟหรืออีเลคตรอนต้องดันผ่านความต้านทานในเส้นลวด ถ้าเส้นลวดยิ่งยาว แรงไฟฟ้าก็ต้องเสียแรงมากเข้า ศักดิ์หรือความดันอีเลคตรอนต้องลด

น้อยลงเป็นลำดับตามกฎของโอห์ม ความต้านทานของเส้นลวดหรือตัวนำตอนที่อยู่นอกหม้อเรียกว่า ความต้านทานตอนนอก หรือ ในวงนอก ส่วนความต้านทานภายในหม้อไฟเรียกว่า ความต้านทานตอนใน หรือ ในวงใน.

เวลาใช้สูตรคำนวณไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม ถ้าจะให้ละเอียดจริงต้องเอาความต้านทานตอนในมารวมคิดด้วย ความต้านทานตอนในมักใช้ตัวย่อว่า B และสูตรสำหรับกฎของโอห์มจึงกลายเป็น $C=\frac{E}{R+B}$

๑๔. แรงเคลื่อนไฟฟ้ากับความต่างศักย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งมักใช้ตัวย่อแทนว่า E.M.F. หมายถึงกำลังงานที่เป็นเหตุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือเป็นแรงดันที่ต้อนอิเลคตรอนให้เคลื่อนที่ได้ ส่วน **ความต่างศักย์** (potential difference) หรือ **ความลดศักย์** (potential drop) ซึ่งมักใช้ตัวย่อแทนว่า P.D. หมายถึงศักย์หรือความดันของอิเลคตรอนที่ต่างกันระหว่างจุดต่าง ๆ ในวงจร.

E.M.F. มักใช้วัดด้วยจำนวน P.D. ที่ขั้วของหม้อขณะที่หม้อไฟยังอยู่ในวงเปิดก็นับว่าได้ผลลัพธ์ใกล้จำนวนที่ถูกจริงพอแล้ว.

P.D. เป็นจำนวนเท่ากับผลคูณระหว่างความต้านทานกับกระแสไฟที่ผ่านความต้านทานนั้น.

ถ้า E = แรงเคลื่อนไฟฟ้า

V = P.D. ที่ขั้วหม้อไฟขณะที่ไฟเดิร

B = ความต้านทานตอนใน

R = ความต้านทานตอนนอก

(๑) $C = \frac{E}{R+B}$ หรือ $E = C(R+B)$

(๒) $C = \frac{V}{R}$ หรือ $V = CR$

(๓) $C = \frac{E-V}{B}$ หรือ $E-V = CB$

ตัวอย่าง.— หม้อไฟตับหนึ่งมี อี. เอม. เอฟ. ๑๒ วอลต์ ความต้านทานตอนใน ๖ โอห์ม ความต้านทานตอนนอก ๑๘ โอห์ม ให้หากระแสไฟ พี. ดี. ที่ขั้วของหม้อไฟ และพี. ดี. ภายในหม้อไฟ.

๑. $$C = \frac{E}{B+R}$$

$$= \frac{12}{6+18}$$

$$= \frac{1}{2} \text{ แอมแปร์}$$

๒. $$C = \frac{V}{R}$$

$$V = CR$$

$$= \frac{1}{2} \times 18$$

$$= 9 \text{ วอลต์}$$

๓. พี. ดี. ภายในหม้อ $(E-V) = CB$

$$= \frac{1}{2} \times 6$$

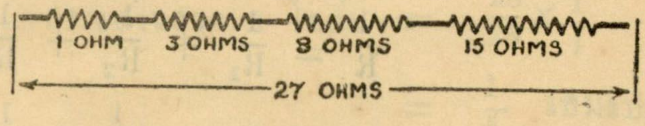
$$= 3 \text{ วอลต์}$$

หรือ $(E-V) = 12 - 9$

$$= 3 \text{ วอลต์}$$

๑๕. การต่อความต้านทานให้รวมกัน มีวิธีต่อใช้ ๒ วิธี .—

(๑) เอาความต้านทานต่อให้หัวชนท้ายเรียงเป็นแถวเดียวกันการต่ออย่างนี้เรียกว่า **ต่อเป็นอันดับ** (in series)

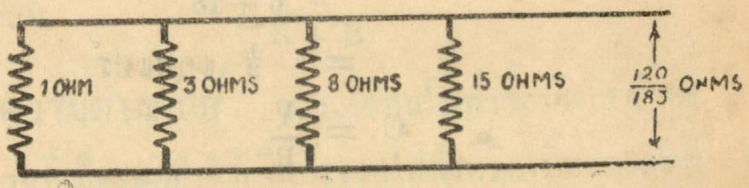


รูป ๕๘

เมื่อต่อเป็นอันดับ ความต้านทานรวมเท่ากับผลบวกของความต้านทานย่อยทั้งหมด.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots\ldots$$

(๒) เอาความต้านทานต่อให้หัวรวมกันและท้ายรวมกัน การต่ออย่างนี้เรียกว่า ต่อเป็นขนาน (in parallel).



รูป ๕๘

เมื่อต่อเป็นขนาน ความต้านทานรวมน้อยกว่าความต้านทานย่อย เพราะเปรียบเหมือนเอาท่อน้ำหลายท่อต่อจากถังใบเดียวกันพร้อมกันย่อมได้กระแสน้ำมากกว่าต่อคราวละท่อ กระแสน้ำรวมกันทั้งหมดเท่ากับผลรวมของกระแสย่อยจากท่อต่าง ๆ.

ถ้า V เป็นศักย์ของหม้อไฟ R_1, R_2, R_3, เป็นความต้านทานต่าง ๆ และเมื่อเอาความต้านทานเหล่านี้มาต่อไฟใช้คราวละหน จะได้กระแส $\frac{V}{R_1}$, $\frac{V}{R_2}$, $\frac{V}{R_3}$ .....

ให้ $\frac{V}{R}$ เป็นกระแสรวมทั้งหมด.

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} + \ldots\ldots\ldots$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$R = 1 \div \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots\ldots\ldots\right)$$

คือ ความต้านทานรวมกลับเศษเป็นส่วนเท่ากับ ความต้านทานย่อยต่าง ๆ กลับเศษเป็นส่วนแล้วบวกกัน.

ตัวอย่าง.— (๑) ลวด ๔ เส้นมีความต้านทาน ๒, ๓, ๕, ๑๒ โอห์ม ถ้าต่อเป็นขนานจะมีความต้านทานรวมกันเท่าไร ?

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{12} = \frac{7}{6}$$

$$R = \frac{6}{7} \text{ โอห์ม.}$$

(๒) ลวด ๒ เส้นมีความต้านทาน ๕, ๒๐ โอห์มต่อเป็นขนานแล้วจากปลายที่รวมกัน เอาลวดมีความต้านทานเส้นละ ๑ โอห์มต่อไปที่ขั้วหม้อไฟฟ้ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๒ วอลต์และความต้านทานตอนใน ๒ โอห์ม ให้หากระแสในเส้นลวดต่าง ๆ.

ลวดที่ต่อเป็นขนานมีความต้านทานรวม $= \frac{5 \times 20}{5 + 20}$

$= 4$ โอห์ม

ฉะนั้นความต้านทานทั้งหมดตลอดวงจร $= 2 + 1 + 4 + 1$

$= 8$ โอห์ม.

กระแสในวงจร $= \frac{2}{8}$

$= \frac{1}{4}$ แอมแปร์.

กระแสในลวด ๕ โอห์ม $= \frac{20}{25} \times \frac{1}{4}$

$= \frac{1}{5}$ แอมแปร์.

กระแสในลวด ๒๐ โอห์ม $= \frac{5}{25} \times \frac{1}{4}$

$= \frac{1}{20}$ แอมแปร์.

๑๖. **แบตเตอรี** เวลาเอาหม้อไฟหลายหม้อมารวมต่อใช้ให้พร้อมกันเรา เรียกว่า **แบตเตอรี** (battery) และมีวิธีต่อใช้ ๒ วิธี.—

(๑) ต่อเป็นอันดับ เอาขั้วลบของหม้อต้นต่อกับขั้วบวกของหม้อที่สอง ขั้วลบของหม้อที่สองต่อกับขั้วบวกของหม้อที่สามแล้วต่อ ๆ กันไปอย่างนี้ ในที่สุดเอาขั้วบวกของหม้อแรกกับขั้วลบของหม้อสุดท้ายมาต่อไฟใช้.

การต่อเป็นอันดับได้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามากขึ้น (เพราะเปรียบเหมือนเอาถังน้ำขนาดซ้อนกันแล้วเปิดก๊อกที่ถังล่างใช้ ได้แรงพุ่งของน้ำแรงมาก) แต่ความต้านทานค่อนในมาก เพราะความต้านทานของหม้อต่างๆ เรียงกันเป็นอันดับด้วย.

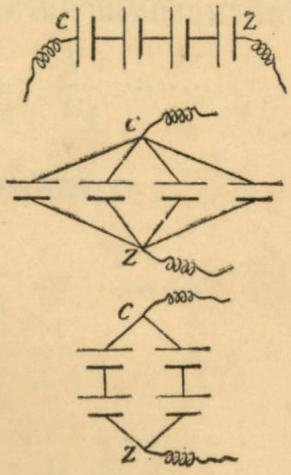
ถ้า n เป็นจำนวนหม้อ.

E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหนึ่งหม้อ.

B เป็นความต้านทานภายในหนึ่งหม้อ.

R เป็นความต้านทานภายนอก.

C เป็นกระแสไฟ.



รูป ๕๗

แรงเคลื่อนไฟฟ้ารวมกันเท่ากับ nE

ความต้านทานรวมของหม้อเท่ากับ nB

ความต้านทานภายนอกคงเดิม R

ความต้านทานตลอดวงจรเท่ากับ $nB+R$

ฉะนั้นกระแสไฟ $C=\frac{nE}{nB+R}$

(๒) **ต่อเป็นขนาน** เอาขั้วบวกของทุกหม้อมารวมกัน เอาขั้วลบของทุกหม้อมารวมกัน แล้วจึงต่อไฟใช้ การต่ออย่างขนานนี้คงได้ อี. เอม. เอฟ. เท่ากับหม้อเดียว แต่ความต้านทานภายในน้อยเข้ามาก เปรียบเหมือนเอาถังน้ำมาเรียงเป็นแถว เปิดก๊อกจากทุกถังแล้วเอารางรองรับน้ำที่ไหลอีกทีหนึ่ง แรงพุ่งของน้ำเท่ากับจากถังใบเดียวแต่ก้อนน้ำที่ไหลมากกว่า.

แรงเคลื่อนไฟฟ้ารวมเท่ากับ E

ความต้านทานรวมของหม้อเท่ากับ $\frac{B}{n}$

ความต้านทานภายนอกคงเดิม R

ความต้านทานตลอดวงจรเท่ากับ $\frac{B}{n}+R$

ฉะนั้นกระแสไฟ $C=\frac{E}{\frac{B}{n}+R}$

ตัวอย่าง.— (๑) หม้อไฟ ๑๒ หม้อต่ออย่างเป็นอันดับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อละ ๑.๕ วอลต์ ความต้านภายในหม้อ ๆ ละ ๒ โอห์ม ถ้าใช้ลวดมีความต้านทาน ๑/๑๐๐ โอห์ม ต่อจะได้กระแสเท่าไร ?

แรงเคลื่อนไฟฟ้ารวม $12 \times 1.5 = 18$ วอลต์

ความต้านทานตลอดวงจร $(2 \times 12) + \frac{1}{100} = 24.01$ โอห์ม

ได้กระแส $\frac{18}{24.01} = 0.75$ แอมแปร์

หมายเหตุ ถ้าใช้ลวดเส้นนั้นต่อจากหม้อเดียวจะได้กระแสดังนี้ :—

$$\frac{1.5}{2.01} = 0.75 \text{ แอมแปร์}$$

(๒) ตามโจทย์ข้างบน ถ้าใช้ลวดมีความต้านทาน ๑๐๐ โอห์มต่อไฟใช้ จะได้กระแสเท่าไร ?

ได้กระแส $\frac{18}{124} = 0.145$ แอมแปร์

หมายเหตุ ถ้าใช้ลวดมีความต้านทานมาก ๆ เช่นต่อจากหม้อเดียวจะได้กระแสน้อยกว่ามาก.

ต่อจากหม้อเดียวได้กระแส $\frac{1.5}{102} = 0.015$ แอมแปร์

(๓) ตามโจทย์ข้างบน ถ้าต่ออย่างเป็นขนาน และใช้ลวดมีความต้านทานน้อยต่อไฟจะได้กระแสมากกว่าต่อจากหม้อเดียว แต่ถ้าใช้ลวดมีความต้านทานมากต่อ จะได้กระแสเท่ากับต่อจากหม้อเดียว.

ก. ต่อเป็นขนานแล้วเอาลวด ๑/๑๐๐ โอห์มต่อ

ได้กระแส $\frac{1.5}{\frac{2}{12} + \frac{1}{100}} = 8.5$ แอมแปร์

ข. เอาลวด ๑/๑๐๐ โอห์มต่อจากหม้อเดียว

ได้กระแส $\frac{1.5}{2 + \frac{1}{100}} = 0.75$ แอมแปร์

ค. ต่อเป็นขนานแล้วเอาลวด ๑๐๐ โอห์มต่อ

ได้กระแส $\frac{1.5}{\frac{2}{12}+100} = 0.015$ แอมแปร์.

ง. เอาลวด ๑๐๐ โอห์มต่อจากหม้อเดียว

ได้กระแส $\frac{1.5}{2+100} = 0.015$ แอมแปร์.

๑๗. การต่อหม้อไฟให้เป็นทั้งอันดับและขนาน เราต่ออย่างเป็นอันดับให้เป็นตับ ๆ เสียก่อน แล้วเอาตับเหล่านี้มาต่ออย่างเป็นขนานอีกที เช่นเรามีหม้อทั้งหมด n หม้อ ต่อให้เป็นอันดับตบะ x หม้อเสียก่อน แล้วเอาตับมาต่ออย่างเป็นขนาน y ตับ ซึ่ง $xy = n$ สมมุติว่าหม้อ ๆ หนึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า E ความต้านทานภายในของหนึ่งหม้อเป็น B และความต้านทานภายนอกเป็น R.

แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดหลอดวงจรเท่ากับแรงเคลื่อนทั้งหมดในตับหนึ่ง ๆ คือเท่ากับ xE.

ความต้านทานภายในตับหนึ่ง ๆ เท่ากับ xB.

เมื่อเอา y ตับมาเรียงเป็นขนาน ความต้านทานภายในทั้งหมดเท่ากับ $\frac{xB}{y}$

ในที่สุดได้กระแส $C = \frac{xE}{\frac{xB}{y}+R} = \frac{E}{\frac{B}{y}+\frac{R}{x}}$

ตัวอย่าง.– หม้อไฟ ๓๐ หม้อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อละ ๑.๕ วอลต์ ความทานภายในหม้อละ ๒ โอห์ม ความต้านทานภายนอก ๒๐ โอห์ม เรามีหลายวิธีต่อต่าง ๆ กัน หลายวิธีดังต่อไปนี้.–

(๑) ต่ออย่างเป็นอันดับหมดทั้ง ๓๐ หม้อ.

$$C = \frac{nE}{nB+R} = \frac{30\times1.5}{60+20} = 6.562 \text{ แอมแปร์.}$$

(๒) ต่ออย่างเบ็นขนานหมดทั้ง ๓๐ หม้อ

$$C = \frac{E}{\frac{B}{n}+R} = \frac{1.5}{\frac{2}{30}+20} = 0.074 \text{ แอมแปร์.}$$

(๓) ต่อเบ็นอันดับดับละ ๒ หม้อ แล้วเรี่ยงเบ็นขนาน ๑๕ ดับ

$$C = \frac{E}{\frac{B}{y}+\frac{R}{x}} = \frac{1.5}{\frac{2}{15}+\frac{20}{2}} = 0.148 \text{ แอมแปร์.}$$

(๔) ต่อเบ็นอันดับดับละ ๓ หม้อ แล้วเรี่ยงเบ็นขนาน ๑๐ ดับ

$$C = \frac{E}{\frac{B}{y}+\frac{R}{x}} = \frac{1.5}{\frac{2}{10}+\frac{20}{3}} = 0.218 \text{ แอมแปร์.}$$

(๕) ต่อเบ็นอันดับดับละ ๕ หม้อ แล้วเรี่ยงเบ็นขนาน ๖ ดับ

$$C = \frac{E}{\frac{B}{y}+\frac{R}{x}} = \frac{1.5}{\frac{2}{6}+\frac{20}{5}} = 0.346 \text{ แอมแปร์.}$$

(๖) ต่อเบ็นอันดับดับละ ๖ หม้อ แล้วเรี่ยงเบ็นขนาน ๕ ดับ

$$C = \frac{E}{\frac{B}{y}+\frac{R}{x}} = \frac{1.5}{\frac{2}{5}+\frac{20}{6}} = 0.401 \text{ แอมแปร์.}$$

(๗) ต่อเบ็นอันดับดับละ ๑๐ หม้อ แล้วเรี่ยงเบ็นขนาน ๓ ดับ

$$C = \frac{E}{\frac{B}{y}+\frac{R}{x}} = \frac{1.5}{\frac{2}{3}+\frac{20}{10}} = 0.562 \text{ แอมแปร์.}$$

(๘) ต่อเบ็นอันดับดับละ ๑๕ หม้อ แล้วเรี่ยงเบ็นขนาน ๒ ดับ

$$C = \frac{E}{\frac{B}{y}+\frac{R}{x}} = \frac{1.5}{\frac{2}{2}+\frac{20}{15}} = 0.642 \text{ แอมแปร์.}$$

หมายเหตุ ๑. เราจะเห็นได้ว่าได้กระแสไฟไม่เหมือนกัน ต่ออย่างเป็นอันดับคับ ละ ๑๕ หม้อ แล้วเรียงเป็นขนาน ๒ คับได้กระแสไฟมากที่สุด

๒. ตามสูตรสำหรับคิดข้างบนใช้คิดกลับไปกลับมาได้หลายอย่าง ในสูตรมีจำนวนเลข ๖ จำนวนคือ C, B, E, R, x, และ y ถ้าโจทย์บอกให้ ๕ จำนวน เราย่อมคำนวณจำนวนที่ ๖ ได้เสมอ.

เช่นทำนองโจทย์ข้างบน ถ้าโจทย์มีหม้อไฟ ๓๐ หม้อ แรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อละ ๑.๕ วอลต์ ความต้านทานภายในหม้อละ ๒ โอห์ม ความต้านทานภายนอก ๒๐ โอห์ม จะมีวิธีต่ออย่างไรจึงจะได้กระแส ๐.๔ แอมแปร์ สมมุติว่าต่อเป็นอันดับคับละ x หม้อ แล้วเอาคับเหล่านี้มาต่อเป็นขนาน y คับ

ในทันที $xy = 30$

และ $$.4 = \frac{1.5}{\frac{20}{x} + \frac{2}{y}}$$

เอาค่าของ y ในสมการอันแรกบรรจุในสมการอันหลัง

เราได้ $$.4 = \frac{1.5}{\frac{20}{x} + \frac{2}{\frac{30}{x}}}$$

$$.8x^2 - 45x + 240 = 0$$

$$x = \frac{45 - 35.4}{1.6} = 6$$

ตอบ ใช้อย่างเป็นอันดับตับละ ๖ หม้อ แล้วเอามาเรียงเป็นขนาน ๕ ตับ.

๓. ตามโจทย์ที่แล้วมา ถ้าอยากจะรู้ว่าจะต้องต่ออย่างไรจึงจะได้กระแสมากที่สุดก็คิดได้ โดยสมมุติอย่างเดียวกันว่าต่ออย่างเป็นอันดับตับละ x หม้อ แล้วเอาตับเหล่านั้นมาเรียงเป็นขนาน y ตับ แล้วเราจะได้กระแสดังนี้

$$C = \frac{E}{\frac{R}{x} + \frac{B}{y}}$$

ถ้าจะให้ C มีค่ามากที่สุด $(\frac{R}{x} + \frac{R}{y})$ ต้องมีค่าน้อยที่สุดจึงจะหาร E ได้ผลลัพธ์มากที่สุด

R กับ B เป็นจำนวนจำกัดตายตัว

x y เท่านับจำนวนหม้อซึ่งเป็นจำนวนจำกัดตายตัวเหมือนกัน แต่ x กับ y โดยลำพังเป็นจำนวนที่เปลี่ยนแปลงได้ เพราะฉะนั้นเราต้องคิดหาค่าของ x และ y ซึ่งจะทำให้ $(\frac{R}{x} + \frac{B}{y})$ มีค่าน้อยที่สุด ตามเลขคณิต เมื่อค่าของตัวเลขที่เป็นจำนวนส่วนของเศษส่วนสองจำนวนเปลี่ยนแปลง แต่ผลคูณของจำนวนเลขคู่นี้เป็นจำนวนจำกัดตัวตาย ผลบวกของเศษส่วนคู่นั้นจะมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเศษส่วนคู่นั้นมีค่าไล่เลี่ยกันหรือมีค่าเท่ากัน.

ในเรื่องนี้ $(\frac{R}{x} + \frac{B}{y})$ จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ $\frac{R}{x}$ มีค่าเท่ากับ $\frac{B}{y}$

เรื่องนี้แสดงให้เห็นได้ดังนี้.—

$$\left(\frac{R}{x}+\frac{B}{y}\right)^2 = \left(\frac{R}{x}-\frac{B}{y}\right)^2+4\frac{R}{x}\cdot\frac{B}{y}$$

$$= \left(\frac{R}{x}-\frac{B}{y}\right)^2+4\frac{RB}{n}$$

จำนวน $4\frac{RB}{n}$ เป็นจำนวนตัวตายไม่เกี่ยวกับค่าของ x และ y และเห็นได้ง่าย ๆ ว่าจำนวนทางขวามือของสมการจะมีค่าน้อยที่สุด เมื่อไม่มีจำนวนอื่นต้องบวกกับ $4\frac{RB}{n}$ อีก

คือ $\left(\frac{R}{x}-\frac{B}{y}\right) = 0$

หรือ $\frac{R}{x} = \frac{B}{y}$

เมื่อเป็นดังนี้ เราลงมือคิดโจทย์ข้างบนได้ทันทีจากสมการต่อไปนี้

คือ $xy=n$ และ $\frac{R}{x} = \frac{B}{y}$

ซึ่งตามโจทย์ข้างบน $xy=30$ และ $\frac{20}{x} = \frac{2}{y}$

เอาค่าของ y ในสมการแรกบรรจุในสมการหลัง.

เราได้ $$\frac{20}{x} = \frac{2}{\frac{30}{x}}$$

$$x^2 = 600$$

$$x = 17 \quad \text{(ประมาณ)}$$

แต่ $xy=30$ และ x, y เป็นจำนวนที่เราหาจำนวนหม้อทั้งหมดลงตัว.

ฉะนั้น x ต้องได้แก่จำนวน ๑๕ (จำนวนใกล้ที่สุดของ ๑๗)

y เท่ากับ 2

ตวย ต้องต่อเป็นอันดับดับละ ๑๕ หม้อ และเอาดับมาเรียงเป็นขนาน ๒ ดับ จึงได้กระแสไฟมากที่สุด.

๑๔. **ชอร์ตเซอร์คูอิต** (short circuit) ตามศัพท์แปลว่าย่นวงจรแต่สำหรับในที่นี้หมายถึงการที่ไฟไหลออกจากหม้อได้มากโดยมีความต้านทานภายนอกไม่พอ ฮื่อเดียวไฟอาจออกแทบเกือบหมดหม้อ.

ฉะนั้นเวลาต่อไฟใช้ เราต้องระวังและให้แน่ใจว่าเราได้เตรียมความต้านทานภายนอกไว้เพียงพอแน่ เพื่อจะได้บังคับกระแสไฟให้ไหลเพียงเท่าที่เราต้องการแท้ๆ เรื่องนี้เราคำนวณรู้ได้จากกฎของโอฮ์ม เช่นหม้อไฟของเรามีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑๒ วอลต์ ถ้าเราจะต่อไฟใช้ให้ได้กระแสไฟ ๖ แอมแปร์ เราต้องใช้ความต้านทาน ๒ โอฮ์ม ถ้าน้อยกว่านี้จะได้กระแสไฟฟ้าเกินต้องการ และถ้ามากกว่านี้จะได้กระแสไฟไม่พอต้องการ.

เมื่อเราคำนวณความต้านทานได้แล้ว เราต้องระวังขนาดของเส้นลวดที่จะใช้ต่อให้เหมาะด้วย ไม่ใช่สักแต่ว่าลวดขนาดไหนก็ได้ ขอแต่ให้มีความต้านทาน ๒ โอฮ์มก็แล้วกัน ลวดต้องมีขนาดโตพอที่จะทนกระแสไฟได้ เส้นลวดเส้นเล็กไป เวลาปล่อยกระแสไฟลวดจะร้อนหรือแม้ถึกเป็นไฟเกิดอันตราย ลวดทนไฟได้ตามขนาดต่างๆกัน เราต้องเปิดบัญชีดูจากตำรา เวลาต่อไฟใช้ ถ้าเส้นลวดที่เดิรสายร้อนเราจัดอยู่ในเซตต์ชอร์ตเซอร์คูอิตแล้ว.

ลวดทองแดงขนาดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยตัด ๑ มิลลิเมตร (เช่นลวดนำเบอร์ ๑๘) ทนไฟได้ ๕ แอมแปร์ ถ้าจะใช้กระแสไฟมากกว่า ๕ แอมแปร์ เราต้องเปิดบัญชีดูและเลือกลวดให้ใหญ่พอ แต่สำหรับต่อไฟทดลองตามธรรมดาในห้องเรียน หรือต่อไฟใช้ดวงเดียวที่บ้านลวดทองแดงนำเบอร์ ๑๘ ดีพอแล้ว.

เครื่องไฟฟ้าต่างๆเช่น พัดลม เครื่องมอเตอร์ ฯลฯ ผู้ทำขายต้องเลือกใช้เส้นลวดในเครื่องเหล่านั้นให้โตพอเหมาะกับกระแสไฟที่จะต้องใช้ เส้นลวดต้องไม่เล็ก

เกินไป จนถึงกับร้อนและเส้นลวดต้องมีส่วนยาวพอเพื่อมีความต้านทานเท่าที่ต้องการ เช่นเครื่องมอเตอร์สำหรับใช้สตาร์ตรถยนตร์ต้องใช้กระแสไฟ ๕ แอมแปร์ ลวดที่ใช้พันอยู่ข้างในนั้นอย่างน้อยต้องเป็นลวดนำเบอร์ ๑๘ และถ้าใช้เครื่องมอเตอร์นั้นกับหม้อไฟ ๑๒ วอลต์ เส้นลวดข้างในเครื่องต้องยาวพอให้มีความต้านทาน ๒$\frac{๒}{๕}$ โอห์ม (ซึ่งเราคำนวณรู้ได้จากกฎของโอห์ม) ส่วนความยาวของเส้นลวดก็ต้องคำนวณให้ยาวพอเหมาะมีความต้านทาน ๒$\frac{๒}{๕}$ โอห์ม ลวดจะต้องยาวเท่าไร เราก็คำนวณรู้ได้จากสูตร $R = k \frac{l}{a}$ ซึ่งในที่นี้ความต้านทานที่ต้องการเท่ากับ ๒$\frac{๒}{๕}$ โอห์มหรือ ๒,๔๐๐,๐๐๐ ไมโครโอห์ม ความต้านทานจำเพาะของทองแดงเท่ากับ ๑.๗ ไมโครโอห์ม พื้นที่รอยตัดของลวดนำเบอร์ ๑๘ ประมาณ ๑ ตารางมิลลิเมตร ส่วนยาวเป็นเซ็นติเมตรของเส้นลวดเป็นสิ่งที่ต้องการคำนวณจากสูตร $R = k \frac{l}{a}$

$$2400000 = 1.7 \times \frac{l}{.01}$$

$$l = 14117 \text{ ซม.}$$

$$= 141 .17 \text{ เมตร}$$

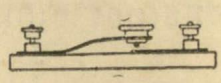
ถ้าใช้เส้นลวดสั้นกว่านี้จะเกิดชอร์ตเซอร์คูอิต ถ้ายาวกว่านี้จะได้กระแสไฟไม่ถึง ๕ แอมแปร์ กระแสไฟไม่พอหมุนเครื่องมอเตอร์ได้เต็มที่สำหรับที่จะสตาร์ตรถยนตร์ได้.

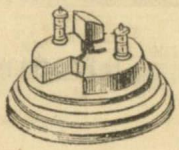
หลอดไฟก็เช่นเดียวกัน กินไฟต่าง ๆ กันและมีความต้านทานต่าง ๆ กันสุดแต่จะเอาไปใช้ที่ไหน หลอดไฟรถยนตร์สำหรับใช้กับหม้อไฟ ๖ วอลต์ และกินไฟ ๑ แอมแปร์ก็มีความต้านทาน ๖ โอห์ม และถ้าเอามาต่อใช้กับไฟตามบ้าน (๑๐๐ วอลต์) จะได้กระแสตั้ง ๑๖.๗ แอมแปร์ซึ่งมากกว่าที่ต้องการมาก ถ้าขืนต่อใช้ไส้จะขาดทันที ส่วนหลอดไฟที่ใช้ตามบ้านสำหรับ ๑๐๐ วอลต์ ถ้าจะให้กินไฟ ๓ แอมแปร์ก็ต้องมีความต้านทาน ๑๐๐ โอห์ม และถ้าจะเอาไปต่อกับหม้อไฟรถยนตร์

๖ วอลต์ จะได้กระแสเพียง ๐.๐๖ แอมแปร์ซึ่งไม่พอเผาไส้ให้ร้อน จึงจุดไฟไม่ติด.

๑๙. **ฟิวส** (fuse) เป็นสะพานอยู่ในวงจรและทำหน้าที่เหมือนด่านคอยกันไม่ให้กระแสไฟไหลมากกว่าที่ได้กำหนดไว้ ฟิวส์มักทำด้วยลวดที่หลอมละลายได้เร็ว เช่นตะกั่วหรือดีกว่านั้นทำด้วยโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับดีบุกซึ่งหลอมละลายได้เร็วกว่าตะกั่วล้วน ๆ เมื่อกระแสไฟในวงจรมีมากกว่าที่กำหนดไว้ จะเป็นโดยแอคซิเดนต์หรือพลั้งเผลอเช่นชอร์ตเซอร์คูอิตก็ตาม ฟิวส์จะร้อน ตะกั่วละลายขาด เกิดเป็นวงจรเปิดและไฟหยุดเดินทันที ไม่มีอันตรายต่อไป ถ้าไม่มีฟิวส์ ลวดจะร้อนตลอดทั่ววงจร และถ้าเป็นลวดตามบ้านอาจร้อนจัดจนเกิดไฟไหม้บ้านได้ ฟิวส์มักวางไว้เป็นระยะตอนแยกวงจร และใช้เต้าเข้าๆเป็นลำดับ เพื่อเมื่อเกิดแอกคซิเดนต์ไฟจะได้ขาดแต่เป็นตอน ๆ ไม่เดือดร้อนถึงวงจรอื่น ๆ ทั่วกันหมด.

๒๐. **สวิตช์** (switch) เป็นเครื่องประกอบสำหรับใช้ทำให้วงจรปิดหรือเปิดได้สะดวกคล่องแคล่ว ไม่ต้องเสียเวลาคอยปลดลวดที่ต่อใช้ มีแบบนิยมต่างๆ มากมายหลายชะนิด.

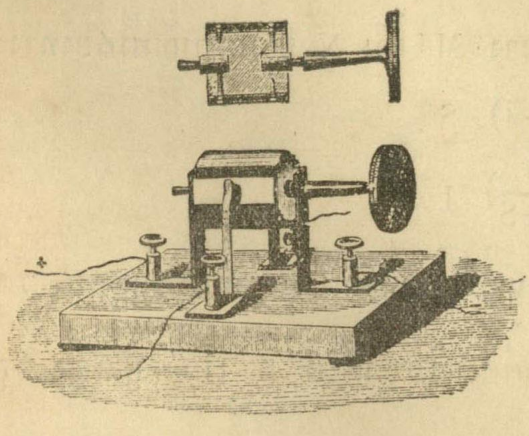




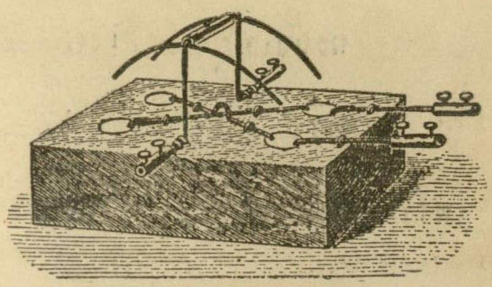
รูป ๖๐

๒๐. **คอมมิวเตเตอร์** (Commutator) เป็นสวิตช์พิเศษที่ใช้สำหรับปิดเปิดวงจรและเปลี่ยนทางเดินของกระแสไฟในวงจรได้ด้วย มีใช้แบบต่าง ๆ กันหลายชะนิด เช่นใช้แท่งโลหะบ๊ากบนแผ่นฉนวนสี่แท่งหรือทำเป็นหลุมปรอทสี่หลุม กขคง เรียงกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และให้แท่งโลหะหรือหลุมปรอทห่างจากกันเป็นระยะพอควร (๒—๔ นิ้ว) เอาลวดโยงจากหลุมปรอทคู่หนึ่งไปที่หม้อไฟ เช่น

โยง ก ไปต่อกับขั้วบวกของหม้อ โยง ข ไปต่อกับขั้วลบ โยง ค ง ไปที่เครื่องมือที่ต้องการใช้ไฟ ขณะนี้ไฟยังไม่เดิร เพราะยังเป็นวงปิดที่ระหว่าง ก ข กับ ค ง หาลวดอีก ๒ เส้นสำหรับต่อระหว่างหลุมปรอทให้ไฟเดิรได้ ถ้าโยง ก ค ให้ถึงกัน ข ง ให้ถึงกัน กระแสไฟจะเข้าที่ ค และไหลกลับออกมาที่ ง แต่ถ้าโยง ก ง ให้ถึงกัน ก ค ให้ถึงกัน กระแสไฟจะเข้าที่ ง และไหลกลับออกมาที่ ค.



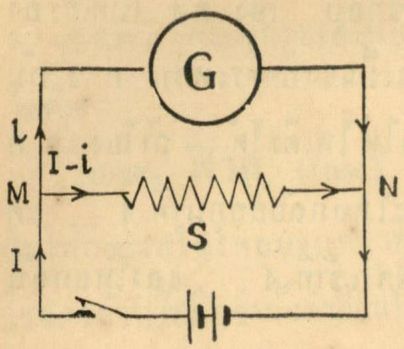
รูป ๖๑



รูป ๖๒

คอมมิวเตเตอร์แบบอื่นที่นิยมกันมากคือแบบรุฮ์มกอร์ฟพ์รูป ๖๑ และแบบโปฮ์ดรูป ๖๒ นักเรียนคงเข้าใจหลักของสองแบบนี้จากรูป.

๒๒. สวิตช์แบ่งไฟ (Shunt) เครื่องมือนี้แบ่งตอนหนึ่งของวงจรให้แยกเป็นสองทางขนานกัน ทางหนึ่งให้มีความต้านทานน้อยกว่า เพื่อกระแสไฟจะได้บ่าหนีไปเสียบ้าง คงเหลือกระแสไฟในอีกทางหนึ่งแต่เพียงเท่าที่ต้องการใช้เท่านั้น เช่นในวงจรมีกระแสไฟ ๑๐ แอมแปร์ แต่เราต้องการใช้แต่เพียงแอมแปร์เดียวเท่านั้น เราตัดวงจรออก และตรงที่ตัดนั้นเอาลวดสองเส้นซึ่งมีความต้านทาน ๑ โอฮ์มเส้นหนึ่ง กับ ๙ โอฮ์มเส้นหนึ่งต่อเป็นขนาน กระแสไฟในเส้น ๙ โอฮ์มจะเป็น ๑ แอมแปร์และในเส้น ๑ โอฮ์มจะเป็น ๙ แอมแปร์.



รูป ๓๖

ตามรูป G เป็นความต้านทานของเครื่องไฟฟ้าที่เราต้องการปล่อยไฟ S เป็นความต้านทานของสวิตช์แบ่งไฟ I เป็นกระแสไฟก่อนถึงทางแยก i เป็นกระแสไฟที่ผ่านเครื่องไฟฟ้า $I-i$ เป็นกระแสไฟผ่านสวิตช์แบ่งไฟ.

ความต่างศักย์ (P.D.) ระหว่าง M กับ N ย่อมเท่ากันทั้งสองทาง.

ฉะนั้น $$i\,G = (I-i)\,S$$

หรือ $$i = \left(\frac{S}{G+S}\right) I$$

เพราะฉะนั้นถ้าเราต้องการให้กระแสไฟผ่านเครื่องไฟฟ้าเป็นเศษหนึ่งส่วนสบ, ร้อย, พัน ฯลฯ ของกระแสทั้งหมด เราต้องเลือกจัดให้ S เป็น $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ ของ G.

ถ้า $\frac{1}{n}$ เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟที่ผ่านเครื่องไฟฟ้ากับกระแสไฟที่ออกจากหม้อก่อนมาแยกทางที่สวิตช์แบ่งไฟ.

$$\frac{1}{n} = \frac{i}{I} = \frac{S}{G+S}$$

หรือ $$S = \frac{1}{n-1}\,.G$$

เช่นเครื่องไฟฟ้ามีความต้านทาน ๑๐๐ โอห์ม จะต้องการสวิตช์แบ่งไฟมีความต้านทานเท่าใดจึงจะบังคับให้กระแสไฟผ่านเครื่องไฟฟ้าแต่เพียง $\frac{๑}{๒๐}$ ของกระแสไฟทั้งหมด และจะต้องเติมความต้านทานสำหรับต่อเป็นอันดับอีกเท่าใดจึงจะได้กระแสเท่าเดิม เพราะเมื่อต่อสวิตช์แบ่งไฟเข้าด้วยแล้ว ย่อมทำให้ความต้านทานร่วมน้อยลงไป.

ใช้สูตร $S = \frac{1}{n-1} .G$

และในที่นี้ $n = \frac{1}{20}$

$$S = \frac{1}{19} \times 100$$

$$= 5.263 \text{ โอห์ม.}$$

ความต้านทานร่วมระหว่างเครื่องไฟฟ้ากับสวิตช์แบ่งไฟ

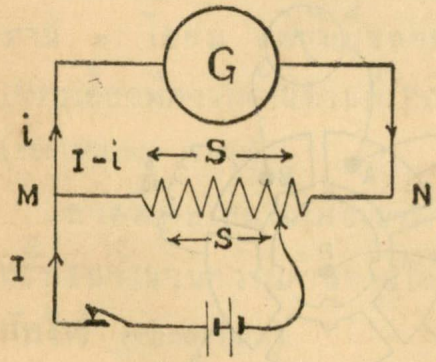
$$= \frac{G S}{G+S}$$

$$= \frac{100 \times 5.263}{100+5.263}$$

$$= 5 \text{ โอห์ม}$$

ฉะนั้นต้องเติมความต้านทานใหม่อีก $= 100 - 5 = 95$ โอห์ม.

สวิตช์แบ่งไฟดังที่กล่าวมานี้เป็นสวิตช์แบ่งไฟสามัญ (common shunt) และใช้ได้ฉะเพาะแต่กับเครื่องไฟฟ้าเครื่องเดียวที่เรากำลังใช้อยู่เท่านั้น ถ้าจะเอาไปใช้กับเครื่องใหม่อีกเครื่องหนึ่ง เราต้องเปลี่ยนค่าของ S ใหม่ แต่มีสวิตช์แบ่งไฟอีกอย่างหนึ่ง เราเรียกว่าสวิตช์แบ่งไฟทั่วไป (universal shunt) คือจะใช้กับเครื่องไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งได้ทันที.



รูป ๖๔

สำหรับสวิตช์แบ่งไฟทั่วไป แทนที่จะเอาปลายลวดจากหม้อไฟฟ้าต่อที่ N ตายตัว เราจัดให้ปลายลวดนั้นร่นไปมาได้และเลือกต่อที่ตรงส่วนต่างๆ ของ S ดังรูป.

สมมุติว่า G เป็นความต้านทานของเครื่องไฟฟ้า และ S เป็นความต้านทานของสวิตช์แบ่งไฟตามเดิม

สมมุติว่า s เป็นความต้านทานของส่วนหนึ่งของสวิตช์แบ่งไฟและเป็นส่วนที่ต่อเป็นขนานกับเครื่องไฟฟ้า (S–s) เป็นความต้านทานของอีกส่วนหนึ่งของสวิตช์แบ่งไฟและเป็นส่วนที่ต่อเป็นอันดับกับเครื่องไฟฟ้า I เป็นกระแสไฟออกจากหม้อ i เป็นกระแสไฟที่ผ่าน G และ (S–s) (I–i) เป็นกระแสไฟที่ผ่าน s.

ความต่างศักย์ในทางแยกทั้งสองสายย่อมเท่ากัน.

ฉะนั้น $$(I-i)\,s = i\,(G+S-s)$$

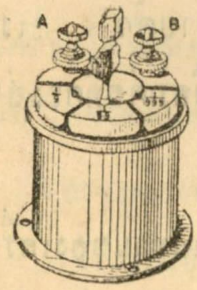
$$i = \left(\frac{s}{G+S}\right) I$$

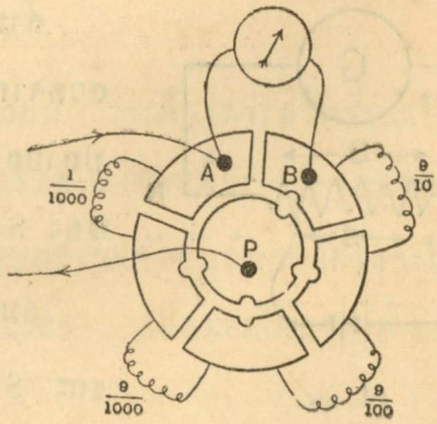
$$\frac{i}{I} = \frac{s}{G+S}$$

(G+S) เป็นจำนวนคงที่ตายตัวอยู่เสมอ ฉะนั้นจะแบ่งให้ไฟผ่านเครื่องไฟฟ้าเป็นเศษส่วนเท่าใดของกระแสทั้งหมดได้ โดยเลือกเปลี่ยนค่าของ $\frac{s}{G+S}$ เอาตามชอบใจ ซึ่งสะดวกดีกว่าสวิตช์แบ่งไฟสามัญมาก และคิดเปลี่ยนแต่ s จำนวนเดียวไม่ยุ่งยากต่อการคำนวณ.

สำหรับสวิตช์แบ่งไฟสามัญมีสูตร $\frac{i}{I} = \frac{S}{S+G}$ เวลาจะเปลี่ยนค่าของตัวเศษ S แล้วค่าของส่วนก็เปลี่ยนด้วย ยากที่จะคิดให้เหมาะส่วน เช่นต้องการให้ $\frac{i}{I} = \frac{๑}{๑๐}$ คำนวณค่าของ S ได้ยากกว่าสวิตช์แบ่งไฟทั่วไป.

รูปร่างของสวิตช์แบ่งไฟทั่วไปเป็นดังนี้.—

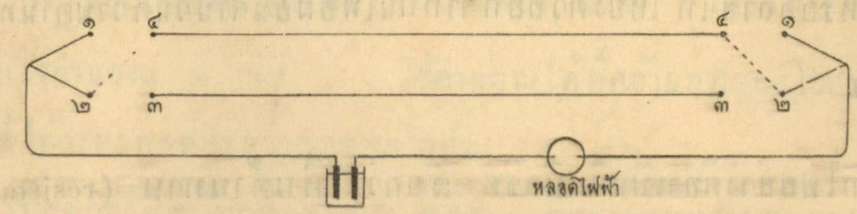




รูป ๖๕

๒๓. **สวิตช์ห้องบันได** (stair-case switch) บางคราวสำหรับไฟดวงเดียวกันเราต้องการใส่สวิตช์สองอัน เพื่อบิดเปิดไฟที่อันใดอันหนึ่งก็ได้ หรือเปิดไฟที่อันหนึ่งแล้วบิดที่อีกอันหนึ่งก็ได้ เช่นในห้องบันได ขาขึ้นเราเปิดไฟที่ตีนบันได แล้วบิดไฟที่ข้างบนก็ได้ หรือบิดที่ตีนบันไดนั่นเองก็ได้ สวิตช์เช่นนี้มีขายที่โรงไฟฟ้ามีสี่หลัก ๑, ๒, ๓, ๔, และมีที่หมุนได้รอบตัว ขณะที่หมุนมีแท่งตัวนำคอยต่อ ๑, ๓ กับ ๒, ๔ สลับกันไปเวลาต่อไฟเราต่อจากขั้วหนึ่งของหม้อมาที่ขั้วหนึ่งของดวงไฟ จากอีกขั้วหนึ่งของดวงไฟต่อมาที่หลัก ๑, ๒ ของสวิตช์อันหนึ่ง จากอีกขั้วหนึ่งของหม้อต่อไปที่หลัก ๑, ๒ ของสวิตช์อีกอันหนึ่ง เดินลวดอีกสองเส้นต่างหาก เส้นหนึ่งโยงจากหลัก ๓ ของสวิตช์อันที่หนึ่งถึงหลัก ๓ ของสวิตช์อันที่สอง อีกเส้นหนึ่งโยง จากหลัก ๔ ของสวิตช์อันที่หนึ่งถึงหลัก ๔ ของสวิตช์อันที่สอง.

จากรูปจะเข้าใจได้ง่าย ว่าจะเปิดไฟบิดไฟที่สวิตช์อันเดียวกันก็ได้ หรือจะเปิดไฟที่สวิตช์อันหนึ่งแล้วบิดไฟที่สวิตช์อีกอันหนึ่งก็ได้.

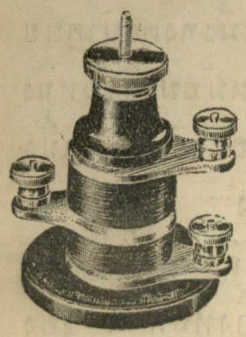


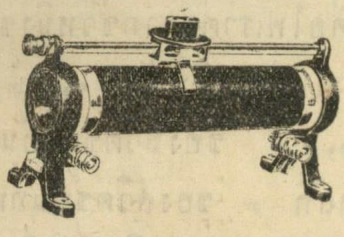
รูป ๖๖

๒๔. **ความต้านทาน** ตามธรรมดาเส้นลวดที่ทำด้วยโลหะต่างๆ มักมีความต้านทานน้อย เส้นลวดตามธรรมดามักต้องยาวตั้งหลายสิบเมตรจึงจะมีความต้านทาน ๑ โอห์ม แต่ถ้าเป็นลวดโลหะผะสมมักมีความต้านทานมาก ชะนิดพิเศษยาวเมตรเดียวมีความต้านทานตั้งหลายๆ โอห์ม ลวดพิเศษเหล่านเรียกว่า **ลวดต้านทาน** (resistance wire).

ลวดพิเศษเหล่านี้เมื่อเอามาจัดหรือเรียงให้เป็นระเบียบ เพื่อให้เลือกเปลี่ยนหรือร่นจำนวนความต้านทานได้สะดวกและเร็วตามต้องการ เราเรียกว่า **เครื่องกักไฟ** (rheostats).

อย่างง่าย ๆ เราเอาเส้นลวดทบสองและขึงอยู่บนแผ่นฉนวนให้เส้นลวดขนานกัน แล้วใช้แผ่นตัวนำประกบขนาบขวางเส้นลวดสำหรับรูดไปมา เมื่อรูดให้ไกลปลายลวดก็มีความต้านทานมาก ถ้าใกล้ก็น้อย.





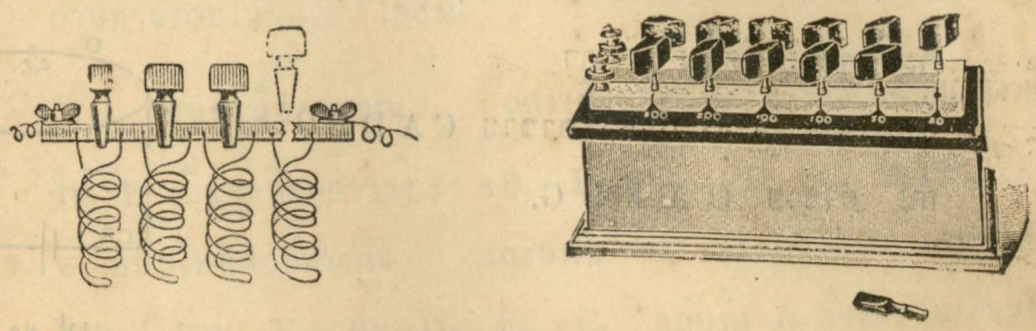
รูป ๖๗

บางชนิดก็ใช้ลวดพิเศษพันเป็นเกลียวถี่รอบกระบอกซึ่งทำด้วยฉนวน แล้วใช้คอนแตคต์เลื่อนไปมาบนเกลียวเพื่อให้ช่วงที่ไฟต้องผ่านเส้นลวดสั้นหรือยาวตามต้องการ.

เครื่องกักไฟแบบวาร์เลย์ใช้แผ่นถ่านวางซ้อนทับกันและมีสครูสำหรับบีบแผ่นถ่านให้อัดชิดกันหรือคลายให้โหย่งตัวออกจากกันเพื่อผ่อนจำนวนความต้านทานให้มากน้อยได้ในตัว.

เครื่องกักไฟอย่างดีทำเป็นหีบมีขีด เรียกว่า หีบต้านทาน (resistance box) บนหลังหีบมีแผ่นทองเหลืองหนา ๆ วางห่างกันเป็นระยะบนแผ่นฉนวน และมีหมุดทองเหลืองสำหรับอุดช่องว่างระหว่างแผ่นทองเหลืองเพื่อให้ไฟเดินถึงกันได้ ข้างในหีบระหว่างแผ่นทองเหลืองมีลวดต้านทานที่รู้จำนวนความต้านทานแน่นอน บัดกรีเชื่อมแผ่นทองเหลืองให้ไฟเดินผ่านเส้นลวดถึงกันได้ช่องละเส้น เวลาถอนหมุดออกจากช่อง ไฟต้องแล่นผ่านเส้นลวดต้านทาน เวลาเอาหมุดจุกช่อง ไฟไม่ต้องผ่านเส้นลวดและผ่านแท่งทองเหลืองได้โดยง่ายดาย เปรียบเหมือนว่าไม่ต้องผ่านความต้านทานเลยเลย (แผ่นทองเหลืองเราเลือกให้มีขนาดโตพอจนละทิ้งความต้านทานได้) ช่องระหว่างแผ่นทองเหลืองมีเส้นลวดซึ่งมีความต้านทานต่าง ๆ กัน เช่น ๑, ๒, ๒,

๕, ๑๐, ๒๐, ๒๐, ๕๐, ๑๐๐, ๒๐๐, ๒๐๐, ๕๐๐, โอห์ม ถ้าเราต้องการให้ไฟผ่านความต้านทานกี่มากน้อย เราก็ถอนหมุดออกจากช่องให้ได้ครบจำนวนที่เราต้องการ เช่นถ้าเราต้องการให้ไฟผ่านความต้านทาน ๖๓๗ โอห์ม ก็ถอนหมุดที่ช่อง ๕๐๐, ๑๐๐, ๒๐, ๑๐, ๕, ๒, โอห์ม

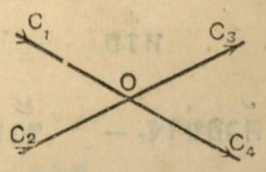


รูป ๖๘

๒๕. กฎของเกียร์คโฮฟฟ์ (Kirchhoff's laws) เกียร์คโฮฟฟ์ให้กฎเป็นสูตรสำหรับใช้คำนวณ ๒ ข้อ ใช้คำนวณได้ดีคล้ายกฎของโอห์มและสำหรับบางเรื่องใช้ได้สะดวกคล่องกว่ากฎของโอห์ม.

(๑) เมื่อลวดไฟฟ้าไขว้กันกี่จุด ๆ หนึ่ง ที่ตรงจุดนั้นจำนวนผลบวกพีชคณิตของกระแสไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับศูนย์ คือหมายความว่าไม่มีไฟคั่งเหลืออยู่ที่จุดนั้น กระแสไฟรวมกันมาเท่าใดก็คงไหลต่อไปได้หมด ไม่มีเหลือ ผลบวกของกระแสไฟที่วิ่งเข้ามาหาจุดที่ลวดไขว้กันนั้นเท่ากับผลบวกของกระแสไฟที่วิ่งออกจากจุดนั้น.

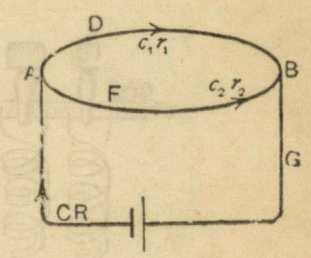
$$c_1 + c_2 = c_3 + c_4$$



รูป ๖๙

(๒) เมื่อลวดไฟฟ้าไขว้กันเป็นตาข่าย ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามเส้นลวดรอบตาข่ายนั้นเท่ากับผลรวมของผลคูณระหว่างความต้านทานและกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดต่าง ๆ ที่เรียงเป็นขอบตาข่าย.

เช่นมีลวด ๔ เส้น CA, ADB, AFB, BG ต่อจากหม้อไฟฟ้าดังรูป จะมีตาข่ายเกิดขึ้น ๓ ตา คือตาข่าย A D B F, ตาข่าย C A D B G กับ ตาข่าย C A F B G.



รูป ๗๑

สมมุติว่า A C G B มีความต้านทาน R และมีกระแส C
A D B „ „ r_1 „ „ c_1
A F B „ „ r_2 „ „ c_2
E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อไฟ

ที่จุด A และ B ตามกฎข้อ ๑ $C = c_1 + c_2$ (๑)

ในตาข่าย C A F B G ตามกฎข้อ ๒ $E = C R + c_2 r_2$ (๒)

ในตาข่าย C A D B G ตามกฎข้อ ๒ $E = C R + c_1 r_1$ (๓)

จากสมการ (๒) และ (๓) $c_1 r_1 = c_2 r_2$

$$c_2 = \frac{c_1 r_1}{r_2}$$

ฉะนั้นจากสมการ (๑) $$C = c_1 + \frac{c_1 r_1}{r_2}$$

หรือ $$c_1 = C \times \frac{r_2}{r_2 + r_2}$$

ตัวอย่าง.— ขั้วบวก A ของหม้อโกรฟต่อถึงขั้วบวก B ของหม้อแดเนียลด์ด้วยลวดมีความต้านทาน ๐.๓ โอห์ม ขั้วลบ C ของหม้อโกรฟ

ต่อถึงขั้วลบ D ของหม้อแดเนี่ยลด์ด้วยลวดมีความต้านทาน ๐.๕ โอห์ม ให้หาความต่างศักย์ระหว่างจุดศูนย์กลางของ A B กับจุดศูนย์กลางของ C D หม้อโกรฟมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑.๘ วอลต์ ความต้านทานภายใน ๐.๒ โอห์ม หม้อแดเนี่ยลด์มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑.๑ วอลต์ ความต้านทานภายใน ๐.๔ โอห์ม.

ก่อนลงมือคำนวณ ลองเขียนรูปแสดงการต่อไฟตามโจทย์และให้ E เป็นจุดกึ่งกลางของ AB, F ของ CD ในเรื่องนี้ไฟจาก ๒ หม้อไหลสวนทางกัน และหม้อ AC แรงกว่า ฉะนั้นไฟไหลจาก A ผ่าน E, B, D, F, C, กลับถึง A ด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑.๘ − ๑.๑ = ๐.๗ วอลต์.

วงจรทั้งหมดมีความต้านทาน .๒ + .๓ + .๕ + .๔ = ๑.๔ โอห์ม

ฉะนั้นกระแสไฟที่ไหล $= \frac{.๗}{๑.๔} = .๕$ แอมแปร์

เมื่อต้องการคำนวณความต่างศักย์ระหว่าง E กับ F จะคำนวณตามทิศของกระแสหรือสวนทิศกับกระแสก็ได้.

ก. คิดจาก E ถึง F ตามกระแส.

P.D. จาก E ถึง B = .๑๕ × .๕ วอลต์

,, ,, B ,, D = .๔ × .๕ ,,

,, ,, D ,, F = .๒๕ × .๕ ,,

รวม P.D. ตอนนี้ = .๘ × .๕ ,,

= .๔ ,,

แต่จาก D ถึง B มีแรงไฟของหม้อต้านอยู่ ๑.๑ วอลต์

ฉะนั้น P.D. จาก E ถึง F = .๔ + ๑.๑ วอลต์

= ๑.๕ ,,

ข. คิดจาก E ถึง F ทวนกระแส

P.D. จาก E ถึง A = −(.๑๕×.๕) วอลต์

,, ,, A ,, C = − (.๒×.๕) ,,

,, ,, C ,, F = −(.๒๕×.๕) ,,

รวม P.D. ตอนนี้ = − (.๖×.๕) ,,

= − .๓ ,,

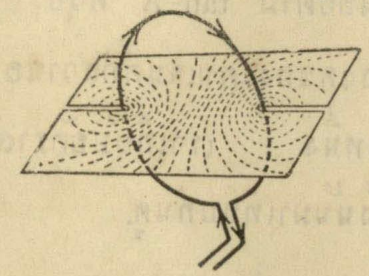
แต่จาก C ถึง A มีแรงไฟของหม้อช่วยอยู่ด้วย ๑.๘ วอลต์

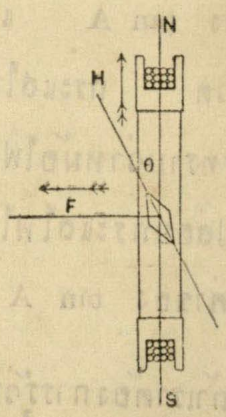
ฉะนั้น P.D. ระหว่าง E กับ F = ๑.๕ วอลต์

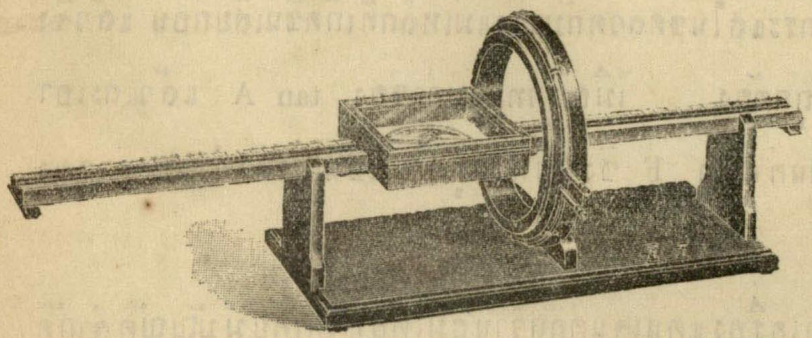
๒๖. กัลวานอสโคป เวลามีกระแสไฟฟ้าเดิรในเส้นลวดย่อมเกิดอำนาจแม่เหล็กพุ่งออกจากเส้นลวดนั้นรอบ ๆ เส้น และเมื่อเอาลวดไฟฟ้าวางทาบบนเข็มทิศที่วางนิ่งอยู่ในแนวเมริเดียนแม่เหล็ก เข็มทิศจะเบนจากเมริเดียน และเบนเป็นมุมโตหรือเล็กตามขนาดของกระแสไฟในเส้นลวด โดยเหตุนี้เราจึงใช้สังเกตการเบนของเข็มทิศสำหรับบอกให้รู้ว่ามีกระแสไฟในเส้นลวดหรือไม่ และมีมากหรือน้อยได้ เครื่องมือที่ใช้ทดลองเพื่อให้รู้ว่ามีกระแสไฟไหลหรือไม่ และกระแสมากหรือน้อยนั้นได้ชื่อว่าเครื่องตรวจกระแสไฟฟ้าหรือกัลวานอสโคป ถ้าเครื่องมือนั้นมีมาตราส่วนสำหรับวัดจำนวนไฟได้ด้วย เราเรียกเครื่องมือนั้นว่า **กัลวานอมิเตอร์** (galvanometer).

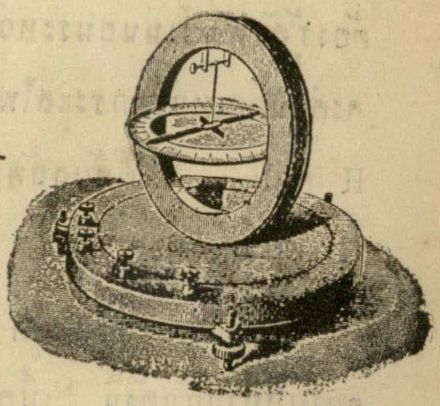
๒๗. แตนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ เป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดกระแสไฟในเส้นลวดจากการสังเกตมุมที่อำนาจไฟฟ้าในเส้นลวดทำให้ปลายแม่เหล็กเบนบ่ายไปจากที่เดิม เครื่องมือที่ประกอบด้วยเข็มทิศที่หมุนได้คล่องรอบตัวตามแนวนอนกับขดลวดขดเป็นวงกลม (กี่รอบก็ได้) ขดลวดวางตามแนวตั้งให้อยู่ในแนวเมริเดียนแม่เหล็กของโลก เข็มทิศนอนอยู่ตามแนวนอนให้จุดที่เข็มทิศหมุนรอบตัวเป็นจุด

ศูนย์กลางของวงขดลวด เวลาทดลองเอาปลายขดลวดต่อกับขั้วหม้อไฟและเมื่อมีกระแสไฟในเส้นลวด อำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดจะบังคับให้เข็มทิศเบนไปจากที่เดิม แล้วไปหยุดอยู่นิ่งตลอดเวลาที่กระแสไฟยังคงเดิรอยู่ในเส้นลวด เวลาที่เข็มทิศเบนไปจากที่เดิมแล้วไปหยุดนิ่งอยู่นั้นแปลว่าอำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดกับอำนาจแม่เหล็กของโลกได้สมดุลกัน คือต่างก็ทำให้แท่งเข็มทิศเกิดโมเมนต์หรือแรงหมุนเท่ากัน (ระวังต้องครองให้เข้าใจว่าเมื่อเข็มทิศหยุดนิ่งไม่ได้แปลว่าอำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเท่ากับอำนาจแม่เหล็กของโลก).









รูป ๗๒

สมมุติว่าเมื่อต่อไฟในขดลวดแล้วเข็มทิศเบนไปจากที่เดิมเป็นมุม A เข็มทิศมีแรงที่ปลายขั้ว m เข็มทิศยาว $2l$ อำนาจแม่เหล็กของโลกส่งแรงมาถึงเข็มทิศ H อำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดส่งแรงมาถึงเข็มทิศ F.

คิดจากสมดุลของโมเมนต์ที่ทำให้เข็มทิศเบน เราได้ตัวเลขดังนี้ :

โมเมนต์ที่ได้จากแรง $F = mFl \cos A$

,, ,, $H = mHl \sin A$

โมเมนต์สองจำนวนนี้เท่ากันคือ $mFl \cos A = mHl \sin A$

$$F = H \tan A$$

ฉะนั้น แรงแม่เหล็กที่อำนาจแม่เหล็กจากขดลวดส่งมาถึงจะมากหรือน้อยย่อมสุดแต่ค่าของ tan A และเมื่ออำนาจแม่เหล็กจากขดลวดย่อมมากน้อยตามกระแสไฟในขดลวด กระแสไฟในขดลวดก็ย่อมมากน้อยตาม tan A ด้วย ดังนี้ถ้าเราต้องการทราบว่าหม้อไฟ ๒ หม้อเมื่อต่อกับขดลวดของแดนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ หม้อหนึ่งจะปล่อยกระแสไฟได้เป็นกี่เท่าของอีกหม้อหนึ่ง เราเทียบอัตราส่วนได้ง่าย ๆ โดยเอาค่าของ tan A ที่สังเกตได้ทั้งสองครั้งนั้นมาเทียบกันดู.

แต่ถ้าเราต้องการรู้ว่าหม้อทั้งสองปล่อยไฟหม้อละกี่หน่วย เรายังคิดไม่ได้เราต้องรู้สัมพันธ์แน่นอนระหว่างกระแสในขดลวดกับแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเสียก่อน แล้วจึงจะคำนวณหน่วยกระแสไฟได้ถูกต้อง เมื่อเราทราบค่าของ tan A แล้วและเอา H คูณ เราได้ผลลัพธ์เป็นค่าของ F ซึ่งบอกให้รู้เพียงเป็นเกาส์สำนองค่าของ H เท่านั้น.

หน่วยกระแสไฟที่วัดจากเครื่องแดนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ได้เคยมีบัญญัติจำกัดความหมายกันดังนี้ 'เมื่อเอาเส้นลวดยาว ๑ ซม. มาขดให้เป็นส่วนโค้งของวงกลมมีรัศมี ๑ ซม. แล้วปล่อยกระแสไฟให้ไหลตามเส้นลวดจนพอดีอำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางของวงกลมได้แรง ๑ ดายน์ กระแสไฟที่ไหลในเส้นลวดขณะนั้นได้ชื่อว่าเป็นจำนวน ๑ หน่วยอีเลคโตรแมกเนติค (E.M.U.)' ถ้าเรา

ลองกระแสไฟกับขดลวด 'ครู' เช่นนี้เสมอ จำนวนแรงแม่เหล็ก กับจำนวนกระแสไฟจะเป็นตัวเลขจำนวนเดียวกันเสมอ.

ถ้า F เป็น ๑ ดายน์ i ก็เป็น ๑ อี. เอม. ยู.

คือ $F = ๑ \; ; \; i = ๑$

หรือ $F = i$

แต่ขดลวด 'ครู' ดังที่พูดมานี้ไม่สะดวกต่อการใช้ทดลองจริง ๆ มีขนาดเล็กเกินไปสำหรับที่จะหยิบยกเอามาใช้ทดลอง เราจึงนิยมทำขดลวดให้ใหญ่โตกว่านี้ตามความสะดวกของเรา และเมื่อทดลองได้ผลลัพธ์แล้ว เราต้องเทียบแก้ผลลัพธ์ให้ตรงและถูกกับผลลัพธ์ของขดลวด 'ครู' และจำนวนที่เอามาใช้เทียบแก้ผลลัพธ์ก็คือส่วนยาวของขดลวดที่เราใช้ทดลองกับส่วนยาวของรัศมีของขดลวดที่เราโค้งเป็นวงกลม.

สำหรับขดที่มีรัศมีเท่ากัน เช่นมีรัศมี ๑ ซม. เมื่อปล่อยกระแสไฟเท่ากัน ขดไหนมีเส้นลวดยาวกว่าจะได้แรงแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของขดลวดมากกว่า เพราะมีจำนวนขดมากรอบกว่า ถ้าจำนวนขดลวดเป็น n เท่าของกัน แรงแม่เหล็กก็เป็น n เท่า.

ถ้าขดหนึ่งมีเส้นลวดยาวพอพันได้รอบเดียว อีกขดหนึ่งมีเส้นลวดพอพันได้ n รอบ ขดแรกจะมีลวดยาว $2\pi r$ เท่าของขดครู และขดหลังจะมีลวดยาว $2\pi rn$ เท่า ดังนั้นแรงแม่เหล็กก็เป็น $2\pi rn$ เท่าด้วย ซึ่งแปลว่าถ้า i เท่ากับ ๑ หน่วย F เท่ากับ $2\pi rn$ หน่วย.

สำหรับขดลวดที่มีเส้นลวดยาวเท่ากัน แต่ขดเป็นวงโตต่างกัน เมื่อปล่อยกระแสไฟเท่ากัน ขดโตจะได้แรงแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางน้อยกว่าขดเล็กและน้อยเข้าตามส่วนของระยะทางกำลังสอง ซึ่งในที่นี้คือรัศมีกำลังสอง ฉะนั้นถ้าขดหนึ่งมีรัศมี ๑ หน่วย อีกขดหนึ่งมีรัศมี r หน่วย ขดหลังจะได้แรงแม่เหล็กน้อยลงเป็น

r^2 เท่า ถ้ากระแสไฟที่ปล่อยในขดลวดเท่ากับ ๑ หน่วย แรงแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของลวดเท่ากับ $\frac{1}{r^2}$ หน่วย.

ถ้าขดลวดที่เราใช้ทดลองมีลวดยาวกว่า ๑ ซม. และรัศมีของขดลวดก็ยาวกว่า ๑ ซม. สมมุติว่าเส้นลวดยาว n รอบหรือ $2\overline{\prod}rn$ หน่วย รัศมียาว r หน่วย เมื่อปล่อยกระแสในขดลวด ๑ หน่วยจะได้แรงแม่เหล็ก $\frac{2\overline{\prod}rn}{r^2}$ หน่วย

ถ้ากระแสไฟเป็น ๑ หน่วย แรงแม่เหล็กเป็น $\frac{2\overline{\prod}rn}{r^2}$ หน่วย

คือ $F = \frac{2\overline{\prod}rn}{r^2}$ หรือ $\frac{2\overline{\prod}n}{r}$; $i = 1$

หรือ $F = \frac{2\overline{\prod}n\ i}{r}$

เราเคยรู้แล้วว่า $F = H \tan A$

ดังนั้น $\frac{2\overline{\prod}n\ i}{r} = H \tan A$

$$i = \frac{rH}{2\overline{\prod}n} \tan A$$

เมื่อเราทราบค่าของ H กับของ tan A แล้วเราย่อมคำนวณค่าของ i ได้ แต่ค่าของ i ที่คำนวณได้นี้ยังเป็น หน่วยแม่เหล็กไฟฟ้า (E.M.U.) อยู่ ๑ หน่วยแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อทดลองสอบกับเครื่องวอลแตมิเตอร์ได้ความว่า ๑ หน่วย (E.M.U.) เท่ากับ ๑๐ แอมแปร์ ฉะนั้นตามสูตรข้างบน ถ้าจะคำนวณผลลัพธ์ของ i ให้เป็นแอมแปร์โดยตรงต้องเอา ๑๐ คูณเข้าด้วย.

สูตรเดยกลายเป็น $i = \frac{rH}{2\overline{\prod}n} \tan A \times 10$

$$= \frac{5rH}{\overline{\prod}n} \tan A$$

ตัวอย่าง.– เครื่องแตนเจนต์กัลวานอมิเตอร์มีขดลวด ๑๐ รอบ รัศมีของขดลวด ๕ ซม. เข็มเบน ๔๕° H เท่ากับ ๐.๑๘ เกาส์ ให้คำนวณกระแสไฟ

$$i = \frac{5rH}{\prod n}.\tan A$$

$$= \frac{5 \times 5 \times .18}{\frac{22}{7} \times 10} \times 1 = .143. \text{ แอมแปร์}$$

หมายเหตุ (๑) ในการคำนวณผลลัพธ์ของแตนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ จำนวนที่ได้แปลก ๆ กันก็คือ tan A และเมื่อได้ค่าของ tan A แล้วต้องเอามาคูณกับ $\frac{5rH}{\prod n}$ เสมอทุกครั้ง และจำนวน $\frac{5rH}{\prod n}$ เป็นจำนวนตายตัวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ฉะนั้นถ้าเราใคร่จะคิดเปลี่ยนเป็นจำนวนเลขให้สำเร็จ แล้วนำไปใช้คราวอื่น ๆ ได้เสมอ จำนวนเลขสำเร็จของ $\frac{5rH}{\prod n}$ เราเรียกว่า **ตัวคูณสำเร็จ** (reduction factor) เพราะเอาไปคูณกับ tan A ที่เดียวก็ได้ผลลัพธ์ ตัวคูณสำเร็จจำนวนนี้มักเขียนตัวย่อแทนว่า K

(๒) จำนวน $\frac{2\prod n}{r}$ ที่บอกสัมพันธ์ระหว่าง f กับ i ก็เป็นจำนวนตายตัวประจำเครื่อง เราจะคิดให้เป็นจำนวนเลขสำเร็จเสียก็ได้ ไม่ว่าจะนำเครื่องแตนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ไปใช้ที่ประเทศไหน จำนวนตายตัวประจำเครื่องนี้ย่อมใช้ได้ถูกต้องเสมอ จำนวนนี้เป็นจำนวนที่ห้างเขียนกำกับติดไว้กับเครื่อง เวลาใช้คำนวณเราต้องหาแต่ค่าของ H ประจำตำบลต่าง ๆ กับค่าของ tan A เท่านั้น จำนวน $\frac{2\prod n}{r}$ เรามัก

เรียกกันว่า **นิจประจำเครื่อง** (galvanometer constant) และมักเขียนด้วยย่อแทนว่า G

(๓) เครื่องแตนเจนต์กัลวานอมิเตอร์มีประโยชน์ใช้เป็นเครื่องสำหรับเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างหม้อไฟต่าง ๆ ได้ด้วย เช่นเราอยากจะเทียบว่าหม้อไฟ A กับหม้อไฟ B จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นกี่เท่าของกัน เอาหม้อ A กับหม้อ B ต่อเป็นอันดับกับเครื่องกัลวานอมิเตอร์ ต่อให้ไฟไหลทางเดียวกันครั้งหนึ่ง ต่อให้ไฟไหลสวนกันครั้งหนึ่ง แล้วอ่านมุมที่เข็มกัลวานอมิเตอร์หันทั้งสองครั้งให้รู้.

ในเรื่องนี้ความต้านทานในวงจรคงเหมือนกันทั้งสองคราว คือความต้านทานของวงจรประกอบด้วยความต้านทานของกัลวานอมิเตอร์ G ความต้านทานของลวดที่ใช้ต่อ R ความต้านทานของหม้อเอ B_A ความต้านทานของหม้อบี B_B ฉะนั้นกระแสที่ไหลย่อมได้ส่วนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้.

ถ้าหม้อ A มีแรงเคลื่อน E_A หม้อบี E_B เวลาต่อไฟให้ไหลทางเดียวกันจะได้กระแสไฟ $\frac{E_A + E_B}{G + R + B_A + B_B}$ และเวลาต่อให้ไฟไหลสวนกันจะได้กระแสไฟ $\frac{E_A - E_B}{G + R + B_A + B_B}$ กระแสไฟสองคราวเทียบกันจะได้ส่วนตามค่าของแทนของมุมที่เข็มหันเทียบกัน สมมุติว่าเมื่อไฟไหลทางเดียวกัน เข็มหันเป็นมุม x และเมื่อไฟไหลสวนกันเข็มหันเป็นมุม y

$$\frac{E_A + E_B}{E_A - E_B} = \frac{\tan x}{\tan y}$$

คือ $$\frac{E_A}{E_B} = \frac{\tan x + \tan y}{\tan x - \tan y}$$

ตัวอย่าง.— หม้อบุนเสนกับหม้อแดเนี่ยลล์ เมื่อปล่อยไฟทางเดียวกัน เข็มกัลวานอมิเตอร์หัน ๖๖° เมื่อปล่อยไฟสวนทางกัน เข็มหัน ๓๒° ถ้าหม้อแดเนี่ยลล์มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑.๑ วอลต์ หม้อบุนเสนมีแรงเคลื่อนเท่าไร?

แทน ๖๖° = ๒.๒๕ ; แทน ๓๒° = .๖๒

$$\frac{\text{E. M. F. ของหม้อบุนเสน}}{\text{E. M. F. ของหม้อแดเนี่ยลล์}} = \frac{2.25 + .62}{2.25 - .62}$$

$$= \frac{2.87}{1.63}$$

$$= 1.76$$

$\therefore$ E. M. F. ของหม้อบุนเสน $= 1.1 \times 1.76$

$= 1.94$ วอลต์.

(๔) เครื่องแตนเจนต์กัลวานอมิเตอร์จะใช้สำหรับหาความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลกก็ได้ เอาหม้อไฟ เครื่องกัลวานอมิเตอร์ และเครื่องวอลแตมิเตอร์รวมกันต่อเป็นอันดับ แล้วอ่านมุมที่เข็มกัลวานอมิเตอร์หันให้รู้ ชั่งน้ำหนักของโลหะที่แยกออกจากน้ำยาให้รู้ จดเวลาที่ทำการทดลองให้รู้ เราคำนวณกระแสไฟได้จากเครื่องวอลแตมิเตอร์ และคำนวณค่าของ H ได้จากเครื่องกัลวานอมิเตอร์.

เช่นตัวอย่าง เข็มกัลวานอมิเตอร์หัน ๔๕° ทองแดงแยกออกจากน้ำยา .๑๖๙ กรัม เวลาทดลอง ๓๐ นาที ขดลวดในเครื่องกัลวานอมิเตอร์มี ๘ ขด และรัศมี ๘.๒๕ ซม.

จากสูตร $m = i e t$

$$.169 = i \times .000328 \times 1800$$

$$i = .286 \text{ แอมแปร์}$$

จากสูตร $$i = \frac{5rH}{\prod n} \tan A$$

$$.286 = \frac{5 \times 8.15 \times H}{\frac{22}{7} \times 8} \times 1$$

$H = .177$ ดายน์ต่อหน่วยขั้วแม่เหล็ก.

๒๔. ไซนกัลวานอมิเตอร์ เป็นเครื่องมืออันเดียวกันกับเครื่องแทนเจนต์กัลวานอมิเตอร์นั่นเอง แปลกกันแต่วิธีตั้งเครื่องใช้ เมื่อปล่อยกระแสเข้าในขดลวดและเข็มเบนแล้ว เราหมุนขดลวดตามเข็มไปด้วย จนเมื่อเข็มหยุดนิ่งขดลวดตั้งอยู่ในแนวเดียวกับเข็ม คราวนี้เข็มเบนมากกว่าเครื่องแทนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ และขณะที่เข็มหยุดนิ่ง แรงแม่เหล็กอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับเข็ม และโมเมนต์ที่เกิดจาก F คงเป็น $m F l$ ส่วนโมเมนต์ที่เกิดจาก H คงเป็น $m H l \sin A$ เช่นเดียวกับในเรื่องแทนเจนต์กัลวานอมิเตอร์.

การที่เข็มหยุดนิ่งอยู่ได้แปลว่าโมเมนต์ทั้งสองเท่ากัน.

ฉะนั้น $$m F l = m H l \sin A$$

$$F = H \sin A$$

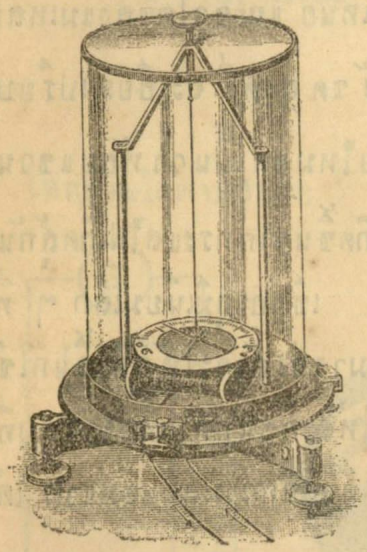
แต่ $$F = \frac{2\prod n}{r} \cdot i$$

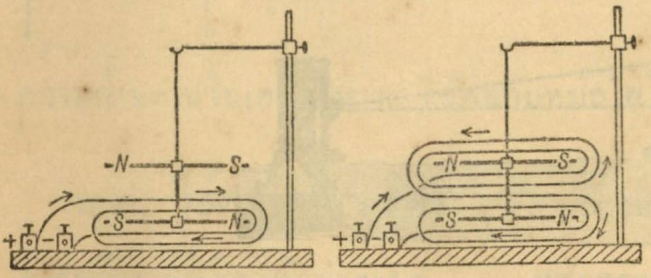
$$\frac{2\prod n}{r} \cdot i = H \sin A$$

$$i = \frac{rH}{2\prod n} \cdot \sin A \quad \text{(หน่วยแม่เหล็กไฟฟ้า)}$$

$$= \frac{5rH}{\prod n} \cdot \sin A \quad \text{(แอมแปร์)}$$

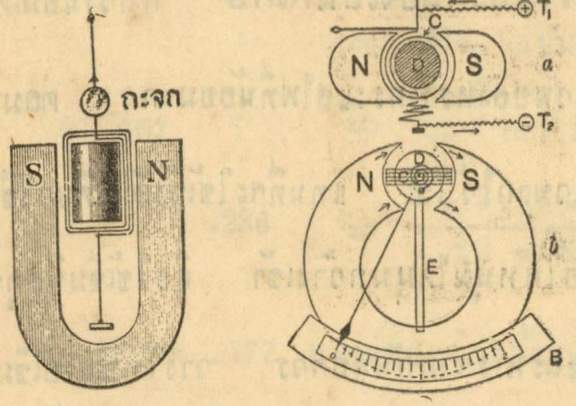
๒๙. กัลวานอมิเตอร์ชะนิดไวและคล่องเป็นพิเศษ กัลวานอมิเตอร์ที่กล่าวมาแล้วไม่คล่อง ละเอียดและไวพอสำหรับกระแสไฟที่น้อยมาก ต่อมาจึงมีผู้ประดิษฐ์กัลวานอมิเตอร์ที่คล่องและไวมากไว้ใช้ แทนที่จะใช้เข็มทิศเดี่ยวใช้เข็มแอสเตติคเพื่อให้หมุนได้มุมกว้างเข้า คือใช้เข็มทิศคู่หนึ่งวางซ้อนกันและห่างจากกันพอควร วางให้ปลายเข็มอันบนกับอันล่างสลับกัน แรงปลายเหนือของอันหนึ่ง แก้กันกับแรงปลายใต้ของอีกอันหนึ่ง คงมีแรงแม่เหล็กเหลือสำหรับล่อกับแรงแม่เหล็กของโลกแต่เล็กน้อย ฉะนั้นกระแสไฟเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เข็มทิศหมุนบิดได้เป็นมุมโต ๆ แต่การวางขดลวดต้องระวังวางรอบเข็มอันบนกับเข็มอันล่างให้เข็มหมุนในทางเดียวกัน ไม่ให้หมุนขัดกัน.





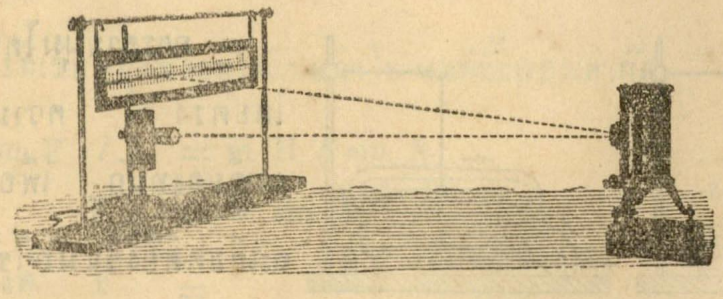
รูป ๗๒

การอ่านมุมโดยสังเกตปลายเข็มโดยตรง ความจริงยังอ่านไม่ได้ละเอียดแท้นัก เพื่อจะอ่านมุมให้ได้ละเอียดดียิ่งขึ้นมักใช้กะจกเงาเล็ก ๆ ติดอยู่กับแกนของเข็มแอสเตติค แล้วใช้ไฟฉายตรงไปที่กะจกเงาให้ฉายแสงกลับไปถูกฝาหรือไม้บรรทัด ที่วางห่างจากกัลวานอมิเตอร์ออกมา เวลาเข็มกัลวานอมิเตอร์ส่ายแต่เพียงเล็กน้อย เราก็วัดมุมได้ละเอียดโดยสังเกตดวงแสงที่ฉายสะท้อนจากกะจกส่ายไปมา.



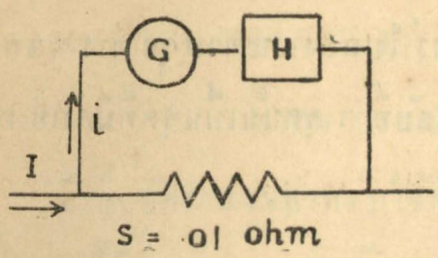
รูป ๗๓

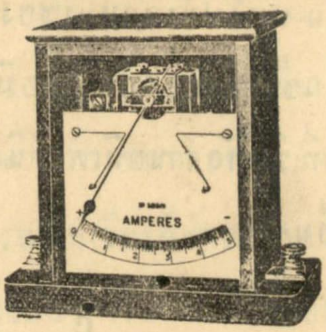
กัลวานอมิเตอร์ชะนิดที่คล่องที่สุดเป็นกัลวานอมิเตอร์แบบดาร์ซองวาล แบบนี้ไม่ใช้เข็มทิศ ใช้แม่เหล็กรูปเกือกม้าวางอยู่กับที่ ตรงที่ว่างระหว่างขั้วเหนือ และขั้วใต้ของแม่เหล็กเกือกม้าใช้ขดลวดที่ละเอียดเปรียบเหมือนสายไหมขดเป็นวงห้อยแขวนอยู่ เวลาปล่อยกระแสตามขดลวด อำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟเกิดสู้กันกับแรงที่ขั้วของแท่งแม่เหล็ก ทำให้ขดลวดหมุนรอบตัว เข็มอาลุมิเนียมเล็ก ๆ ที่ติดอยู่กับขดลวดจะช่วยให้อ่านมุมที่ขดลวดแกว่งส่ายไปมาและถ้าจะให้ดียิ่งขึ้นก็ใช้กระจกเงาติดอยู่ที่ขดลวด แล้วใช้ไฟฉายไปที่กระจกเงาให้สะท้อนกลับเพื่ออ่านมุมที่ขดลวดแกว่งได้อย่างละเอียด เครื่องดี ๆ ใช้วัดกระแสที่น้อยกว่ามิลลิแอมแปร์ได้อย่างละเอียดถูกต้อง.



รูป ๗๔

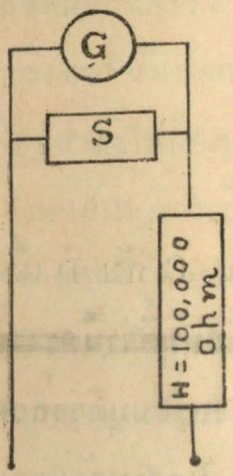
๓๐. แอมมิเตอร์และวอลต์มิเตอร์ เครื่องมือสองอย่างนี้คือกัลวานอมิเตอร์อย่างที่ดีซึ่งได้ทดลองทำขึ้นมาตราส่วนสำเร็จแล้ว เวลาใช้อ่านตัวเลขตรงที่เข็มชี้ไปถึงเป็นแอมแปร์เป็นวอลต์ได้ทันที การทดลองทำขึ้นมาตราส่วนให้อ่านเป็นวอลต์เป็นแอมแปร์นั้นทำได้อย่างไรจะของดไม่กล่าวถึงในที่นี้.

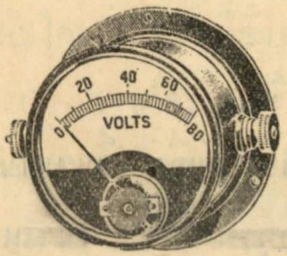




รูป ๗๕

จะขอเตือนแต่ว่า แอมมิเตอร์เป็นเครื่องวัดแอมแปร์ ต้องมีความต้านทานน้อยที่สุดเพื่อเครื่องแอมมิเตอร์จะได้ไฟไม่กินไฟ กระแสไหลผ่านได้ตามสบาย อ่านผลลัพธ์ได้ถูกจริง เวลาต่อแอมมิเตอร์ต้องต่อให้เป็นอันดับกับเครื่องอื่น ฉะนั้นต้องระวังมาก อย่าเผลอต่อแอมมิเตอร์โดยลำพังกับหม้อไฟ จะชอร์ตเซอร์คูอิตบ่อยๆ หมด และต้องระวังอย่าใช้วัดกระแสไฟที่มากกว่าเครื่องจะทนได้ ถ้าจำเป็นต้องใช้ก็ต้องใช้สวิตช์แบ่งไฟช่วย.



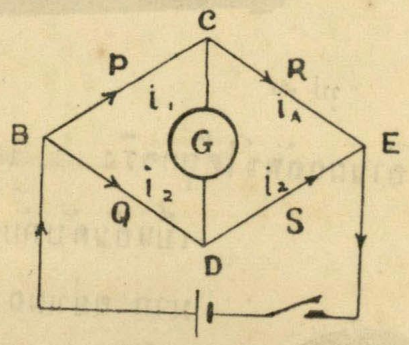


รูป ๗๖

วอลต์มิเตอร์เป็นเครื่องวัดวอลต์ มีความต้านทานในเครื่องมาก ใช้ต่อกับหม้อไฟโดยตรง.

๓๒. **วีฮ์ตสโตน บริดจ** (Wheatstone bridge) เป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดความต้านทานของตัวนำต่างๆ หลักของวีฮ์ตสโตนบริดจ์มีดังนี้ เมื่อเวลาเอาลวดสองเส้นต่อจากหม้อไฟอันเดียวกันและให้ลวดเรียงเป็นขนานกัน ความลดของศักย์ (P.D.) ในเส้นลวดทั้งสองจะเท่ากัน ฉะนั้นตามจุดต่างๆ ในเส้นลวดคู่นั้นจะมีจุดเป็นคู่ๆ ที่มีศักย์เท่ากัน และจุดคู่ที่มีศักย์เท่ากันนี้เราทดลองหาพบได้ง่าย โดย

ใช้ลวดโยงจากจุดใดในเส้นหนึ่งไปยังขั้วหนึ่งของเครื่องกัลวานอมิเตอร์ และใช้ลวดอีกเส้นหนึ่งโยงจากอีกขั้วหนึ่งของกัลวานอมิเตอร์ไปลองแตะตามจุดต่าง ๆ ของอีกเส้นหนึ่งดู ถ้าพบจุดที่เข็มกัลวานอมิเตอร์นิ่งอยู่กับที่ จุดนั้นเป็นจุดที่มีศักย์เท่ากับอีกจุดหนึ่งในลวดเส้นอื่น.



รูป ๗๗

สมมุติว่า BCE กับ BDE เป็นลวดสองเส้นที่ต่อเป็นขนานกัน C กับ D เป็นจุดที่มีศักย์เท่ากันซึ่งหาพบโดยการทดลองดังที่พูดมาแล้ว ในขณะนี้สมมุติว่ามีกระแสไฟ i_1 ในเส้นลวด BCE และมีกระแสไฟ i_2 ในเส้นลวด BDE และสมมุติว่าลวด BC มีความต้านทาน P ลวด CE มีความต้านทาน R ลวด BD มีความต้านทาน Q และลวด DE มีความต้านทาน S.

P.D. ใน BC $= Pi_1$

P.D. ,, CE $= Ri_1$

P.D. ,, BD $= Qi_2$

P.D. ,, DE $= Si_2$

เนื่องจากจุด C กับจุด D มีศักย์เท่ากัน P.D. จาก B ถึง C กับ P.D. จาก B ถึง D ย่อมเท่ากัน และ P.D. จาก C ถึง E กับ P.D. จาก D ถึง E ย่อมเท่ากัน

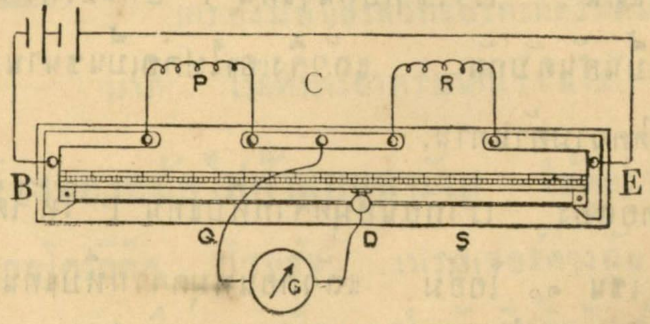
ฉะนั้น $Pi_1 = Qi_2$ ------ (๑)

และ $Ri_1 = Si_2$ ------ (๒)

เอาสมการอัน (๒) หารสมการอัน (๑) $\frac{P}{R} = \frac{Q}{S}$

นี่เป็นอัตราส่วนสำหรับใช้คำนวณในเรื่องวีฮ์ตสโตนบริดจ์ และในระหว่าง ๔ จำนวนนี้คือ P, Q, R, S ถ้าเรารู้อยู่แล้ว ๓ จำนวน เราย่อมคำนวณจำนวนที่ ๔ ได้.

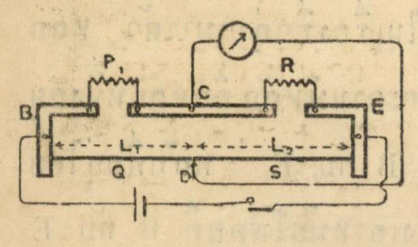
ในเครื่องวีฮ์ตสโตนบริดจ์แบบสามัญ ใช้ลวดเส้นเล็ก ๆ ซึ่งมีความต้านทานมากเป็นพิเศษ ลวดนี้ขึงตึงระหว่างหลักสองหลักบนแผ่นกะดาน และเมื่อขึงแล้วลวดมีส่วนยาว ๑ เมตรพอดี ลวดเส้นนี้แทนลวด BDE ในเรื่องที่กล่าวมาแล้ว หลักที่ขึงลวดมักบัดกรีติดกับแผ่นทองเหลืองและที่ตรงกลางกะดานมีหลักอีกหลักหนึ่งอยู่โดยลำพังไม่ติดต่อกับใคร หลักที่ขึงลวดสมมุติว่าเป็น B กับ E หลักที่อยู่โดยลำพังสมมุติว่าเป็น C เวลาจะใช้เครื่องนี้ทำการทดลองเอาหม้อไฟต่อที่ B กับ E เอาลวดที่รู้ความต้านทานต่อที่ B กับ C และสมมุติว่าเป็น P เอาลวดที่ต้องการวัดความต้านทานต่อที่ C กับ E และสมมุติว่าเป็น R เอาลวดทองแดงธรรมดา (อ้วนหน่อยยิ่งดีจะได้มีความต้านทานน้อยที่สุด) ต่อจากขั้วหนึ่งของเครื่องกัลวานอมิเตอร์ไปยังหลัก C และเอาลวดทองแดงอีกเส้นหนึ่งต่อจากอีกขั้วหนึ่งของเครื่องกัลวานอมิเตอร์สำหรับเอาปลายลวดมาลองแตะตามเส้นลวดที่ขึงอยู่ระหว่างสองหลัก เมื่อพบจุดที่เข็มกัลวานอมิเตอร์อยู่นิ่ง อ่านหรือวัดให้รู้ว่าจุดนั้น



รูป ๗๘

อยู่ห่างจาก B กี่มากน้อย (สมมุติว่า a ซม.) เมื่อเป็นเช่นนี้ระยะระหว่างจุดนั้นกับ E ก็ (๑๐๐ – a) ซม. ในที่นี้ความต้านทานของเส้นลวดตอน a แทน Q และตอน (๑๐๐–a) แทน S ดังนั้นจากสมการ $\frac{P}{R} = \frac{Q}{S}$ เราหาค่าของ Q ได้ เพราะค่าของ P เรารู้แน่นอนแล้ว ส่วนความต้านทานของเส้นลวดตอน a กับ (๑๐๐–a) ถึงแม้เราไม่รู้ค่าแน่นอนเราก็เทียบอัตราส่วนกันได้ เพราะเป็นลวดเส้นเดียวกัน ความต้านทานเมื่อเทียบกันย่อมต้องเท่ากับอัตราส่วนระหว่างส่วนยาวของเส้นลวดของสองตอนนั้น.

ตัวอย่าง.– เช่น P เท่ากับ ๑๐ โอห์ม และจุดที่เข็มกัลวานอมิเตอร์อยู่นิ่งห่างจาก B ๔๐ ซม. ระยะที่จุดนั้นห่างจาก E ก็ (๑๐๐–๔๐) ซม.



รูป ๗๔

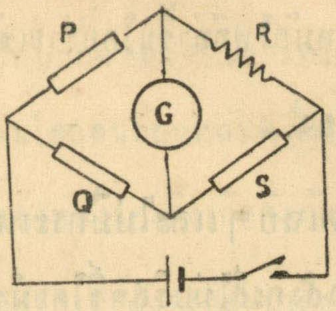
ดังนั้น $\frac{Q}{S}$ ในที่นี้เท่ากับ $\frac{40}{60}$

ฉะนั้น $\frac{10}{R} = \frac{40}{60}$

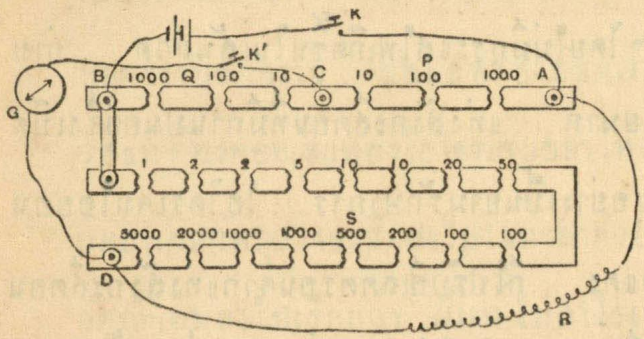
$R = 15$ โอห์ม

๓๒. **โปสต์ออฟฟิซบอคซ์** (post office box) เป็นเครื่องแบบเดียวกันกับเครื่องวีท์สโตนบริดจ์ แต่แทนที่จะใช้ขึงเส้นลวดระหว่างสองหลักเพื่อแบ่งส่วนเทียบความต้านทานออกเป็นอัตราส่วนอันเดียวกับอัตราส่วนความต้านทานระหว่างเส้นลวดที่รู้ความต้านทานกับเส้นลวดที่ต้องการวัดความต้านทาน ใช้ **หีบต้านทาน** (resistance box) แทน เราใช้หีบหนึ่งแทน P อีกสองหีบแทน Q กับ S และต่อหีบ Q กับ S เป็นอันดับกัน แล้วจึงเอาไปต่อเป็นขนานกับหีบที่แทน P และเส้นลวดที่ต้องการวัดความต้านทาน.

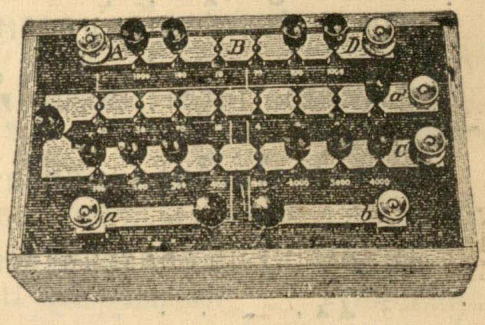
เวลาจะทำการทดลอง เราถอนหมุดจากหีบแทน P ให้ได้ความต้านทานเท่าไรก็ได้ตามใจชอบ เช่น ๑๐ โอห์ม แล้วถอนหมุดจากหีบแทน Q ตามใจชอบอีก เช่น ๔๐ โอห์ม คราวนี้ถอนหมุดจากหีบแทน S ที่ละหมุดสองหมุดแล้วลองไฟ



รูป ๘๐

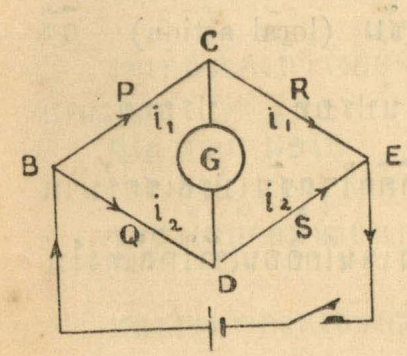


รูป ๘๑



รูป ๘๒

ครั้งหนึ่ง จนได้เหมาะเข็มกัลวานอมิเตอร์อยู่นิ่ง วิธีถอนหมุดทำอย่างเดียวกับลองถูกตุ้มชั่งของ ลองตั้งแต่อันใหญ่แล้วร่นให้น้อยเข้าจนได้เหมาะกับที่ต้องการ สมมุติว่าเมื่อถอนหลัก ๖๐ โอห์มแล้วเหมาะกัน เราก็คำนวณความต้านทานของลวดเส้นที่ต้องการวัดได้ว่า ๑๕ โอห์ม จากสูตรของวีฮ์ตสโตนบริดจ์ เครื่องมือนี้สะดวกและกะทัดรัดดีมาก แต่ราคาแพงมาก ไม่เหมาะสำหรับนักเรียนใช้.



รูป ๘๓

๓๓. ข้อบกพร่องของหม้อไฟฟ้าแบบสามัญ ได้พูดไว้แต่หน้าต้นๆแล้วว่า ถ้าเอาแท่งโลหะที่มีอิเลคโตรดิติค โซลูชัน เปรสเซอร์ต่างกัน เช่นสังกะสีกับทองแดงจุ่มลงในน้ำกรดอย่างเจือจางจะมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในเส้นลวดที่ใช้ โยงแท่ง

โลหะทั้งสองให้ถึงกัน แต่หม้อไฟที่ทำขึ้นโดยง่ายเช่นนกระแสไฟเดิรไม่ใคร่สะดวก และมักมีข้อบกพร่องอยู่ ๒ เรื่อง.—

(๑) **สังกะสีกัดกับกรดเฉย ๆ และไม่มีกระแสไฟออกจากหม้อ** ถ้าแท่งที่ใช้เป็นขั้วลบ เช่นแท่งสังกะสีไม่บริสุทธิ์โดยมีธาตุอื่นเจือปนอยู่ด้วย โดยฉะเพาะธาตุที่ปนอยู่ด้วยมีอิเลคโตรดิคโซดูชันเปรสเชอร์น้อยกว่าสังกะสีเช่นธาตุถ่าน สังกะสีจะกัดกับกรดเฉย ๆ โดยไม่มีกระแสไฟเกิดขึ้นในเส้นลวด ถ่านส่งไอออนถ่านลงไปในน้ำยาได้น้อยมาก แท่งสังกะสีตอนที่มีถ่านปนอยู่จึงเปียกเป็นรูโหว่ไม่มีไอออนบวกล้อมอยู่อย่างเป็นยามรักษาการ ไฮโดรเจนไอออนแทนที่จะไปรับอิเลคตรอนที่แท่งทองแดง ก็ไปรับอิเลคตรอนจากแท่งสังกะสีตอนแถบที่มีถ่านโผล่อยู่อย่างสบาย อิเลคตรอนในแท่งสังกะสีหมดไปที่ตรงนี้ ไม่ต้องการวิ่งไปถึงแท่งทองแดง เรื่องนี้เท่ากับเกิดกระแสไฟประจำถิ่นขึ้นในแท่งสังกะสี ข้อบกพร่องอย่างนี้เรียกว่า **โลแคลแอคชัน** (local action) วิธีแก้ใช้ด้างแท่งสังกะสีให้สะอาด แล้วเอาแท่งจุ่มลงในปรอท ปรอทจะฉาบแท่งสังกะสีปิดพื้นที่ถ่านโผล่จากแท่งปรอทมีอิเลคโตรดิคโซดูชันเปรสเชอร์มากกว่าถ่าน ส่งปรอทไอออนออกจากแท่ง ไฮโดรเจนไอออนเข้าใกล้แท่งไม่ต้องวิ่งไปรับอิเลคตรอนจากแท่งทองแดงเช่นเคย.

(๒) **กระแสไฟเดิรไม่สม่ำเสมอ** หยุด ๆ เดิร ๆ ขณะที่หม้อไฟปล่อยกระแสไปตามเส้นลวด ไฮโดรเจนไอออนภายในหม้อวิ่งไปรับอิเลคตรอนที่แท่งทองแดง และเมื่อรับอิเลคตรอนได้แล้ว ก็กลายเป็นปรมาณูไฮโดรเจนปกติ ซึ่งมักเป็นฟองแกสเกาะอยู่รอบ ๆ แท่งทองแดง ฟองแกสเป็นตัวนำ

ที่เดียว ไฮโดรเจนไอออนก้อนหลัง ๆ มากะทบไม่ถึงแท่งทองแดงเพราะมีฟองแกสกั้นเสีย ไฮโดรเจนไอออนก้อนหลัง ๆ จึงรับอิเลคตรอนจากแท่งทองแดงไม่ได้ อิเลคตรอนในแท่งทองแดงจึงเกิดคั่งกันขึ้น เกิดความเบียดระหว่างกันมากขึ้น อิเลคตรอนจากแท่งสังกะสีดันมาถึงได้น้อยเข้า ดังนี้จึงปรากฏเป็นกระแสไฟลดน้อยลง และบางครั้งถึงกับกระแสไฟไหลไม่ได้เลยก็มี ต้องหยุดชะงักชั่วคราว ข้อบกพร่องอันนี้เรียกว่า **โปลาไรเซชัน** (polarisation) วิธีแก้ต้องคอยเขี่ยฟองไฮโดรเจนอย่าให้เหลือเกาะที่แท่งทองแดงได้หรือมิฉะนั้นก็ต้องเติมวัตถุบางชะนิดลงไปในน้ำยาด้วยเพื่อคอยกันไม่ให้หม้อเกิดโปลาไรเซชัน วัตถุที่เติมลงไปเรียกว่า **ผู้แก้โปลาไรเซชัน** (depolariser) ซึ่งที่แท้ถ้าพูดตามภาษาเคมี วัตถุที่เติมลงไปนั้นคือพวกออคซิไดเซอร์ ซึ่งคอยออคซิไดส์ปรมาณูไฮโดรเจนปรกติให้กลับเป็นไฮโดรเจนไอออนละลายกลับลงไปในน้ำยาแท่งทองแดงก็ว่างอยู่เสมอ ไฮโดรเจนไอออนวิ่งมารับอิเลคตรอนจากแท่งได้สะดวกทุกเมื่อไป วิธีแสดงโปลาไรเซชันให้นักเรียนในชั้นดู ใช้แท่งสังกะสีจุ่มลงในถ้วยมีน้ำยาเกลือธรรมดา และที่กั้นมีปรอทบริสุทธิ์ เอาลวดเส้นหนึ่งโยงจากแท่งสังกะสีไปยังขั้วหนึ่งของเครื่องกัลวานอมิเตอร์ อีกเส้นหนึ่งโยงจากอีกขั้วหนึ่งของเครื่องกัลวานอมิเตอร์ไปยังปรอทที่กั้นถ้วย กระแสไฟจะเดิรทันที สังเกตได้จากเข็มของเครื่องกัลวานอมิเตอร์บัดกว้างออก แล้วไปหยุดนิ่งอยู่ห่างจากที่เดิม แต่มิช้าเข็มจะตั้งต้นบัดกลับ แสดงว่ากระแสลดน้อยเข้า ๆ ขณะนี้ถ้าเติมเมอร์คูริคคลอไรดเติมลงไปในถ้วยด้วย เข็มกัลวา

นอมิเตอร์จะบ่ดกว้างออกอีก แสดงว่ากระแสไฟหายชะงักและคงเดิรได้เป็นปกติแล้วเมอร์คูริคคลอไรดเป็นตัวแก้โปลาไรเซชัน (depolariser) เมอร์คูริคคลอไรดเป็นผู้เติมออคซิเจน คอยออคซิไดส์ฟองไฮโดรเจนกลับเป็นไฮโดรเจนไอออน.

เนื่องจากหม้อไฟแบบสามัญมีข้อบกพร่องเกี่ยวกับโปลาไรเซชัน ต่อมาจึงมีผู้คิดแก้ไขข้อบกพร่องนี้ด้วยวิธีต่าง ๆ และคิดสร้างหม้อไฟแบบต่าง ๆ ขึ้นตั้งหลายสิบแบบใช้น้ำยาและตัวแก้โปลาไรเซชันต่าง ๆ กัน.

๓๔. **หม้อแบบสมี** (smee's cell) เป็นหม้อไฟแบบสามัญอย่างที่ใช้แท่งสังกะสี ทองแดงและกรดซัลฟิวริค แต่ในแบบนี้แทนแท่งทองแดงใช้แท่งเงินและผิวแท่งทำให้ขรุขระเป็นหนามแหลม ๆ แล้วชุบทองคำขาว เพื่อไม่ให้กรดกัดแท่ง การที่ทำให้ผิวแท่งเป็นหนามขรุขระนั้นเพื่อจะบ้องกันไม่ให้ฟองไฮโดรเจนจับเกาะอยู่ได้ แบบนี้ทำให้เกิดโปลาไรเซชันน้อยเข้า แต่ก็ยังไม่ดีแท้.

๓๕. **หม้อกรดโครมิค** (chromic acid cell) ใช้สังกะสีเป็นขั้วลบ แท่งถ่านอัดเป็นขั้วบวก น้ำยาใช้กรดซัลฟิวริคชะนิดเจือจาง กรดโครมิคเป็นตัวแก้โปลาไรเซชัน เมื่อไฮโดรเจนไอออนมารับอิเลคตรอนที่แท่งถ่านและกลายเป็นไฮโดรเจนปกติแล้ว กรดโครมิคออคซิไดส์ไฮโดรเจนกลับเป็นไฮโดรเจนไอออนทันที ไม่ปล่อยให้รวมเป็นฟองอยู่ที่แท่งถ่าน.

$$3H_2 + 2H_2CrO_4 = Cr_2O_3 + 5H_2O$$

ส่วนขี้ตะกอน Cr_2O_3 ที่เกิดขึ้นนั้นกัดกับกรดซัลฟิวริคละลายอยู่ในน้ำยาเป็นโครมิคซัลเฟต.

$$3H_2SO_4 + Cr_2O_3 = Cr_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

๓๖. หม้อไบโครเมต (bichromate cell) เป็นหม้อมีเรื่องราวทำนองหม้อกรดโครมิค แต่แทนที่จะใช้กรดโครมิค กับกรดสัลฟิวริค ใช้โปแตสเซียมไบโครเมตกับกรดสัลฟิวริค โปแตสเซียมไบโครเมตเป็นตัวแก้โปลาไรเซชันคือคอยออคซิไดส์ ฟองไฮโดรเจนที่เกาะอยู่บนแท่งถ่านตามสมการต่อไปนี้. –

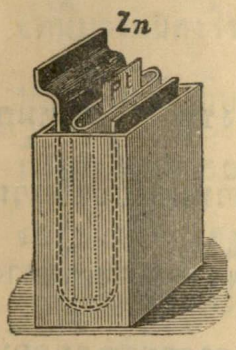


รูป ๘๓

$$3H_2 + K_2Cr_2O_7 + 4H_2SO_4 = K_2SO_4 + Cr_2(SO_4)_3 + 7H_2O$$

ขั้วลบใช้แท่งสังกะสี น้ำยาใช้โปแตสเซียมไบโครเมต ๑๐๐ กรัม กรดสัลฟิวริคอย่างข้น ๒๐๐ กรัม น้ำ ๑,๒๐๐ กรัม และถ้าจะให้แน่ใจว่าแท่งสังกะสีจะไม่เกิดโลคัลแอคชัน จะเติมเมอร์คูรัสสัลเฟตลงไปด้วยเพื่อให้ปรอทฉาบแท่งสังกะสีเป็นจำนวน ๒.๕ กรัมต่อน้ำยา ๑ ลิตรก็ได้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ ๒.๑ วอลต์ หม้อไฟแบบนี้แท่งสังกะสีกัดกับกรดอยู่เสมอไม่ว่าจะต่อไฟใช้หรือเก็บหม้อไว้เฉย ๆ โดยเหตุนี้จึงหาวิธีคอยดึงแท่งสังกะสีขึ้นให้พ้นน้ำยาขณะที่เก็บหม้อไว้เฉย ๆ และมักใช้แท่งถ่านสองแท่งขนาบแท่งสังกะสี และให้อยู่ใกล้ ๆ กับแท่งสังกะสี ความต้านทานภายในน้อยเวลาต่อไฟใช้สามารถปล่อยกระแสได้มาก ๆ

๓๗. หม้อแบบโกรฟ์ (Grove's cell) ใช้หม้อสองชั้น รูปสี่เหลี่ยมทั้งชั้นนอกและชั้นใน ชั้นนอกเป็นหม้อดินเคลือบ ชั้นในเป็นหม้อดินซึ่งน้ำซึมได้เช่นหม้อดินที่ใช้เป็นหม้อกรอง ภายในหม้อดินชั้นในบรรจุกรดไนตริคและมีแผ่นทองคำขาวสำหรับเป็นขั้วบวก กรดไนตริคเป็นตัวแก้โปลาไรเซชัน ระหว่างหม้อชั้นในกับหม้อชั้นนอกบรรจุกรดสัลฟิวริคชะนิดเจือจาง (๑ ใน ๘) กับมีแผ่นสังกะสี



รูป ๘๔

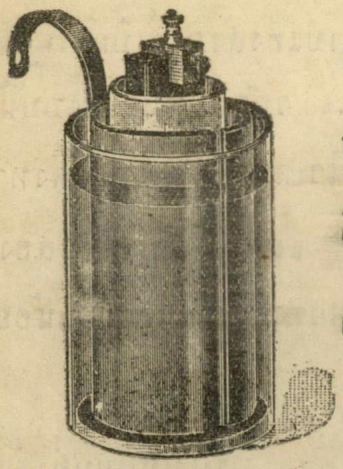
โค้งเป็นรูปตัว 'ยู' รองรับหม้อดินชั้นใน และแผ่นสังกะสีเป็นขั้วลบ

แรงไฟฟ้าเกิดขึ้นแบบเดียวกับหม้อแบบสามัญ ไฮโดรเจนไอออนซึมหม้อดินชั้นในเข้าไปหาแผ่นทองคำขาวเพื่อรับอิเลคตรอนที่นั่น แล้วกลายเป็นไฮโดรเจนปกติเกาะอยู่ที่แผ่นทองคำขาว กรดไนตริคออกซิไดส์ไฮโดรเจน

$$H^{\circ} + HNO_3 = H_2O + NO_2$$

หม้อแบบนี้มีความต้านทานภายในน้อย และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ ๑.๙๕ วอลต์

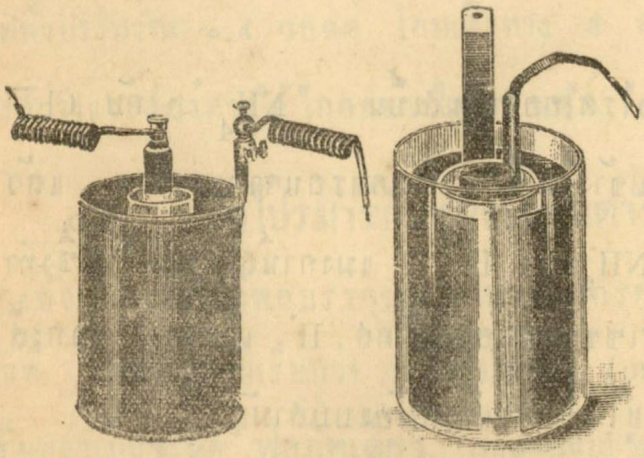
๓๘. **หม้อแบบบุนเสน** (Bunsen's cell) อย่างเดียวกับหม้อแบบโกรฟ์ ทุกอย่างเป็นแต่เปลี่ยนทองคำขาวเป็นแท่งถ่านซึ่งมีราคาถูกมากกว่า ได้ผลเหมือนกัน รูปหม้อเป็นกะบอกแทนเป็นรูปสี่เหลี่ยมทั้งหม้อนอกหม้อใน แท่งสังกะสีแทนที่จะโค้งเป็นตัว 'ยู' ลอดใต้หม้อชั้นใน โค้งเป็นวงตามรูปหม้อและวางหม้อชั้นในไว้ตรงกลาง.



รูป ๘๕

๓๙. **หม้อแบบแดเนียลล์** (Daniell's cell) ใช้หม้อสองชั้น รูปหม้อเป็นกระบอกทั้งชั้นนอกและชั้นใน ชั้นนอกเป็นหม้อทองแดงและใช้ตัวหม้อเป็นขั้วบวกเลย ชั้นในเป็นหม้อดินที่น้ำซึมได้ ในหม้อชั้นในมีกรดสัลฟิวริคอย่างเจือจาง (๑ ใน ๑๐) กับแท่งสังกะสีซึ่งเป็นขั้วลบ เวลาต่อไฟใช้มีเรื่องราวอย่างเดียวกับหม้อแบบสามัญ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึมทะลุหม้อดินออกมาข้าง

นอก จึงไปรับอิเลคตรอนที่ตัวหม้อทองแดงแล้วกลายเป็นปรมาณุไฮโดรเจนปกติ H° และในหม้อนอกบรรจุน้ำยาทองแดงสัลเฟตละลายน้ำจนเต็มอิ่ม ทองแดงไอออน (Cu^{++}) คอยออคซิไดส์ไฮโดรเจนกลับเป็นไฮโดรเจนไอออน (ดูบัญชีลำดับอิเลคโตรโมติฟว์ของธาตุในตำราเคมี) และฝ่ายทองแดงไอออนถูกรีดิวส์ตกลับเป็นปรมาณุทองแดงเกาะอยู่ที่ข้างหม้อทองแดง



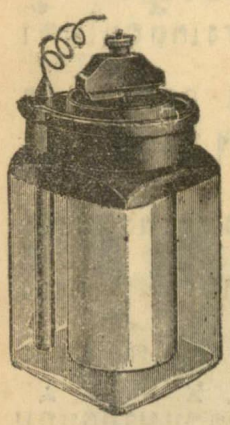
รูป ๘๖

$$2\,H^{\circ} + Cu^{++} = Cu^{\circ} + H^{+} + H^{+}$$

หม้อแบบนี้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ ๑.๐๗ - ๑.๑๔ วอลต์ สุดแต่ความข้นของน้ำยาที่ใช้ เมื่อทองแดงสัลเฟตเต็มอิ่มและพึ่งจุ่มแท่งสังกะสีลงในน้ำกรดใหม่ ๆ ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑.๑๕๖ วอลต์ และถ้าสังกะสีสัลเฟตที่เกิดขึ้นมากจนอิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อคงเหลือเพียง ๑.๐๘ วอลต์ เพื่อจะรักษาให้ทองแดงสัลเฟตคงอิ่มอยู่เสมอ ที่ขอบหม้อทองแดงมีแผ่นทองแดงบัดกรีรอบหม้อเป็นชั้นใต้ผิวน้ำยาสำหรับวางก้อนผลึกทองแดงสัลเฟต เพื่อให้ละลายเติมลงไปในน้ำยาอยู่ได้เสมอ แต่มีบางคนคงใช้หม้อแก้วกลม และใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วบวกอย่างรูปข้างมือ.

ถ้าหม้อเก็บไว้นาน ทองแดงไอออนในน้ำยาหม้อนอกมักซึมลอดหม้อดินเข้าไปถึงข้างในและออคซิไดส์แท่งสังกะสี ทำให้ปรมาณุสังกะสีกลายเป็นสังกะสีไอออน และส่วนทองแดงไอออนถูกรีดิวส์ตเป็นปรมาณุทองแดงเกาะติดอยู่ที่แท่งสังกะสี และเมื่อเป็นเช่นนี้จะเกิดโลคัลแอคชันขึ้นทันที ฉะนั้นหม้อแบบนี้ถ้าเก็บทิ้งไว้นาน แท่งสังกะสีจึงกัดกับกรดกร่อนเร็วมากเนื่องจากโลคัลแอคชัน หม้อแบบนี้ดีสำหรับการงานที่ใช้กระแสไฟบ่อย ๆ เช่นในเรื่องโทรเลข.

๔๐. **หม้อแบบเลคลังเช** (Le Clanche's cell) ใช้หม้อสองชั้น ชั้นในเป็นหม้อดินซึ่งมีน้ำซึมได้และมีแท่งถ่านอยู่กลาง มีผงถ่านปนกับผงแมงกานีสไดออคไซดบรรจุอยู่เต็มรอบแท่งถ่าน ชั้นนอกเป็นหม้อแก้วและมักเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งไม่จำเป็น หม้อนอกบรรจุน้ำยาแอมโมเนียมคลอไรด (๑๕ %) และมีแท่งสังกะสีกลมๆ แช่อยู่ด้วยสำหรับเป็นขั้วลบ.



รูป ๘๗

แอมโมเนียมคลอไรดไอออนไนสเป็น NH_4^+ กับ Cl^- NH_4^+ ซึมหม้อดินเข้าไปข้างในเพื่อรับอิเลคตรอนจากแท่งถ่าน แล้วกลายเป็นแอมโมเนีย NH_3 กับ $H^\cdot$ แมงกานีสไดออคไซดซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแก้โปลาไรเซชันคอยออคซิไดส $H^\cdot$ เป็นน้ำ สังกะสีละลายเป็น Zn^{++} อยู่ในน้ำยาอย่างหม้อแบบสามัญ

$$NH_4Cl \longrightarrow NH_4^+ + Cl^-$$

$$NH_4^+ + \ominus = NH_3 + H^\cdot$$

$$H_2^\cdot + 2\,MnO_2 = H_2O + Mn_2O_3$$

หม้อแบบนี้มักใช้สังกะสีแท่งเล็กๆ มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ ๑.๔๕ วอลต์ แมงกานีสไดออคไซดออคซิไดสไฮโดรเจนได้ช้ามาก ถ้าปล่อยกระแสไฟมากๆ มักเกิดโปลาไรเซชัน ความต้านทานภายในเทียบกับหม้อแบบอื่นจัดว่ามีความต้านทานภายในสูงมากไม่เหมาะสำหรับที่ๆ ต้องการกระแสไฟมากๆ ดีแต่สำหรับที่ๆ ต้องการกระแสไฟน้อยๆ และนานๆจึงต้องการกระแสครั้งหนึ่ง เช่นกะดิ่งตามบ้านและเครื่องโทรศัพท์ หม้อแบบนี้สะอาด ใช้ง่าย เก็บไว้นานๆไม่เสีย ไม่ต้องเปลี่ยนน้ำยาบ่อยๆ.

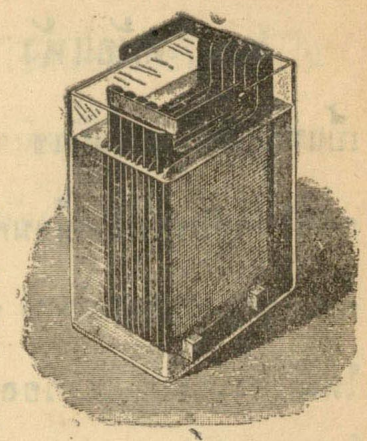
๔๑. **หม้อแห้ง** (dry cell) แบตเตอรี่แห้ง เช่นที่ใช้จุดไฟฟ้าเดรทางนั้น เป็นหม้อแบบเลอคลังเช แต่แทนที่จะใช้น้ำยาและตัวหม้อ ใช้ผงแมงกานีสไดออคไซดกับแอมโมเนียมคลอไรดพรมน้ำพอชื้น ๆ แล้วบรรจุในหม้อสังกะสีมีแท่งถ่านอยู่ตรงกลางหม้อ ถ่านเป็นขั้วบวก ตัวหม้อใช้เป็นขั้วลบเสียเลย แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ ๑.๕ วอลต์ โคมเดรทาง ๕ ท่อน มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตั้ง ๗ วอลต์ จึงสว่างและส่องทางได้ไกลอย่างไฟรถยนตร์.

๔๒. **หม้อไปรมารีกับหม้อเซคันดารี** หม้อไฟแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นหม้อไฟที่พอบรรจุแท่งโลหะกับน้ำกรดหรือน้ำยาเสร็จแล้ว ก็มีไฟใช้ได้ทันที หม้อพวกนี้เรียกว่า **หม้อไปรามารี** (primary cell) และถ้าใช้หม้อชั้นเดียวเรียกว่าเป็นชะนิด **ฟลูอิดเดียว** (one–fluid cell) ถ้าใช้หม้อสองชั้นเรียกว่าเป็นชะนิด **สองฟลูอิด** (two–fluid cell).

นอกจากนี้ยังมีหม้ออีกพวกหนึ่งซึ่งเมื่อเติมน้ำกรดหรือน้ำยาและบรรจุแท่งโลหะพร้อมเสร็จแล้ว ยังไม่มีไฟใช้ได้ทันที ต้องรอเอาไฟฟ้ามาอัดหรือประจุ (charge) เสียก่อน แล้วจึงจะมีไฟใช้ และใช้ได้ทันที เมื่อปล่อยไฟ (discharge) หมดหม้อแล้ว ต้องเอาไฟฟ้ามาประจุใหม่แล้วก็มีไฟใช้ได้อีก หม้อพวกนี้เรียกว่า **หม้อเซคันดารี** (secondary cell) และโดยเหตุที่หม้อพวกนี้เก็บและสะสมไฟฟ้าเอาไว้ใช้ได้ บางคนก็ชอบให้ชื่อว่า **หม้อเก็บไฟ** (storage cell) หรือ **หม้อรวบรวมไฟ** (accumulator).

(๑) **หม้อเก็บไฟแบบโฟรกับปลังเต** (Faure and Planté) หรือ **หม้อเก็บไฟตะกั่ว** (lead accumulator) ใช้ตะกั่วสองแผ่นจุ่มลงในหม้อแก้ว

หรือหม้อเอโบไนต (ซึ่งมักเป็นรูปสี่เหลี่ยม) ในหม้อบรรจุกรดสัลฟิวริคชะนิดเจือจาง ตะกั่วแผ่นหนึ่งเป็นขั้วบวกอีกแผ่นหนึ่งเป็นขั้วลบ เมื่อจุ่มแผ่นตะกั่วลงในน้ำกรด ตะกั่วจะผะสมกับกรดเกิดเป็นตะกั่วสัลเฟต และตะกั่วสัลเฟตที่เกิดขึ้นฉาบอยู่ตามผิวแผ่นตะกั่วจนรอบแล้วหยุดผะสมธาตุเพราะกรดซึมเข้าไปถึงตอนในของแผ่นตะกั่วอีกไม่ได้ ตอนนี้ยังไม่มีไฟเวลาเอาไฟมาประจุ แผ่นขั้วบวกถูกออคซิไดส์โดยกระแสไฟ (สายบวกของหม้อไฟพร่องอีเลคตรอน ฉะนั้นอีเลคตรอนออกจากตะกั่วไปยังขั้วบวกของหม้อไฟที่ใช้ประจุ) และตะกั่วถูกออคซิไดส์จาก Pb^{++} ($Pb SO_4$) เป็น Pb^{++++} ($Pb O_2$) ซึ่งมีสีช็อโคเลตแก่ ส่วนแผ่นตะกั่วขั้วลบถูกรีดิวส์โดยกระแสไฟจาก Pb^{++} ($Pb SO_4$) เป็นตะกั่วธรรมดา (Pb°) เพราะอีเลคตรอนซึ่งมีอยู่มากที่ขั้วลบของหม้อไฟที่ใช้ประจุไหลมาอยู่ที่แผ่นตะกั่ว.



รูป ๘๘

เวลาปล่อยไฟใช้ แผ่นตะกั่วมีการเปลี่ยนแปลงตรงกันข้ามกับเมื่อคราวประจุ Pb^{++++} ($Pb O_2$) ที่ขั้วบวกค่อย ๆ ถูกรีดิวส์ตกลับเป็น Pb^{++} ($Pb SO_4$) โดยได้รับเพิ่มอีเลคตรอนที่ไหลมาจากขั้วลบ ส่วนที่ขั้วลบค่อย ๆ ถูกออคซิไดส์ตจากตะกั่วธรรมดา (Pb°) กลับเป็น Pb^{++} ($Pb SO_4$) โดยได้ปล่อยอีเลคตรอนออกไปตามเส้นลวดไปยังขั้วบวก พอหม้อปล่อยไฟหมดแล้วคงเป็น Pb^{++} $Pb (SO_4)$ ทั้งสองขั้วและต้องเอาไฟมาประจุกันใหม่จึงจะมีไฟใช้อีก การผะสมธาตุขณะประจุไฟและปล่อยไฟ แสดงโดยสมการเคมีได้ดังนี้.

ปล่อยไฟ

$$Pb\,O_2 + 2H_2\,SO_4 + Pb \rightleftharpoons Pb\,SO_4 + 2H_2O + Pb\,SO_4$$

ประจุไฟ

หม้อแบบนี้เมื่อประจุไฟเต็มที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๒.๒ วอลต์ และขณะนี้กรดมีความแน่นประมาณ ๑.๒๘ เวลาปล่อยไฟใช้ จะได้กระแสสะดวกดีตลอดเวลาจนเหลือแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑.๗ วอลต์และกรดมีความแน่นประมาณ ๑.๑๗ ต่อนี้ไปจะได้กระแสไฟอ่อนมาก ต้องประจุไฟกันใหม่ หม้อไฟต้องไม่ปล่อยให้เหลือแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำกว่า ๑.๘ วอลต์เป็นอันขาด เพราะเป็นอันตรายแก่หม้อ ตะกั่วซัลเฟตจับกันกรังเป็นผลึกใช้อัดไฟอีกไม่ได้ และหมดวิธีแก้ไข ต้องขว้างทิ้งเท่านั้น เวลาตะกั่วซัลเฟตเป็นผลึกเราพูดว่าหม้อ **เป็นสัลเฟต** (the cell is sulphated)หม้อเก็บไฟชนิดนี้มีความต้านทานภายในน้อยมาก เหมาะสำหรับที่ต้องการกระแสไฟมากๆ ทำขายขนาดต่างๆกันสุดแต่ความต้องการ ความจุของหม้อไฟมักพูดกันเป็นจำนวนแอมแปร์_ชั่วโมง เช่น ๖๐ แอมแปร์_ชั่วโมงหมายความว่าสามารถปล่อยกระแส ๖๐ แอมแปร์ได้ ๑ ชั่วโมง หรือ ๕ แอมแปร์ ๑๒ ชั่วโมง ฯลฯ ข้อที่เสียมีอยู่ที่น้ำหนักมาก และอายุไม่ยืน ใช้ได้เพียง ๒-๓ ปีเท่านั้นแล้วต้องโยนทิ้ง.

ที่พูดให้ฟังนี้เพียงเล่าย่อๆพอให้เข้าใจหลักของหม้อ ข้อพิสดารเกี่ยวกับเรื่องหม้อยังมีอีกมาก ต้องปรึกษาตำราฉะเพาะสำหรับเรื่องนี้เช่น วิธีทำจริงๆเขาไม่ใช้แผ่นตะกั่วธรรมดา เขาใช้ตะกั่วธรรมดาทำเป็นโครง

เท่านั้น แล้วโป๊ะด้วยตะกั่วออคไซด เพื่อให้โปร่งมีผิวและความจุมาก แผ่นที่เป็นขั้วบวกโป๊ะด้วย Pb_3O_4 และขั้วลบโป๊ะด้วย PbO ขณะที่ประจุไฟ Pb_3O_4 ถูกออคซิไดส์เป็น PbO_2 และ PbO ถูกรีดิวส์ตเป็นตะกั่วธรรมดา Pb.

(๒) **หม้อเก็บไฟแบบเอดิสัน** (Edison's storage cell) ใช้นิคเคลออคไซด NiO_2 เป็นขั้วบวก เหล็กเป็นขั้วลบ และใช้น้ำยาโปแตสเซียมไฮดรออคไซด (๒๐%).

การแลกเปลี่ยนอิเลคตรอนขณะประจุไฟ และปล่อยไฟ ยังไม่มีใครทราบความจริงชัดเจน เป็นแต่เพียงเขียนสมการเคมีอธิบายอย่างขอไปที่ว่าดังนี้.-

$$2NiO_2 + KOH + Fe \underset{\text{ประจุไฟ}}{\overset{\text{ปล่อยไฟ}}{\rightleftharpoons}} Ni_2O_3 + KOH + FeO$$

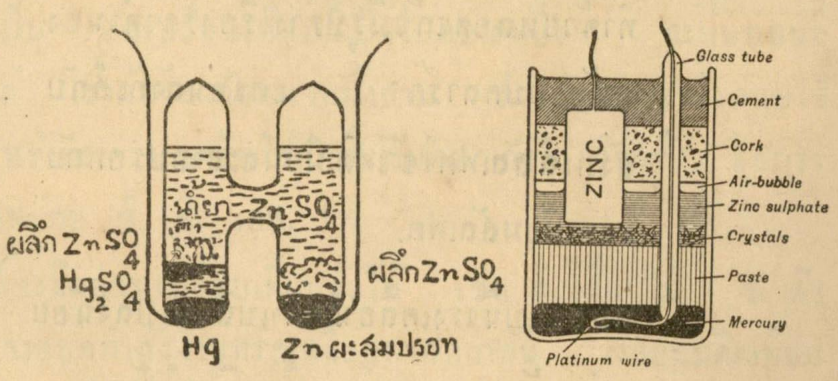
เมื่อประจุไฟเต็มที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑.๒ วอลต์ รายละเอียดเรื่องหม้อไฟแบบนี้ต้องปรึกษาตำราฉะเพาะ หม้อไฟแบบนี้เบากว่าหม้อตะกั่วมาก ทนทานใช้ได้ตั้ง ๑๐ ปี ๒๐ ปี แต่ราคาแพงกว่ากันมาก.

หมายเหตุ เรื่องหม้อไฟฟ้าที่ได้พูดมาแล้ว ทั้งหม้อไปรมารีและเซคันดารี เป็นเรื่องที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนกำลังงานเคมีเป็นกำลังงานไฟฟ้า ขั้นต้นจะให้ได้ความเข้าใจซึมทราบยังไม่ได้ ต้องรอให้ได้เรียนสูงขึ้นไป ได้อ่านเรื่องราวอื่น ๆ ประกอบกันจึงจะได้ความเข้าใจดียิ่งขึ้น และต่อเรื่องกันคิด วอลเตอิคเซลล์แบบสามัญที่ใช้แท่งสังกะสีกับทองแดงจุ่ม

ในกรดสัลพิวริค เมื่อสังกะสีละลายลงในน้ำยามากแล้ว ถ้าเอาไฟฟ้ามาประจุ ต่อแท่งสังกะสีกับขั้วลบและแท่งทองแดงกับขั้วบวก สังกะสีไอออนจะออกจากน้ำยากลายเป็นสังกะสีปรมาณูเกาะพอกอยู่ที่แท่งสังกะสีแล้วใช้ไฟได้อีก เวลาเอาไฟฟ้าแยกน้ำได้ออคซิเจนและไฮโดรเจนพอควรแล้ว ลองแก้ลวดออกจากหม้อไฟที่ใช้ประจุ แล้วเอาลวดจากขั้วทั้งสองของเครื่องแยกน้ำมาต่อเป็นวงจร จะได้กระแสไฟ ออคซิเจนกับไฮโดรเจนค่อย ๆ ผะสมกันกลับเป็นน้ำ และเมื่อเป็นเช่นนี้จะจัดว่าเครื่องแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นหม้อเก็บไฟหรือหม้อเซคันดารีก็ได้ ดังนี้จะเห็นว่าหม้อไปรมารีกับหม้อเซคันดารีจำกัดความแตกต่างระหว่างกันได้ยากมาก.

๔๓. **หม้อไฟมาตรฐาน** (standard cell) หม้อไฟบางแบบเวลาต่อไฟใช้ได้กระแสไฟน้อยมาก จนแทบจะว่าไม่มีกระแสเลยเลยก็ได้ แต่หม้อไฟแบบเหล่านี้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ดีมาก ไม่ใคร่เปลี่ยนแปลงเลย มีประโยชน์ใช้เป็นหลักสำหรับวัดหรือเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อไฟอื่น ๆ และโดยเหตุนี้จึงให้ชื่อหม้อไฟพวกนี้ว่าหม้อไฟมาตรฐาน แต่ใช้สำหรับปล่อยกระแสทำอะไรไม่ได้. หม้อไฟมาตรฐานที่นิยมใช้กันมี ๒ แบบ.

(๑) **หม้อแบบคลาร์ค** (Clark standard cell) ทำด้วยหลอดแก้วเป็นรูปตัว H ปลายหลอดถนไฟให้แก้วเข้มติดกันสนิทอากาศเข้าออกไม่ได้ ในหลอดข้างหนึ่งมีปรอท



รูป ๘๕

บริสุทธิ์อยู่ที่ก้นหลอดและมีลวดทองคำขาวโยงจากปรอททะลุเนื้อแก้วที่ก้นหลอดออกมาข้างนอกเป็นขั้วบวก ในอีกหลอดหนึ่งมีสังกะสีประสมปรอท (สังกะสีละลายในปรอท ๑๐–๑๕ %) อยู่ที่ก้นหลอด และมีลวดทองคำขาวโยงจากสังกะสีประสมปรอททะลุเนื้อแก้วที่ก้นหลอดทะลุออกมาข้างนอกเป็นขั้วลบ หลอดข้างที่เป็นขั้วบวกมีเมอร์คูรัสซัลเฟตประสมน้ำพอเละ ๆ กองอยู่เหนือปรอทและมีก้อนผลึกสังกะสีซัลเฟตวางทับเมอร์คูรัสซัลเฟตอีกชั้นหนึ่ง.

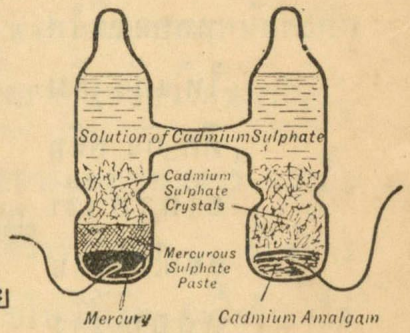
หลอดข้างบนที่เป็นขั้วลบมีก้อนผลึกสังกะสีซัลเฟตวางทับสังกะสีประสมปรอทอย่างเดียว ส่วนตอนบนของหลอดทั้งสองข้างบรรจุน้ำยาสังกะสีซัลเฟตละลายน้ำให้อิ่มตัวและบรรจุให้ท่วมหลอดอันนอนที่เชื่อมหลอดขั้วบวกขั้วลบ.

บางคนไม่ใช้หลอดรูปตัว H ใช้หลอดแก้วก้นตันธรรมดาอย่างรูป ๘๙ ขวามือก็ได้.

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อแบบนี้ ๑.๔๓๓ วอลต์ เมื่อ ๑๕° ซ. และเมื่ออุณหภูมิสูงต่ำกว่านี้ ต้องคำนวณแก้แรงเคลื่อนไฟฟ้าตามสูตรต่อไปนี้ :

$$E_t = 1.4233 - .00119\ (t-15)$$

(๒) หม้อแคดเมียมหรือหม้อแบบเวสตอน (cadmium or weston cell) ทำด้วยหลอดแก้วมีรูปร่างเรื่องราวทำนองหม้อแบบคลาร์ค แต่แทนสังกะสีกับสังกะสีซัลเฟตใช้แคดเมียมละลายปรอทกับแคดเมียมซัลเฟต.



รูป ๘๐

หม้อแบบนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าหม้อแบบคลาร์ค มีคนนิยมใช้มากกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อ ๒๐° ซ. เท่ากับ ๑.๐๑๘๓ วอลต์ และ

ถ้าอุณหภูมิสูงต่ำกว่านี้ ต้องคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าแก้ตามสูตรต่อไปนี้:

$$E_t = 1.0183 - .00004\ (t-20)$$

หมายเหตุ เราเคยจำกัด 'วอลต์' ว่าเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่พอดี สามารถส่งกระแสไฟผ่านความต้านทาน ๑ โอห์มได้ ๑ แอมแปร์ คำจำกัดความนี้พูดอนุโลมตามกฎของโอห์มออกจะไม่มีหลักเป็นตัวตนโดยตรงโดยลำพัง ฉะนั้นเรามักให้คำจำกัดความสำหรับ 'วอลต์' อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เท่ากับ $\frac{๑๐๐๐๐}{๑๐๑๘๓}$ ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อแบบเวสตอนเมื่อ ๒๐° ซ.

๔๔. หน่วยวัดกำลังงาน การที่จะเทียบหรือวัดกำลังงานนั้นเราย่อมอาศัยหน่วยเดิมทั้งสาม คือระยะทาง มวล และ เวลา มาช่วยเทียบ เพราะการเปลี่ยงแรงนี้นอยู่แก่จำนวนทั้งสาม เราจะใช้แต่จำนวนใดจำนวนเดียวมาเทียบจะได้ผลลัพธ์ไม่แน่และบริบูรณ์ เช่น ก. คุยว่าเขาตักน้ำ ๒ ปี๊บ และ ข. คุยว่าเขาตักน้ำ ๕ ปี๊บ เรายังตัดสินไม่ได้ว่าใครออกแรงไปแล้วมากกว่ากันและใครจะสมควรได้ค่าจ้างเท่าใด ถ้า ก. ตักน้ำ ๑ ปี๊บขึ้นจากบ่อลึก ๑๐ หน่วย ข. ตักน้ำ ๕ ปี๊บขึ้นจากบ่อลึกครึ่งหน่วย จะได้ผลเปรียบเทียบไปอย่างหนึ่ง หรือแม้ ก. ข. ตักน้ำขึ้นจากบ่อ ๆ เดียวกัน ก. เสียเวลา ๑ นาทีตักน้ำได้ ๒ ปี๊บ ข. เสียเวลา ๑ ชั่วโมงจึงตักน้ำได้ ๕ ปี๊บ ผลเปรียบเทียบก็เป็นไปอย่างหนึ่ง ฉะนั้นก่อนที่เราจะเทียบกำลังงานกันได้ เราต้องอาศัยหน่วยทั้งสาม สำหรับมาตราอังกฤษใช้ ฟุต เกรน วินาที สำหรับมาตราเมตริคใช้ เซ็นติเมตร กรัม วินาที และเรามักเรียกกันว่ามาตราหรือหน่วย ซี. จี. เอส.

การออกกำลังงานทุกชะนิดย่อมเปรียบเทียบกันได้ เช่น ก. เลื่อยไม้ ข. เดินทางไกล สองคนนี้ใครจะออกกำลังงานหรือเหนื่อยมากกว่ากัน เราย่อมคิดเทียบได้ สำหรับ ก. เราต้องทดลองให้รู้ว่าเขาออกแรงใช้ดึงเลื่อยเท่าใด เช่นเอาเชือกผูกปลายเชือกโยงไปคล้องลูกรอกแล้วเอาน้ำหนักถ่วงจนดึงให้เลื่อยเคลื่อนที่ได้ เรา

ก็รู้แรงที่ ก. ใช้ ใน ๑ วินาที ก. ชักเลื่อยกี่ครั้ง ก. ชักเลื่อยอยู่นานเท่าใด จากจำนวนเหล่านี้เราคิดเป็นหน่วยกำลังงานได้ ส่วน ข. บ้างเราต้องสอบให้รู้ว่า ข. ก้าวยาวเท่าใด ก้าวหนึ่งเขายกตัวเขาขึ้นสูงเท่าใด ตัวเขาหนักเท่าใด จากนี้เราคำนวณได้ว่าก้าวหนึ่ง ๆ ข. ออกแรงเท่าใด และจากเวลาที่เขาใช้เดินทาง เรารู้ว่าเขาก้าวกี่ก้าว จากนี้ก็รู้กำลังงานทั้งหมดที่ ข. เสียไป และก็เทียบกับ ก. ได้.

กำลังงานแสดงเป็นรูปต่าง ๆ เช่น ความร้อน ไฟฟ้า แสงสว่าง ฯลฯ กำลังงานรูปต่าง ๆ เหล่านี้ย่อมเทียบกันได้อีกเหมือนกัน เช่นในวิชาความร้อน เรารู้จาก 'จูล' ว่าเขาเคยทดลองได้ความว่าเมื่อจะให้มีความร้อนเกิดขึ้นหนึ่งแคลอรี่ ต้องเปลืองแรง ๔.๒ จูล หรือพูดสั้น ๆ หนึ่งแคลอรี่เท่ากับ ๔.๒ จูล.

สำหรับไฟฟ้ากับความร้อนเราก็คิดเทียบหน่วยระหว่างกันได้ เวลาเราปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านตามเส้นลวดย่อมมีความร้อนเกิดขึ้น เราปล่อยกระแสไฟเท่าใด เป็นเวลาเท่าใด เรารู้ได้ และถ้าเราเอาลวดไฟฟ้าจุ่มลงในอ่างน้ำ เรารู้ได้ว่าน้ำร้อนขึ้นกว่าเดิมเท่าใด และน้ำได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นเท่าใด จากนี้เราก็เทียบสัมพันธ์ระหว่างหน่วยไฟฟ้ากับหน่วยความร้อนได้ เช่นกระแสไฟ ๒ แอมแปร์ ชั่วเวลา ๓๐ นาที ทำให้น้ำ ๑๕๐ กรัม ร้อนขึ้น ๔ องศาเซ็นติเกรด เราได้ความว่าไฟฟ้าทั้งหมดที่เปลืองไปแล้วเท่ากับ ๓๖๐๐ คูลอมบ์ และความร้อนที่เกิดขึ้นเท่ากับ ๖๐๐ แคลอรี่ ดังนั้น ๖ คูลอมบ์เท่ากับ ๑ แคลอรี่ (ตัวเลขเหล่านี้เป็นแต่เพียงสมมุติขึ้นให้ดูพอให้เห็นวิธีเทียบเท่านั้น).

๔๕. **หน่วยไฟฟ้า** หน่วยที่ใช้กันในเรื่องไฟฟ้ามี ๔–๕ ชะนิด.

(๑) หน่วยอีเลคโตรสแตติค อี. เอส. ยู.

(๒) หน่วยอีเลคโตรแมกนิติค อี. เอม. ยู.

(๓) หน่วยแอบโซลูตหรือหน่วย ซี. จี. เอส.

(๔) หน่วยระหว่างนานาประเทศ.

(๕) แปรคติคัลยูนิต (practical unit).

๔๖. กำลังงานไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้ามีเรื่องราวทำนองเดียวกับกำลังงานในเรื่องเมแคนิคส์ กำลัง หมายถึงจำนวนงานที่ทำให้เกิดขึ้นในเวลาจำกัด.

ถ้าออกแรงหนึ่งปอนด์เป็นระยะไกล ๑ ฟุต ถือว่าได้เปลืองแรง หรือเป็นงานขึ้นแล้ว ๑ ฟุตปอนด์.

ถ้าออกแรง ๑ ดายน์ เป็นระยะไกล ๑ ซม. ถือว่าได้เปลืองแรง หรือเป็นงานขึ้นแล้ว ๑ เออร์ก โกฎิเออร์กเรียกว่า ๑ จูล.

๑ ปอนด์เท่ากับ ๔๕๓.๖ กรัม ๑ กรัมเท่ากับ ๙๘๑ ดายน์.

๑ ฟุตเท่ากับ ๓๐.๔๘ ซม.

ฉะนั้น ๑ ฟุตปอนด์เท่ากับ ๑.๓๕๖ จูล หรือ ๑ จูลเท่ากับ .๗๓๗ ฟุตปอนด์.

๑ แรงม้า หมายถึงกำลังที่เปลืองแรงทำงานได้วินาฑีละ ๕๕๐ ฟุตปอนด์.

๑ วัตต์ หมายถึงกำลังที่เปลืองแรงทำงานได้วินาฑีละ ๑ จูล.

๗๔๖ วัตต์เท่ากับ ๑ แรงม้า.

๑ กิโลวัตต์ประมาณ $1\frac{1}{3}$ แรงม้า.

ในเรื่องไฟฟ้า ถ้าใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑ วอลต์ต้อนไฟฟ้าไปได้ ๑ คูลอมบ์ ถือว่าไฟฟ้าได้เปลืองแรงทำงานไปแล้ว ๑ จูล และถ้าใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑ วอลต์ต้อนไฟฟ้าไปได้ ๑ แอมแปร์ ถือว่าไฟฟ้ามีกำลัง ๑ วัตต์.

ระวังสังเกตความหมายระหว่างจูลกับวัตต์ให้เข้าใจ.

กำลังไฟฟ้าคือจำนวนวัตต์ เท่ากับ จำนวนผลคูณระหว่างวอลต์กับแอมแปร์.

งานไฟฟ้าคือจำนวน จูล เท่ากับ จำนวนผลคูณระหว่าง วอลต์ แอมแปร์ และเวลา.

ตัวอย่าง.– (๑) หลอดไฟฟ้าใช้ไฟ ๑๐๐ วอลต์ และกินไฟ .๓๗๓ แอมแปร์ ถามว่าหลอดไฟฟ้านั้นเปลืองกำลังงานเท่าไร ?

กำลัง = วอลต์ × แอมแปร์

= ๑๐๐ × .๓๗๓

= ๓๗.๓ × วัตต์

= ๓๗.๓ ÷ ๗๔๖ หรือ $\frac{๑}{๒๐}$ แรงม้า.

(๒) ตามโจทย์ข้างบน ถ้าจุดไฟ ๕๐ หลอดพร้อมกัน เครื่องจักรที่หมุนเครื่องทำไฟฟ้าต้องมีกำลังเท่าไร?

ตอบ ๒ แรงม้า.

(๓) เครื่องสูบน้ำไฟฟ้า ๑$\frac{๑}{๒}$ แรงม้าใช้ต่อกับไฟ ๒๐๐ วอลต์ จะกินไฟเท่าไร?

แรงม้าครึ่งเท่ากับ ๑๑๑๙ วัตต์.

ฉะนั้นกินไฟ ๑๑๑๙ ÷ ๒๐๐ หรือ ๕.๕๙๕ แอมแปร์.

(๔) เครื่องสูบน้ำไฟฟ้า ใช้ไฟ ๑๐๐ วอลต์ กินไฟ ๗.๔๖ แอมแปร์ จะสูบน้ำขึ้นจากบ่อน้ำลึก ๑๐ ฟุต ได้วินาทีละกี่มากน้อย?

สูบน้ำนั้นมีกำลัง ๑๐๐ × ๗.๔๖ วัตต์ หรือ ๑ แรงม้า. ซึ่งแปลว่าออกแรงได้ ๑ ปอนด์ เป็นระยะ ๕๕๐ ฟุตใน ๑ วินาที.

ดังนั้นเครื่องสูบน้ำได้วินาทีละ ๕๕ ปอนด์.

(๕) รถรางใช้ไฟ ๕๐๐ วอลต์ เมื่อปล่อยไฟ ๗.๔๖ แอมแปร์ จะแล่นเร็วชั่วโมงละกี่ไมล์? ถ้ารถคันนั้นต้องการแรงผลัก ๑๐๐ ปอนด์จึงจะเชื่อน?

ขณะที่ปล่อยไฟ ๗.๔๖ แอมแปร์รถมีกำลัง ๕ แรงม้า.

ซึ่งแปลว่าออกแรง ๑๐๐ ปอนด์ได้ไกล $\frac{๕๕๐ \times ๕}{๑๐๐}$ ฟุตใน ๑ วินาที.

คือแล่นเร็ววินาทีละ ๒๗.๕ ฟุต หรือชั่วโมงละ ๑๘$\frac{๓}{๔}$ ไมล์.

๔๗. กำลังไฟฟ้าเทียบเป็นกำลังแสงสว่าง หลอดไฟฟ้าต่าง ๆ ชะนิดที่กินไฟเท่ากันไม่ได้แสงสว่างเท่ากัน เรื่องนี้สุดแต่ชะนิดของวัตถุที่ใช้เป็นไส้ ถ้าไส้ทำด้วยโลหะ กินไฟ ๑ วัตต์ได้แสงสว่างประมาณ ๑ กำลังเทียน ถ้าไส้ทำด้วยถ่านกินไฟ ๔ วัตต์ได้แสงสว่างประมาณ ๑ กำลังเทียน มีหลอดไฟชะนิดพิเศษเรียกว่าหลอดฮาล์ฟวัตต์ กินไฟครึ่งวัตต์ได้แสงสว่าง ๑ กำลังเทียน อาร์คแลมป์ คือใช้แท่งถ่านที่มีไฟเดิรสองแท่งจ่อกันกินไฟครึ่งวัตต์ได้แสงสว่าง ๑ กำลังเทียน.

หลอดไฟบางยี่ห้อเขาเขียนไว้บนหลอดว่า ๑๐๐ วอลต์ ๒๐ กำลังเทียน หมายความว่าหลอดนั้นสำหรับใช้กับไฟ ๑๐๐ วอลต์และได้ความสว่าง ๒๐ กำลังเทียน แต่จะกินไฟเท่าไรเขาไม่สัญญา บางยี่ห้อเขาเขียนไว้บนหลอดว่า ๑๐๐ วอลต์ ๒๐ วัตต์นั้น หมายความว่าหลอดนั้นสำหรับใช้กับไฟ ๑๐๐ วอลต์และกินไฟ ๒๐ วัตต์ แต่จะได้ความสว่างเท่าไรเขาไม่สัญญา.

เวลาคำนวณเราพอถือเป็นเกณฑ์สำหรับคิดได้ว่า ถ้าเป็นไส้โลหะจะกินไฟประมาณกำลังเทียนละ ๑ วัตต์ คือหลอด ๓๐ กำลังเทียนก็กินไฟ ๓๐ วัตต์ หรือหลอดที่กินไฟ ๓๐ วัตต์ก็ได้ความสว่าง ๓๐ กำลังเทียน หลอด ๓๐ กำลังเทียนถ้าจุดกับไฟ ๑๐๐ วอลต์ก็กินไฟ .๓ แอมแปร์ ถ้าจุดกับหม้อไฟรถยนตร์ ๖ วอลต์ก็กินไฟ ๕ แอมแปร์.

ราคากระแสไฟที่ใช้ตามบ้านเขาคิดตามจำนวนวัตต์และเวลาที่ใช้ ๑ กิโลวัตต์ต่อ ๑ ชั่วโมง หรือ ๑๐๐๐ วัตต์ต่อ ๑ ชั่วโมงคิด ๓๐ สตางค์ ฉะนั้นหลอดไฟ ๑๒๕ วัตต์หรือพัดลมที่กินไฟ ๑.๒๕ แอมแปร์ต้องเสียค่าไฟชั่วโมงละ $\frac{๑๒๕}{๑๐๐๐} \times ๓๐$ หรือ ๓.๗๕ สตางค์.

๑๐๐๐ วัตต์ต่อ ๑ ชั่วโมง หรือ ๑ กิโลวัตต์ต่อ ๑ ชั่วโมง พวกชาวบ้านมักเรียกกันว่า ๑ ยูนิต และค่าไฟตามบ้านยูนิตละ ๓๐ สตางค์.

๔๘. กฎของจูล มีใจความว่า จำนวนความร้อนที่เกิดขึ้นใน ๑ วินาที จากกระแสไฟ C แอมแปร์โดยกระแสไฟนั้นผ่านความต้านทาน R โอห์มเท่ากับ RC^2 จูล.

$$H = RC^2$$

ฉะนั้นในเวลา t วินาที $H = RC^2 t$ แต่ H ยังไม่เป็นแคลอรี ยังคงเป็นจูล ถ้าจะให้เป็นแคลอรีต้องเอา ๔.๒ หาร (เพราะหนึ่งแคลอรีเท่ากับ ๔.๒ จูล).

$$H = \frac{1}{4.2} RC^2 t \text{ (ความร้อน H เป็นแคลอรี).}$$

$$= .24\ RC^2 t$$

ผลที่ได้จากกฎนี้คือ ในเวลาจำกัดถ้ามีความต้านทานคงที่ ความร้อนได้ส่วนกับกระแสไฟกำลังสอง และถ้ากระแสไฟคงที่ ความร้อนได้ส่วนกับความต้านทาน.

ข้อความข้างบนมีเรื่องราวมาดังนี้ ความร้อนเป็นกำลังงาน และในที่นี้เกิดขึ้นหรือเปลี่ยนรูปมาจากกำลังงานไฟฟ้า เมื่อใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า V วอลต์ต้อนไฟไปตามตัวนำ C แอมแปร์ กำลังงานไฟฟ้าก็คือ VC วัตต์ และเมื่อเป็นเช่นนี้ กำลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นก็ต้องเป็น VC วัตต์ด้วย.

VC วัตต์ = วินาทีละ VC จูล.

ฉะนั้นในเวลา t วินาที ก็เป็น VCt จูล.

ตามกฎของโอห์ม $V = CR$.

ฉะนั้น $VCt = CR.Ct$

$= RC^2 t$

ตัวอย่าง.— ลวดชดหนึ่งมีความต้านทาน ๒ โอห์มและจุ่มอยู่ในน้ำ ๑๕๐ กรัม ถ้าปล่อยกระแสไฟในชดลวดนั้น ๓ แอมแปร์ชั่วเวลา ๓๐ นาที น้ำจะร้อนขึ้นกี่องศา?

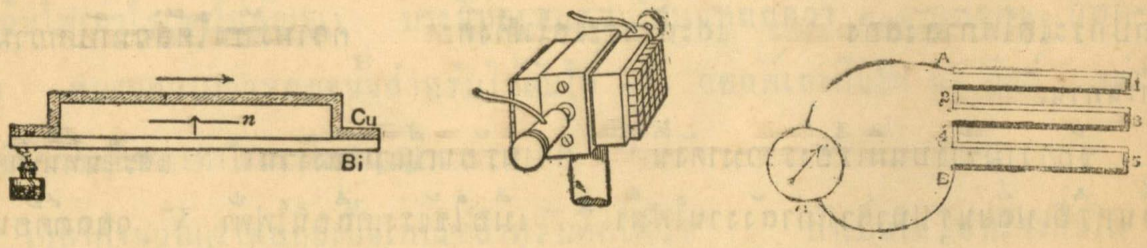
$$H = .24\ RC^2t$$

$$= (.24) \times (2) \times (3^2) \times (30 \times 60)$$

ฉะนั้นน้ำ ๑๕๐ กรัมร้อนขึ้น $= \frac{.24 \times 2 \times 9 \times 1800}{150}$ องศา

$$= 51.84 \text{ องศา.}$$

๔๙. เทอร์โมอีเลคตริคซีตี ลวดต่างชะนิดเมื่อบัดกรีให้หัวท้ายติดกันเป็นวง และเอาไฟลนที่รอยต่อข้างใดข้างหนึ่งให้ร้อน จะเกิดกระแสไฟในวงชดลวดนั้น.



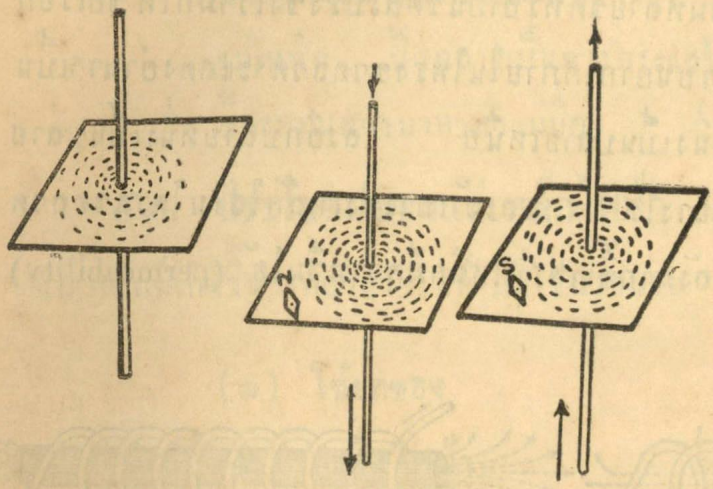
รูป ๘๑

กระแสไฟที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยย่อมสุดแต่ชะนิดของโลหะเป็นคู่ ๆ ไป ถ้าเป็นโลหะคู่เดียวกันนั้น ถ้ายิ่งลนไฟให้ร้อนก็ยิ่งได้ไฟมากขึ้น.

ความจริงข้อนี้มีประโยชน์เอาไปใช้ทำเครื่องไปโรมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิสูง ๆ แทนเทอร์มอมิเตอร์.

ถ้ารอยต่อรอยเดียวได้ไฟน้อย สู้มีหลายรอยต่อเรียงเป็นอันดับแล้วลนไฟให้ร้อนพร้อมกันไม่ได้ จะได้ไฟมากขึ้น ความจริงข้อหลังนี้มีประโยชน์ใช้ทำเทอร์โมไปล์.

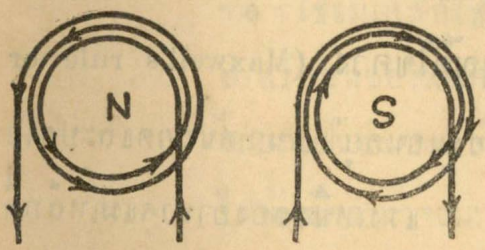
๕๐. แม่เหล็กไฟฟ้า (electro–magnet) เวลามีกระแสไฟแล่นในเส้นลวด จะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ เส้นลวด.



รูป ๘๒

อาราโก กับ โอเอร์ชเตด (Arago and Oersted) ได้ทดลองโดยใช้ลวดไฟฟ้าลอดรูทะลุกลางแผ่นกระดาษ แล้วเอาขี้ตะไบเหล็กโรยบนแผ่นกระดาษ ขี้ตะไบจะเรียงกันเป็นวง ๆ รอบเส้นลวด หรือถ้าใช้เข็มทิศเล็ก ๆ วางบนแผ่นกระดาษข้าง ๆ เส้นลวดณที่ใดก็ได้ เข็มจะชี้ได้แทนเจนต์กับวงกลมที่เขียนรอบเส้นลวดให้ผ่านจุดที่วางเข็มทิศนั้นเสมอ.

ถ้าเส้นลวดตอนข้างใต้แผ่นกระดาษต่อกับขั้วบวกของหม้อไฟฟ้า เข็มทิศจะชี้ปลายเหนือของแท่งไปตามทิศย้อนกันกับที่เข็มนาฬิกาเดินบนหน้าปัทม์ ทั้งนี้แสดงว่าเส้นลวดขณะที่มีกระแสไฟแล่นผ่าน ปรากฏว่ามีเส้นอำนาจแม่เหล็กพุ่งตรงออกมาจากเส้นลวดและเส้นอำนาจของแม่เหล็กควงรอบ ๆ เส้นลวด ถ้าเรามองดูตามเส้นลวดหันหน้าไปตามทางที่กระแสไฟไหลในเส้นลวดคือหันหน้าไปทางปลายลบ เส้นอำนาจแม่เหล็กที่พุ่งออกจากเส้นลวดควงรอบ ๆ เส้นลวดไปทางขวามือ.

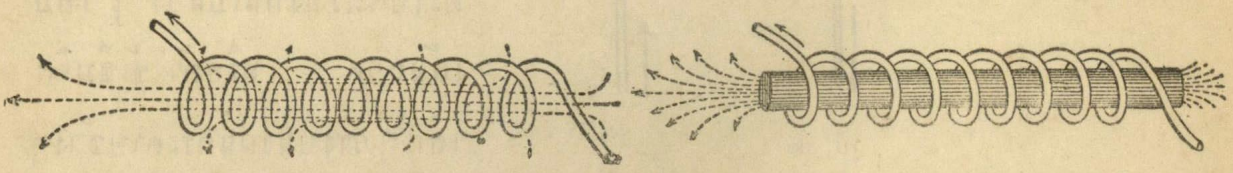


รูป ๘๓

ถ้าเราขดเส้นลวดให้เป็นวงกลม แว่นอากาศภายในขดลวดจะแสดงเป็นแว่น

แม่เหล็กคือแท่งแม่เหล็กที่ไม่มีส่วนยาว หน้าหนึ่งของแว่นอากาศแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นปลายเหนือ อีกหน้าหนึ่งเป็นปลายใต้.

ถ้าเราขดเส้นลวดให้เป็นวงกลมหลายขดหรือเป็นขดสะปริงซึ่งเรามักให้ชื่อเรียกกันว่า โซลีนอยด์ (solenoid) ก้อนอากาศภายในโพรงขดลวดจะแสดงอำนาจเป็นเสมือนแท่งแม่เหล็ก ปลายข้างหนึ่งเป็นปลายเหนือ และอีกปลายหนึ่งเป็นปลายใต้ สุดแต่จะขดเส้นลวดเป็นวงอย่างไร และถ้าเอาแท่งเหล็กใส่ในโพรงขดลวด แรงแม่เหล็กที่ปลายขดลวดจะมีกำลังมากขึ้นเพราะเหล็กมีความซึมได้ (permeability) ดีกว่าอากาศ.



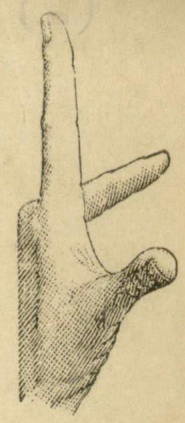
รูป ๙๔

วิธีสังเกตทิศของเส้นอำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากอำนาจไฟฟ้ามีนิยมใช้กัน ๓ วิธี.–

(๑) **ข้อบัญญัติของแอมแปร์** (Ampere's rule) เวลาเอาลวดไฟฟ้าวางทาบเข็มชี้ทิศ ให้สมมุติว่ามีคนว่ายน้ำหันหัวไปตามกระแสเหยียดแขนทั้งสองกางตรงออกไปจากตัว แล้วคว่ำหน้าหันเข้าหาเข็มชี้ทิศ ปลายเหนือของเข็มชี้ทิศจะเบนไปทางซ้ายมือของคนนั้นเสมอ

(๒) **ข้อบัญญัติของแมคซ์เวลล์หรือบัญญัติไขควง** (Maxwell's rule or cork screw rule) สมมุติว่าตาปูควงนอนอยู่ในแนวเส้นลวดและปลายตาปูชี้ไปตามกระแสไฟในเส้นลวด แรงเหนือของอำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดจะควงรอบเส้นลวดทิศเดียวกันกับทางที่เราหมุนอัดตาปูควง.

(๓) **ข้อบัญญัติมือซ้ายของเฟลมิง**(Fleming's left hand rule) แบมือซ้ายออก ถ่างหัวแม่มือให้เป็นมุมฉาก งอนิ้วกลางให้ตั้งฉากกับฝ่ามือ ถ้านิ้วชี้เป็นเส้นอำนาจแม่เหล็ก นิ้วกลางเป็นทางกระแสไฟไหลในเส้นลวด นิ้วชี้จะหมุนควงมาหาหัวแม่มือ.



รูป ๘๕

๕๑. **ประโยชน์ของแม่เหล็กไฟฟ้า** ประโยชน์ของอำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอำนาจไฟฟ้ามีที่ใช้มากมาย เรื่องที่สำคัญ ๆ มีดังนี้.

(๑) ใช้ยกของ

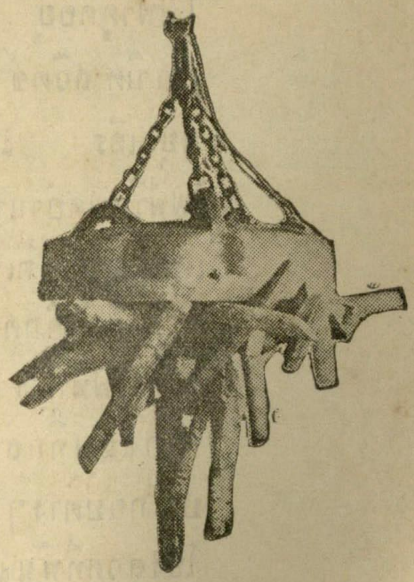
(๒) กะดิ่งไฟฟ้า

(๓) เครื่องกัลวานอมิเตอร์

(๔) เครื่องโทรเลข

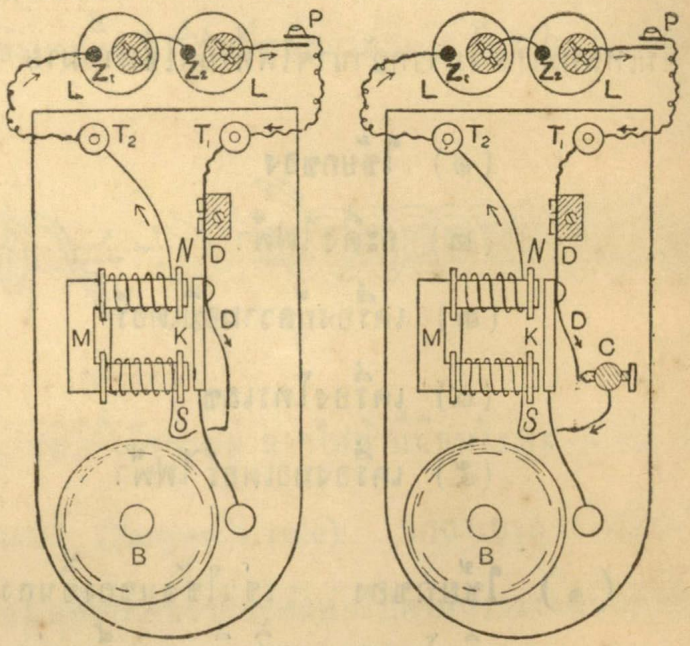
(๕) เครื่องมอเตอร์ไฟฟ้า

(๑) **ใช้ยกของ** เช่นใช้ขนของขึ้นลงจากเรือโดยฉะเพาะสิ่งที่จะขนเป็นแท่งเหล็กด้วน ๆ เช่นรางรถ แท่งเหล็ก ถังตาปู ฯลฯ ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าห้อยติดกับลูกรอกสำหรับยกของพอหย่อนรอกลงไปถึงสิ่งที่จะยกเช่นถังตาปู ก็เปิดไฟฟ้าให้แม่เหล็กไฟฟ้าเกิดอำนาจแม่เหล็กครั้นสาวรอกขึ้นมาถังตาปูจะถูกดูดติดขึ้นมาด้วย.



รูป ๘๖

(๒) กะดิ่งไฟฟ้า ประกอบด้วยกะดิ่ง ไม้ตี กับแม่เหล็กไฟฟ้า ไม้ตีเป็นแท่งเหล็ก ที่ปลายมีปุ่มสำหรับเคาะกะดิ่ง ที่โคนมีแผ่นเหล็กบาง ๆ เชื่อมติดกับเหล็ก ไม้ตีแกว่งไปมาได้ตามแนวนอน เมื่อแท่งเหล็กอยู่นิ่ง ๆ ปุ่มสำหรับเคาะกะดิ่งอยู่ห่างจากกะดิ่ง ที่ตอนกลางแท่งเหล็กที่เป็นไม้ตีมีแท่งเหล็กอีกแท่งหนึ่ง วางอยู่ใกล้ ๆ และมีลวดไฟฟ้าพันรอบแท่งเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า แท่งแม่เหล็กไฟฟ้านี้วางตามนอนห่างจากแท่งเหล็กที่เป็นไม้ตีเล็กน้อยและวางตั้งฉากกับไม้ตี เวลาเปิดสวิตช์ ให้ไฟฟ้าเดิร แม่เหล็กไฟฟ้าเกิดอำนาจแม่เหล็กดูดแท่งเหล็กที่เป็นไม้ตีเข้ามาหาปุ่มที่ปลายเคาะกะดิ่งครั้งหนึ่ง แล้วหยุดนิ่งติดอยู่กับกะดิ่งโดยแม่เหล็กไฟฟ้าดูดอยู่ ครั้นเราปิดสวิตช์ให้ไฟหยุดเดิร แม่เหล็กไฟฟ้าหมดอำนาจแม่เหล็ก แท่งเหล็กที่เป็นไม้ตีดีดกลับโดยกำลังดีดของเหล็กบาง ๆ ที่เชื่อมอยู่ที่โคนแท่ง ถ้าเราเปิดสวิตช์ไฟฟ้าให้ไฟเดิรอีก กะดิ่งก็ดังอีกครั้งหนึ่ง.



รูป ๕๗

กะดิ่งไฟฟ้าที่เราใช้กันแพร่หลายเป็นชนิดที่ดีแล้ว ซึ่งเราต้องดัดแปลงจากแบบที่กล่าวมาแล้วเล็กน้อย เกี่ยวกับการต่อลวดไฟฟ้า ส่วนประกอบต่าง ๆ คงเหมือนกับแบบที่กล่าวมาแล้วทุกอย่าง แต่คราวนี้เราโยงลวดที่พันแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ปลายเดียวมาต่อกับขั้วหนึ่งของหม้อไฟฟ้า อีกปลายหนึ่งของเส้นลวดโยงไปที่หลักเหล็กที่ยึดแท่งไม้ตี

ปักหลักเหล็กอีกหลักหนึ่งแถวตอนกลางของแท่งไม้ตีปักให้อยู่คนละข้างกับแม่เหล็กไฟฟ้า และปักให้เบียดติดกับแท่งไม้ตี แล้วหาลวดอีกเส้นหนึ่งต่อจากหลักที่ปักนั้นไปยังอีกขั้วหนึ่งของหม้อไฟฟ้า กระแสไฟเดิรจากหม้อไฟฟ้าผ่านลวดรอบแม่เหล็กไฟฟ้า ไหลมาตามแท่งไม้ตี ไหลจากหลักที่ปักเบียดแท่งไม้ตีกลับเข้าหม้อ เมื่อกระแสไฟไหลได้ แม่เหล็กไฟฟ้าเกิดอำนาจแม่เหล็ก ดูดแท่งไม้ตีเข้าไปหาและเคาะกะดิ่งดัง และในขณะเดียวกันแท่งไม้ตีหนีออกห่างจากหลักที่ปักเบียดกับแท่งไม้ตี กระแสไฟหยุดเดิรทันที แม่เหล็กไฟฟ้าหมดอำนาจแม่เหล็ก แท่งไม้ตีดีดกลับ เมื่อดีดกลับไปถูกหลักที่เคยเบียดอยู่ก่อน กระแสไฟเดิรได้อีก แม่เหล็กไฟฟ้าเกิดอำนาจแม่เหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้าดูดแท่งไม้ตีเข้าไปหาได้อีก สลับกันไปเช่นนี้แท่งไม้ตีจึงเคาะกะดิ่งรัวอยู่ได้ตลอดเวลา.

มาสมัยนี้มีบางคนหนวกหูเสียงกะดิ่งไฟฟ้าดังเช่นกะดิ่งไฟฟ้าตามเครื่องโทรศัพท์ เมื่อเป็นเช่นนี้เขาไม่ใช้กะดิ่ง คงมีแต่แท่งไม้ตี เวลาเบีดกระแสไฟ แท่งไม้ตีสะบัดในอากาศโดยลำพัง เกิดเป็นเสียง 'บอๆ' พอใช้เป็นอาณัติสัญญาได้ดี แต่หนวกหูน้อยกว่าเครื่องปราศจากตัวกะดิ่งเช่นนี้เขาเรียกว่า **บัซเซอร์** (buzzer)

(๓) เครื่องกัลวานอมิเตอร์ ได้กล่าวให้ฟังมาแล้ว.

(๔) เครื่องโทรเลข เป็นเครื่องมือที่อาศัยอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าเขียนเครื่องหมายอาณัติสัญญา.

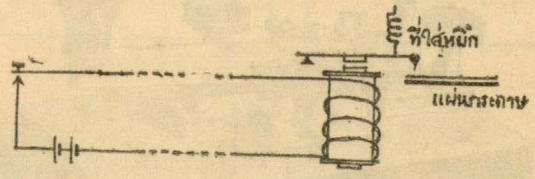
เมื่อเริ่มต้นที่เดียวใช้เครื่องกัลวานอมิเตอร์เป็นเครื่องบอกเครื่องหมายอาณัติสัญญา เช่นเอาเครื่องกัลวานอมิเตอร์วางไว้ในห้องแห่งหนึ่ง แล้วใช้ลวดสองเส้นโยงจากขั้วเครื่องกัลวานอมิเตอร์มายังอีกห้องหนึ่ง เมื่อเอาปลายลวดแตะกับขั้วของหม้อไฟ เข็มกัลวานอมิเตอร์ในห้องแรกจะเคลื่อนที่ ถ้าเราถือลวดในห้องหลังมือละเส้น

เอามือขวาแตะขั้วบวกของหม้อไฟฟ้า เอามือซ้ายแตะขั้วลบ เข็มกัลวานอมิเตอร์จะเบนไปทางหนึ่ง ครั้นเปลี่ยนท่ากลับมือเสีย เข็มกัลวานอมิเตอร์จะเบนไปอีกทางหนึ่ง ดังนี้เราบังคับให้เข็มกัลวานอมิเตอร์เบนไปทางไหนได้ตามชอบใจ โดยเอาปลายลวดเดือกแตะขั้วหม้อไฟฟ้าให้ถูกท่า และถ้าเราทำความตกลงกับคนในห้องแรกให้คอยสังเกตดูการเคลื่อนที่ของเข็มกัลวานอมิเตอร์ และให้จำไว้ว่าเราจะให้อาณัติสัญญาโดยทำให้เข็มกัลวานอมิเตอร์เบนชุดละสี่ครั้งหรือกี่ครั้งก็ตาม เช่นถ้าซ้ายขวาซ้ายขวาให้แปลความหมายเป็นตัว 'A' ขวาซ้ายขวาซ้ายเป็นตัว 'B' ขวาขวาซ้ายซ้ายเป็นตัว 'C' ฯลฯ คนที่คอยดูเข็มกัลวานอมิเตอร์ก็อ่านรู้เรื่องว่าอีกห้องหนึ่งส่งอาณัติสัญญาเป็นอักษรตัวอะไรมาบ้าง แล้วเอาตัวอักษรเหล่านั้นผสมกันเข้าก็เป็นเรื่องราวอ่านเข้าใจข้อความกัน.

ครั้นต่อมามีผู้คิดแก้ไขเครื่องโทรเลขให้สะดวกยิ่งขึ้น ใช้เครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าทำนองเครื่องกะดิ่งไฟฟ้า แต่แทนที่จะมีระฆัง เอาแผ่นกระดาษวางไว้แทนสำหรับให้ปุ่มของแท่งไม้ที่เคาะเป็นจังหวะได้ เมื่อกดสวิตช์ให้ไฟเดิร แล้วปล่อยสวิตช์ช้าๆ เร็วๆ ต่างกัน จะได้ยินเสียงเคาะกระดาษมีจังหวะต่างๆกัน แต่การสังเกตเสียงเคาะกระดาษเช่นนี้ใช้เป็นอาณัติสัญญาไม่ได้สะดวกดีจริง.

ต่อมามีผู้คิดเปลี่ยนแปลงปุ่มที่ใช้เคาะเป็นแอ่งหรือบ่อสำหรับขังน้ำหมึกได้และที่ก้นบ่อมีช่องเล็กๆ พอให้น้ำหมึกซึมทะลุออกมาได้ เวลาแม่เหล็กไฟฟ้าดูดแท่งไม้ที่ ก้นบ่อมีหมึกก็จดบนแผ่นกระดาษ แผ่นกระดาษใช้ขนาดกว้างประมาณ ๑ เซ็นติเมตร ม้วนเป็นขด และมีเครื่อง

ม้วนเดิรด้วยกำลังฉานนาฬิกาสำหรับดึงคลายขดม้วนกระดาษให้เคลื่อนที่ผ่านใต้บ่อขังน้ำหมึกอยู่เสมอ เวลาคนส่งอาณัติสัญญาทางต้นทางกดสวิตช์ เครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าทางนี้ดูดแท่งเหล็กที่มีบ่อขังน้ำหมึกให้กันบ่อจดถึงแผ่นกระดาษ และขีดเส้นบนแผ่นกระดาษยาวบ้างสั้นบ้าง



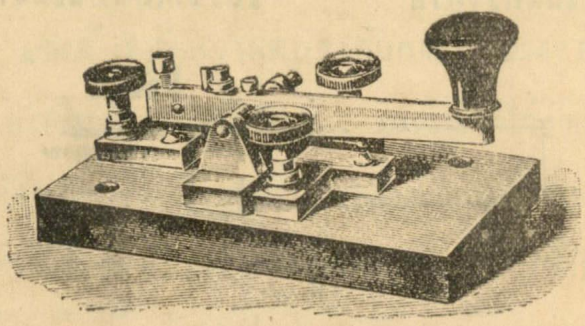
รูป ๑๐๐

สุดแต่คนส่งอาณัติสัญญาจะกดสวิตช์ให้ไฟฟ้าเดิรอยู่ช้าหรือเร็ว ถ้าช้ารอยหมึกบนแผ่นกระดาษจะเป็นขีดยาว ๆ ถ้าเร็วก็เป็นสั้น ๆ หรือเป็นจุด ตามวิธีนี้เราใช้เครื่องหมายจุด ๆ ขีด ๆ เป็นอาณัติสัญญาแทนตัวอักษรได้.

อาณัติสัญญาที่ใช้กันแพร่หลายในเวลานี้ใช้แบบมอร์ส (Morse code) ดังต่อไปนี้.–

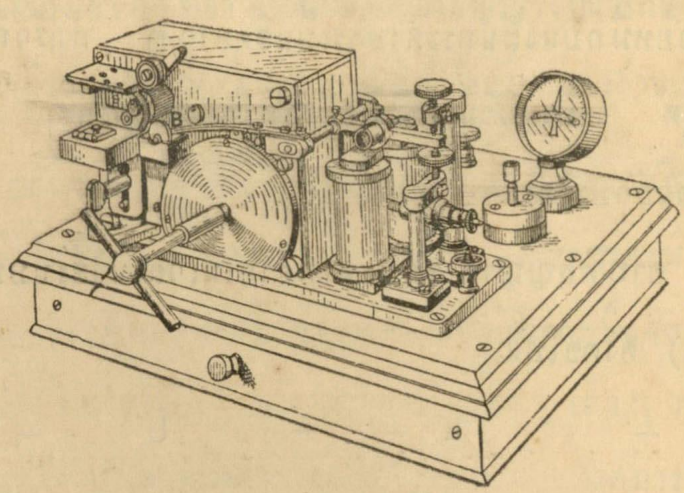
A . –	K – . –	U . . –
B – . . .	L . – . .	V . . . –
C – . – .	M – –	W . – –
D – . .	N – .	X – . . –
E .	O – – –	Y – . – –
F . . –	P . – – .	Z – – . .

G – – .	Q – – . –	full stop . . . . .
H	R . – .	comma . – – – – .
I . .	S . . .	interrogartion . . – – . .
J . – – –	T –	hyphen – . . . . –



เครื่องส่ง

รูป ๑๐๑

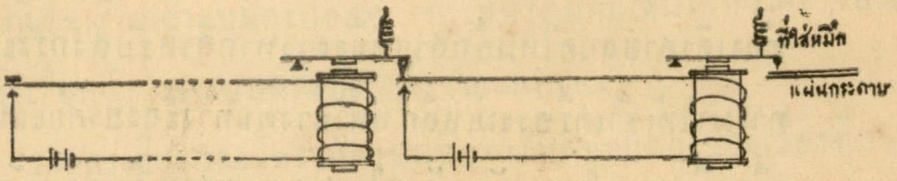


เครื่องรับ

รูป ๑๐๒

เวลาจะใช้โทรเลขเป็นระยะไกลเช่นระหว่างจังหวัดต่อจังหวัดต้องเดินสายลวดยาวมาก กำลังไฟจากหม้อต้องลดศักย์มาก เมื่อถึงปลายทางเหลือกำลังน้อย ไม่มีแรงช่วยแม่เหล็กไฟฟ้าดูดเครื่องเคาะกระดาษให้ดังทันใจ เมื่อเป็นเช่นนี้จึงมีผู้แก้ไขใช้เครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลายทางสองเครื่อง เครื่องที่หนึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ไฟฟ้า

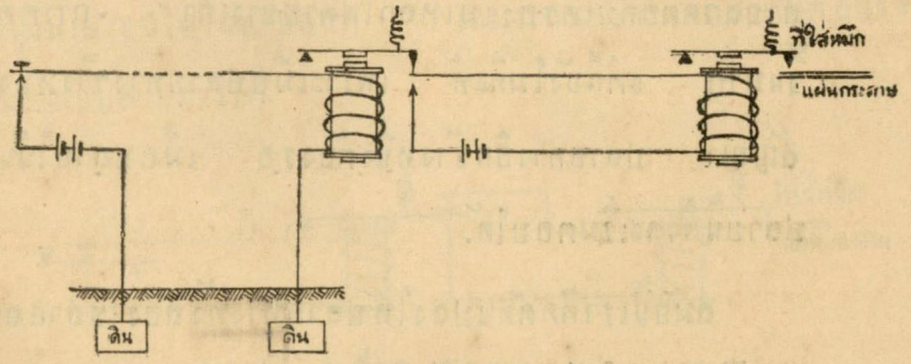
สำหรับบีดเบีดจากหม้อไฟที่ปลายทางให้เข้าเครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำเครื่องหมายบนแผ่นกระดาษ เครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าอันแรกที่ใช้เป็นสวิตช์มีชื่อเรียกว่า **เครื่องรีเลย์** (relay).



รูป ๑๐๓

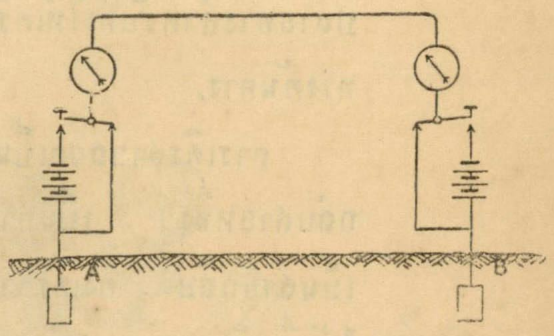
เมื่อคนจากต้นทางกดสวิตช์ ไฟจากหม้อไฟต้นทางเดินตามสายไปเข้าเครื่องรีเลย์ที่ปลายทาง เครื่องรีเลย์ต่อวงจรของหม้อไฟทางปลายทางสำหรับทำให้เครื่องเขียนทำงานเป็นจังหวะเดียวกับคนกดสวิตช์ทางต้นทาง.

การเดินสายลวดเป็นระยะไกล ๆ ถ้าเดินสายคู่ (ไปสายหนึ่งกลับสายหนึ่ง) เป็นการเปลืองโสหุ้ยมาก เรามักนิยมใช้แผ่นดินเป็นสายกลับ คงเดินสายลวดขาไปสายเดียวก็พอ และลดค่าเดินสายได้ครึ่งตัว ทางต้นทางต่อขั้วหนึ่งของหม้อไฟติดกับสายลวดที่เดินไปปลายทาง อีกขั้วหนึ่งของหม้อไฟเอาลวดต่อลงดินให้ถึงดินแฉะ ทางปลายทางเอาลวดที่เดินไปจากต้นทางต่อกับปลายหนึ่งของเครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าและเอาลวดต่อจากเครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าลงดินจนถึงดินแฉะ.



รูป ๑๐๔

การเดินสายลวดสายเดียวดังได้กล่าวมานี้ ความจริงยังไม่เป็นการประหยัดเต็มที่แท้ เพราะใช้ส่งอาณัติสัญญาจากต้นทางไปยังปลายทางได้อย่างเดียว ถ้าทางปลายทางจะส่งอาณัติสัญญาตอบมายังต้นทาง ต้องเดินสายลวดใหม่อีกสายหนึ่งต่างหากสำหรับส่งกระแสไฟฟ้าจากปลายทางมาให้เข้าเครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าทางต้นทางและอาศัยแผ่นดินเป็นสายกลับ เพื่อเป็นการประหยัดแท้เราใช้สายลวดสายเดียวกันนั่นเองสำหรับส่งอาณัติสัญญาทั้งขาไปและขากลับ ดูรูปต่อไปนี้จะได้ความเข้าใจได้ง่ายเข้า ปลายลวดแยกเป็นสองทางทั้งที่ปลายต้นทางและที่ปลาย ๆ ทาง เวลาไม่ใช้งาน ปลายสายลวดต่อกับเครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งที่ต้นทางและที่ปลายทาง เวลานี้ไม่มีกระแสไฟเดินตามเส้นลวด เมื่อปลายใดจะส่งอาณัติสัญญาก็กดสวิตช์ที่เข้าเครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าทางปลายนั้นเสียและต่อหม้อไฟฟ้าเข้ากับสายลวด กระแสไฟจะเดินไปที่ปลายทางอีกข้างหนึ่งทันที เมื่อเลิกใช้งานแล้วต่อสวิตช์ให้สายลวดต่อกับเครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างเก่า การต่อสายลวดวิธีนี้ดีขึ้นมาก แต่ก็ยังไม่ดีแท้ เพราะเมื่อปลายทางข้างหนึ่งกำลังส่งอาณัติสัญญา ปลายทางอีกข้างหนึ่งต้องรอ เมื่อปลายโน้นเลิกใช้สายแล้ว ปลายนี้จึงจะเริ่มตอบได้.



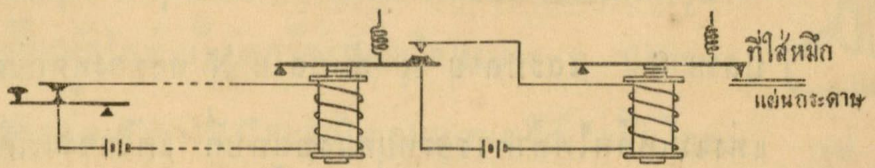
รูป ๑๐๕

สมัยนี้เราคิดดัดแปลงให้ปลายทางทั้งสองใช้สายลวดเส้นเดียวส่งอาณัติสัญญาโต้ตอบกันได้ วิธีนี้เรียกว่า โทรเลขแบบดูเปลคซ์ หรือ

แบบไดเปลคซ์ (duplex หรือ diplex) ถ้าจากปลายใดใช้เครื่องส่งสองเครื่องส่งอาณัติสัญญาพร้อมกันไปยังอีกปลายหนึ่งได้เรียกว่าแบบไดเปลคซ์ ถ้าเครื่องทางต้นทางและปลายทางส่งอาณัติสัญญาในเวลาเดียวกันได้เรียกว่าแบบดูเปลคซ์ ถ้าใช้พร้อมกันได้มากกว่าคราวละสองเครื่องเรียกว่า **แบบมุลติเปลคซ์** (multiplex).

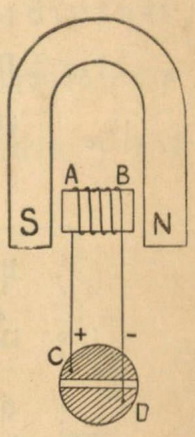
รายละเอียดของโทรเลขแบบพิสดารนี้อยู่นอกวงของเรื่องที่เราต้องการเรียนในตอนต้น ๆ เช่นนี้ โทรเลขไม่มีสายก็อยู่นอกวงเช่นเดียวกัน จึงของดไม่กล่าวถึง.

ในเรื่องโทรเลขมีวิธีปล่อยกระแสไฟต่างกันเป็นสองวิธี คือวิธียุโรปและวิธีอเมริกา วิธียุโรปเวลาสายไม่ทำงานไม่มีกระแสไฟ เมื่อถึงเวลาทำการส่งอาณัติสัญญาจึงปล่อยกระแสไฟ ส่วนวิธีอเมริกาเมื่อสายว่างมีกระแสไฟเดิรตามสายลวดอยู่เสมอ เรื่องต่างกันระหว่างสองวิธีนี้อยู่ที่จัดเครื่องรีเลย์ให้บีดเบีดไฟในทำตรงกันข้าม ตามวิธียุโรปเมื่อสายลวดไม่มีไฟ รีเลย์ทำให้วงจรของหม้อไฟปลายทางขาด ต้องรอให้มีไฟเดิรในสายลวดแม่เหล็กไฟฟ้าจึงดูดและต่อวงจรของหม้อไฟทางปลายทางให้ไฟเดิรได้ ตามวิธีอเมริกาเมื่อสายลวดมีไฟ เครื่องแม่เหล็กไฟฟ้าในรีเลย์ดูดเข็มรีเลย์ทำให้วงจรของหม้อไฟที่ปลายทางขาดจากกัน ถ้าไม่มีกระแสไฟในสายลวด เข็มรีเลย์จึงจะดีดกลับไปต่อวงจรของหม้อไฟที่ปลายทางได้.



รูป ๑๐๖

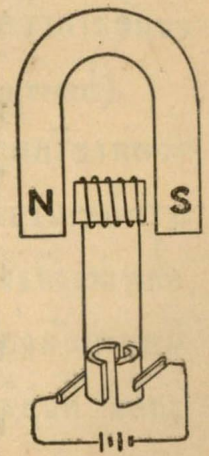
(๕) เครื่องมอเตอร์ไฟฟ้า เป็นเครื่องมือที่มีกำลังหมุนได้รอบตัวโดยอาศัยหลักที่จัดให้อำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าดูดกันผลักกันให้ได้จังหวะสลับกันไป เช่นเอาแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าวางให้หมุนได้รอบตัวตามแนวนอนระหว่างขั้วทั้งสองของแม่เหล็กรูปเกือกม้า และให้ปลายลวดที่ใช้พันแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าห้อยยานตรงลงมาถึงผิวปรอทในอ่าง ที่วางอยู่ภายใต้ อ่างปรอทแบ่งออกเป็นสองห้องโดยมีแผ่นฉนวนขั้น ปรอทในห้องทั้งสองนี้ต่อกับขั้วหม้อไฟฟ้า สมมุติว่าห้อง C ต่อกับขั้วบวก ห้อง D ต่อกับขั้วลบ ดังนี้เมื่อปลายลวดที่ห้อยลงมาจากแม่เหล็กไฟฟ้าหย่อนถึงผิวปรอท แม่เหล็กไฟฟ้าจะแสดงอำนาจแม่เหล็กได้ทันที ตามรูป ปลาย B ของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นปลายเหนือ ปลาย A เป็นปลายใต้ ดังนั้นจะเกิดแรงผลักกับปลายของแม่เหล็กรูปเกือกม้าทั้งสองแห่ง แท่งแม่เหล็กไฟฟ้าจะหมุนหนี และปลายลวดที่ผิวปรอทในอ่างจะหมุนวนตามไปด้วย เมื่อแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนไปได้ ๙๐ องศา ปลายเหนือ B ตั้งต้นดูดกับปลายใต้ S ของแม่เหล็กเกือกม้าได้ถึงกัน และปลายใต้ A ตั้งต้นดูดกับปลายเหนือ N ของแม่เหล็กเกือกม้าได้ถึงกัน แท่งแม่เหล็กไฟฟ้าคงหมุนต่อไปได้ถึง ๑๘๐ องศา เมื่อหมุนมาได้แค่นี้ ปลาย B กับปลาย S และปลาย A กับปลาย N ควรจะดูดกันแรงที่สุด และแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าควรจะหยุดนิ่งอยู่กับที่ แต่ในขณะเดียวกันนั้น ปลายลวดที่ห้อยลงมาจากแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าข้ามฉนวนที่กั้นปรอทไปอยู่ใน



รูป ๑๐๗

อ่างใหม่ ปลายลวดที่ห้อยลงมาจาก A ข้ามไปอยู่ในอ่าง D และปลายลวดที่ห้อยลงมาจาก B ข้ามไปอยู่ในอ่าง C กระแสไฟที่เดินในลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเดินกลับทางทันที ปลาย B เปลี่ยนอำนาจเป็นปลายใต้ ปลาย A เปลี่ยนอำนาจเป็นปลายเหนือ A เกิดผลักกับ N B เกิดผลักกับ S แท่งแม่เหล็กไฟฟ้าต้องหมุนต่อไป พอหมุนไปได้ ๒๗๐ องศา ปลาย B ตั้งต้นดูดกับปลาย N ได้ถึงกัน และปลาย A ตั้งต้นดูดกับปลาย S ได้ถึงกัน แท่งแม่เหล็กไฟฟ้าจึงหมุนต่อไปจนครบ ๓๖๐ องศา และพอครบ ๓๖๐ องศา ลวดที่ห้อยลงมาจากแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าข้ามฉนวนกั้นอ่างปรอทไปอยู่ในอ่างใหม่กันอีก กระแสไฟในลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางกลับ ปลาย A ปลาย B เปลี่ยนอำนาจแม่เหล็ก แท่งแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนเรื่อยไปรอบ ๆ เกิดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า.

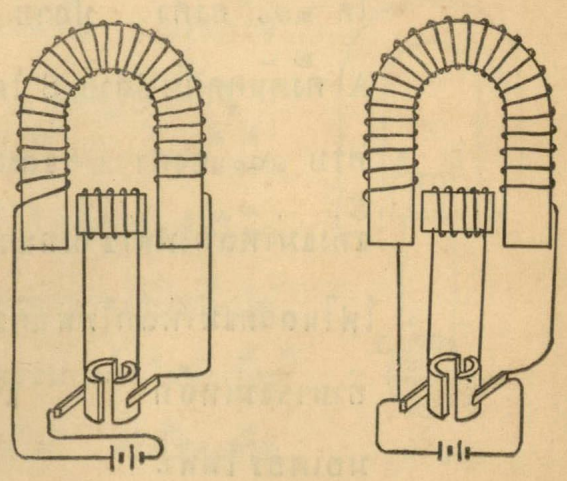
การใช้อ่างปรอทเป็นเครื่องสำหรับบังคับให้กระแสไฟกลับทางเดิน (คอมมูเตเตอร์) ไม่สะดวกและเร่อร่า ต่อมาเราใช้แผ่นโลหะสองอันโค้งเป็นส่วนของวงกลมประกบรอบแกนสำหรับหมุนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าและใช้แผ่นโลหะเป็นคอมมูเตเตอร์ แผ่นโลหะติดอยู่รอบแกนได้ด้วยครั่งหรือวัตถุอื่นที่เป็นฉนวนอย่างดี ส่วนปลายลวดที่ต่อมาจากขั้วหม้อไฟฟ้านั้นบัดกรีกับแผ่นโลหะบาง ๆ ปลายละแผ่นสำหรับเอาวางประกับแผ่นคอมมูเตเตอร์ แผ่นโลหะที่ใช้วางทับคอมมูเตเตอร์มักเรียกกันว่า **แปรง** (brush).



รูป ๑๐๘

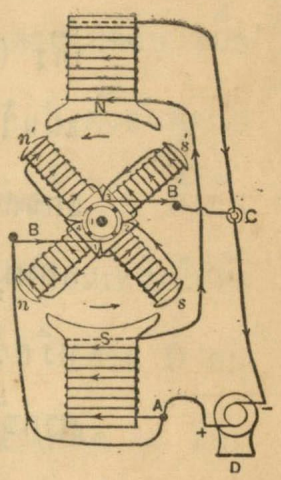
คอมมูเตเตอร์หมุนไปกับแกนด้วยกัน ส่วนแปรงอยู่กับที่ เมื่อแกนหมุนไปได้ ๑๘๐ องศา หัวแปรงหลุดจากมุมคอมมูเตเตอร์อันที่เคยเกยอยู่ และหลุดมาเกยอันใหม่ กระแสไฟในลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนทางเดิรทุก ๆ ๑๘๐ องศา แม่เหล็กไฟฟ้าที่หมุนรอบ ๆ ตัวระหว่างแม่เหล็กเกือกม้ามักเรียกกันว่า **มัดเข้าต้ม** หรือ **อาร์มาเจอร์** (armature).

เครื่องมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้กันโดยมากมักไม่ใช่แม่เหล็ก และใช้แม่เหล็กไฟฟ้าแทน แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้แทนแม่เหล็กมักเรียกกันว่า **ขดสนาม** (field coil).



รูป ๑๐๙

มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีอาร์มาเจอร์เพียง ๒ ปลาย หรือ ๒ แฉกเท่านั้น หมุนได้เพียงเป็นเครื่องเล่น หมุนไม่เรียบเพราะได้แรงหมุนเต็มที่ชั่วขณะที่ปลายอาร์มาเจอร์อยู่ตรงกับขดสนาม แล้วต้องรออีก ๑๘๐ องศาจึงจะได้แรงเพิ่มครั้งหนึ่ง ถ้าจะให้หมุนได้แรงสม่ำเสมอและหมุนเรียบ อาร์มาเจอร์ต้องมีมากแฉกจึงจะดี ถ้าสามแฉกได้แรงเพิ่มทุก ๑๒๐ องศา สี่แฉกได้แรงเพิ่มทุก ๙๐ องศา หกแฉกทุก ๖๐ องศา ฯ ลฯ



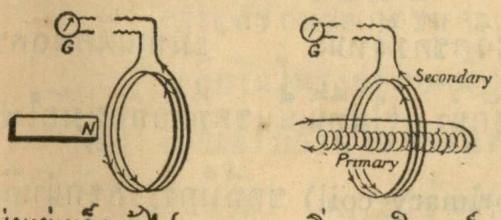
รูป ๑๑๐

เวลาต่อไฟจากหม้อไปที่ขั้วมอเตอร์ไม่ว่าจะต่ออย่างไร มอเตอร์หมุนทางเดียวกันเสมอ ลองไล่ทางเดินของกระแสไฟและอำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในเส้นลวดมอเตอร์สามแฉกหรือสี่แฉกจะเข้าใจได้ง่ายขึ้น ถ้าจะให้มอเตอร์หมุนกลับต้องกลับกระแสในขดลวด จงคิดดูให้เข้าใจ.

เครื่องขับรถรางมีคันสำหรับหมุนเบ็ดเครื่องสองอัน อันใหญ่ตรงกลางคือสะวิตช์สำหรับตัดความต้านทานออกให้เหลือน้อยเข้า อันเล็กทำหน้าที่เป็นสะวิตช์สำหรับเปลี่ยนทางเดินของกระแสในขดลวด อันใหญ่ตรงกลางเมื่อหันมาถึงขีดที่หนึ่งนั้นแปลว่า เบ็ดสะวิตช์ให้ไฟเดินได้ แต่ไฟยังต้องผ่านความต้านทานทุกขด พอหันมาถึงขีดที่สองย่นทางเดินกระแสข้ามพ้นความต้านทานขดหนึ่ง ขีดที่สามย่นกระแสข้ามพ้นความต้านทานสองขด ขีดที่สุดกระแสไฟเข้าเครื่องมอเตอร์โดยตรงไม่ต้องผ่านความต้านทานเลย.

๕๒. การชักนำแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic induction) เวลากระแสไฟวิ่งในเส้นลวดย่อมเกิดอำนาจแม่เหล็กพุ่งออกมาจากเส้นลวด ในทำนองเดียวกัน เมื่อเอาอำนาจแม่เหล็กพุ่งเข้าไปหาเส้นลวดหรือเอาเส้นลวดพานเส้นอำนาจแม่เหล็กจะเกิดอำนาจไฟฟ้าในเส้นลวด การที่ทำให้เกิดอำนาจไฟฟ้าเช่นนี้เรียกว่าการชักนำแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า **กระแสชักนำ** (induced current).

เรื่องนี้มีขีดลองให้เห็นจริงได้ โดยใช้เส้นลวดที่ปลายทั้งสองต่อกับเครื่องกัลวานอมิเตอร์อยู่แล้ว เอาไปพานหรือตัดเส้นอำนาจแม่เหล็กระหว่างปลายแม่เหล็กรูปเกือกม้า หรือมิฉะนั้นก็ลองพุ่งแท่งแม่เหล็กเข้าไปในโพรงขดลวดซึ่งต่อกับเครื่องกัลวานอมิเตอร์ เข็มกัลวานอมิเตอร์จะเคลื่อนที่แสดงว่ามีกระแสไฟเกิดขึ้นในลวด และกระแสชักนำที่เกิดขึ้นนี้มีอยู่ชั่วขณะที่กำลังพุ่งแท่งแม่เหล็ก



พุ่งแม่เหล็กเข้าไป เพิ่มกระแสในขดเล็ก

รูป ๑๑๑

เท่านั้น จะพุ่งแท่งแม่เหล็กเข้าไปในโพรงก็ได้หรือจะกระชากแท่งแม่เหล็กออกมาจากโพรงก็ได้ ข้อสำคัญอยู่ที่ต้องทำให้แมกเนติคฟลักซ์ในเส้นลวดหรือในขดลวดเปลี่ยนแปลง เมื่อแมกเนติคฟลักซ์ในขดลวดเพิ่มขึ้นก็เกิดกระแสชักนำ และเมื่อลดน้อยลงก็เกิดกระแสชักนำ.

การที่จะทำให้เกิดกระแสชักนำนั้นทำได้หลายวิธี แต่คงอาศัยหลักอันเดียวกันหมด คือทำให้แมกเนติคฟลักซ์เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ.

ก. (๑) วางขดลวดอยู่กับที่ แล้วรุนแท่งแม่เหล็กเข้าไปหาหรือรุนถอยออกมา.

(๒) วางแท่งแม่เหล็กอยู่กับที่ แล้วรุนขดลวดเข้ามาหา หรือรุนถอยออกไป.

ข. แทนใช้แท่งแม่เหล็ก ใช้ลวดไฟฟ้าพันรอบแท่งเหล็กให้เป็นแม่เหล็ก แล้วทำอย่างข้อ ก.

ค. เอาขดลวด ๒ ขดวางอยู่ใกล้ ๆ กัน วางเคียงกัน ทับกันซ้อนกัน หรือสวมกันใช้ได้ทั้งนั้น ขดหนึ่งต่อกับเครื่องกัลวานอมิเตอร์ อีกขดหนึ่งต่อกับหม้อไฟฟ้าและคอยบีดเบิดสะวิตช์ให้ไฟเดรในขดลวดเป็นพัก ๆ จะเกิดกระแสชักนำในขดลวดที่ต่อกับเครื่องกัลวานอมิเตอร์ เพราะเมื่อเบิดสะวิตช์ครั้งหนึ่งบีดสะวิตช์ครั้งหนึ่ง แมกเนติคฟลักซ์เปลี่ยนแปลงครั้งหนึ่ง ขดที่ใช้ชักนำ (ในที่นี้เป็นขดที่ต่อกับหม้อไฟ) เรียกว่า **ขดที่หนึ่งหรือขดขั้นเอก** (primary coil) ขดที่มีกระแสชักนำเกิดขึ้น (ในที่นี้ขดที่ต่อกับกัลวานอมิเตอร์) เรียกว่า **ขดที่สองหรือขดขั้นโท** (secondary coil).

กฎของเลนซ์ (Lenz's law) เลนซ์เป็นผู้วางกฎสำหรับสังเกตทางเดิรของกระแสชักนำ มีใจความว่า 'เมื่อมีกระแสไฟที่ใช้ชักนำให้เกิดกระแสชักนำ กระแสชักนำที่เกิดขึ้นจะไหลตามทางที่เกิดผลอำนาจแม่เหล็กขัดกับกระแสเดิม'

จะเข้าใจความหมายของกฎนี้ชัดเจน ต้องพยายามจับหลักความจริงของเรื่องกระแสชักนำให้ได้ ฟังแต่ตัวอักษรคำพูดเข้าใจยาก เรื่องนี้คล้าย ๆ กับ **ความเฉื่อย** (inertia) ซึ่งเกิดแรงโต้ตรงกันข้าม เวลาเราผลักก้อนวัตถุ เรารู้สึกมือของเราถูกดันถอยหลัง เวลาเราดึงก้อนวัตถุ เรารู้สึกมือของเราถูกเหนี่ยวไปอีกทางหนึ่ง.

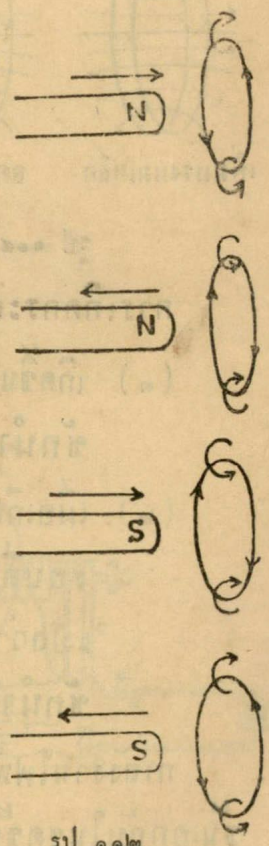
หลักสังเกตทางเดิรของกระแสชักนำ เมื่อพูดคล้อยตามกฎของเลนซ์ แต่พูดให้เข้าใจง่ายขึ้น ควแยกออกได้เป็น ๔ หัวข้อดังนี้.

(๑) **เมื่อเอาปลายเหนือของแท่งแม่เหล็กพุ่งเข้าไปในขดลวด** กระแสชักนำที่เกิดขึ้นจะเป็นชะนิดที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในโพรงขดลวดมีปลายเหนือพุ่งออกมารับ.

(๒) **เมื่อเอาปลายลวดเหนือของแท่งแม่เหล็กกะชากออกมาจากขดลวด** กระแสชักนำที่เกิดขึ้นจะเป็นชะนิดที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในโพรงขดลวดมีปลายเหนือพุ่งหนีออกไปทางตรงกันข้าม.

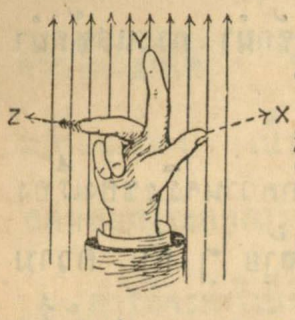
(๓) **เมื่อเอาปลายใต้ของแท่งแม่เหล็กพุ่งเข้าไปในขดลวด** กระแสชักนำที่เกิดขึ้นจะเป็นชะนิดที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในโพรงขดลวดมีปลายใต้พุ่งออกมารับ.

(๔) **เมื่อเอาปลายใต้ของแท่งแม่เหล็กกะชากออกมาจากขดลวด** กระแสชักนำที่เกิดขึ้นจะเป็นชะนิดที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในโพรงขดลวดมีปลายใต้พุ่งหนีออกไปทางตรงกันข้าม.



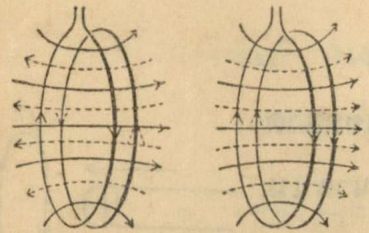
รูป ๑๑๒

บัญญัติมือขวาของเฟลมิง (Fleming's right hand rule) เป็นบัญญัติใช้สังเกตทางเดินของกระแสชักนำที่เกิดขึ้น มีใจความดังนี้ 'แบมือขวาให้ตรง กางหัวแม่มือออกจนตั้งฉากกับนิ้วชี้ ยกนิ้วกลางตั้งขึ้นจนตั้งได้ฉากกับฝ่ามือ ถ้านิ้วชี้แสดงเส้นอำนาจแม่เหล็ก หัวแม่มือแสดงทางที่เลื่อนขดลวดหรือเส้นลวด นิ้วกลางจะแสดงทางที่เกิดกระแสชักนำ'



รูป ๑๑๓

ถ้าเป็นขดลวด ๒ ขดมีกระแสชักนำกันได้ เวลาแมกเนติคฟลักซ์ในขดขั้นเอกกำลังทวีขึ้นหรือกำลังเบียดสวิตช์ กระแสชักนำในขดขั้นโทจะไหลคนละทิศกับกระแสในขดขั้นเอก.



รูป ๑๑๔

เวลาแมกเนติคฟลักซ์ในขดขั้นเอกกำลังลดลงหรือกำลังบีดสวิตช์ กระแสชักนำในขดขั้นโทจะไหลในทิศเดียวกันกับกระแสในขดขั้นเอก.

การเกิดกระแสชักนำเราแบ่งออกเป็น ๒ วิธี.

(๑) เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสในขดขั้นเอกชักนำโดยตรง เราเรียกว่า **การชักนำระหว่างขด** (mutual induction).

(๒) เมื่อเกิดกระแสชักนำในขดขั้นโทแล้ว กระแสชักนำย่อมชักนำวงลวดรอบที่สอง แล้วรอบที่สาม ที่สี่ ฯ ล ฯ ในขดขั้นโทกันนั่นเองได้อีก แปลว่าในขดขั้นโทเกิดการชักนำกันเอง การชักนำเช่นนี้ เราเรียกว่า **การชักนำในขดเอง** (self induction).

กำลังงานไฟฟ้าในขดขั้นเอกกับขดขั้นโทย่อมเท่ากันเสมอ คือจำนวนวัตต์ในขดขั้นเอกกับในขดขั้นโทย่อมเท่ากัน.

วอลต์ในขดขั้นเอกเทียบกับวอลต์ในขดขั้นโท ได้อัตราส่วนตามจำนวนรอบของเส้นลวดในขดขั้นเอกเทียบกับจำนวนรอบของเส้นลวดในขดขั้นโท.

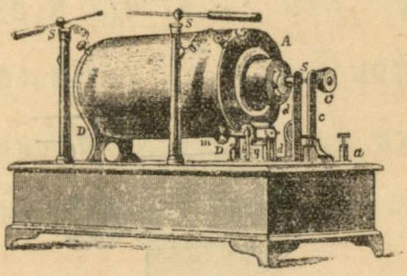
แอมแปร์ในขดขั้นเอกเทียบกับแอมแปร์ในขดขั้นโทได้อัตราส่วนตรงกันข้ามกับจำนวนรอบของเส้นลวดในขดขั้นเอกเทียบกับจำนวนรอบของเส้นลวดในขดขั้นโท.

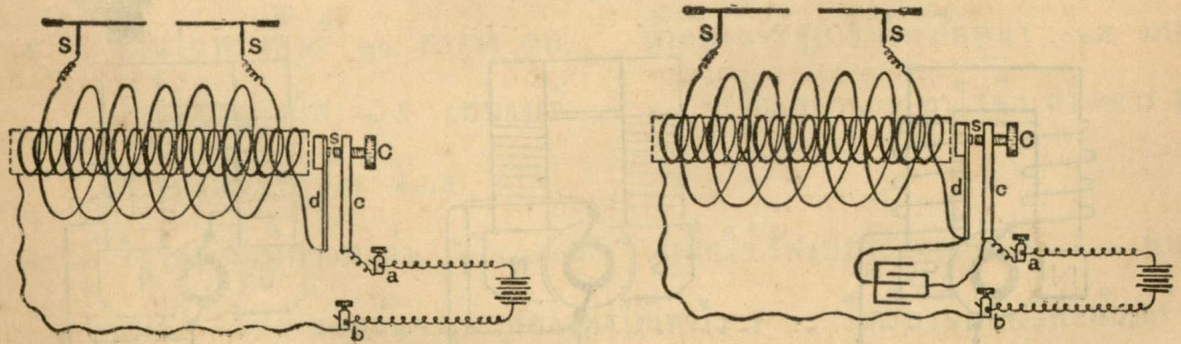
ตัวอย่าง.— ขดขั้นเอกมี ๒๐ รอบ ขดขั้นโทมี ๒๐,๐๐๐ รอบ วอลต์ในขดขั้นโทจะเป็น ๑๐๐๐ เท่าของวอลต์ในขดขั้นเอก และแอมแปร์ในขดขั้นเอกจะเป็น ๑๐๐๐ เท่าของแอมแปร์ในขดขั้นโท.

ถ้าขดขั้นเอกใช้ไฟ ๖ วอลต์ ๒ แอมแปร์ ขดขั้นโทจะได้ไฟ ๖๐๐๐ วอลต์ กับ .๐๐๒ แอมแปร์ แต่จำนวนวัตต์ในขดทั้งสองคงเท่ากัน คือวงมีขดละ ๑๒ วัตต์.

๕๓. ประโยชน์ของการชักนำแม่เหล็กไฟฟ้า.

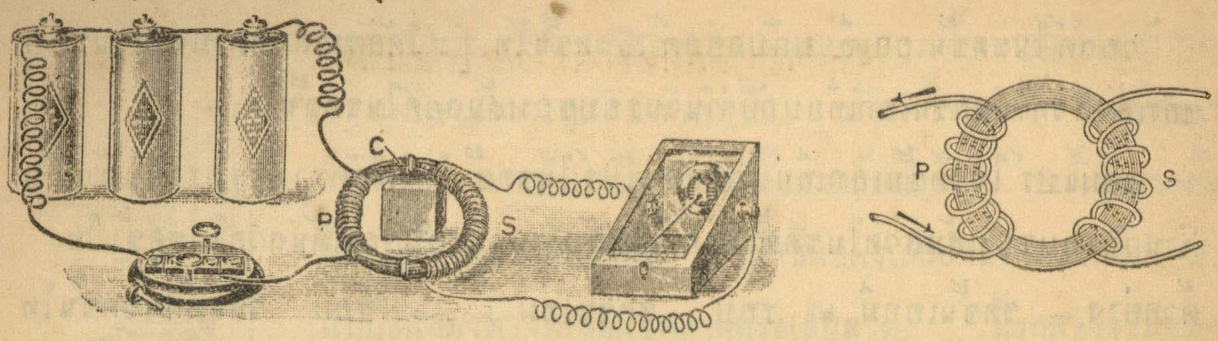
(๑) ขดชักนำ (induction coil)





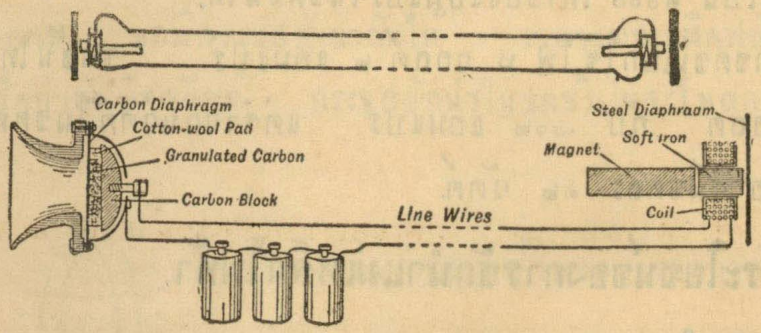
รูป ๑๑๕

(๒) หม้อแปลง (transformer)



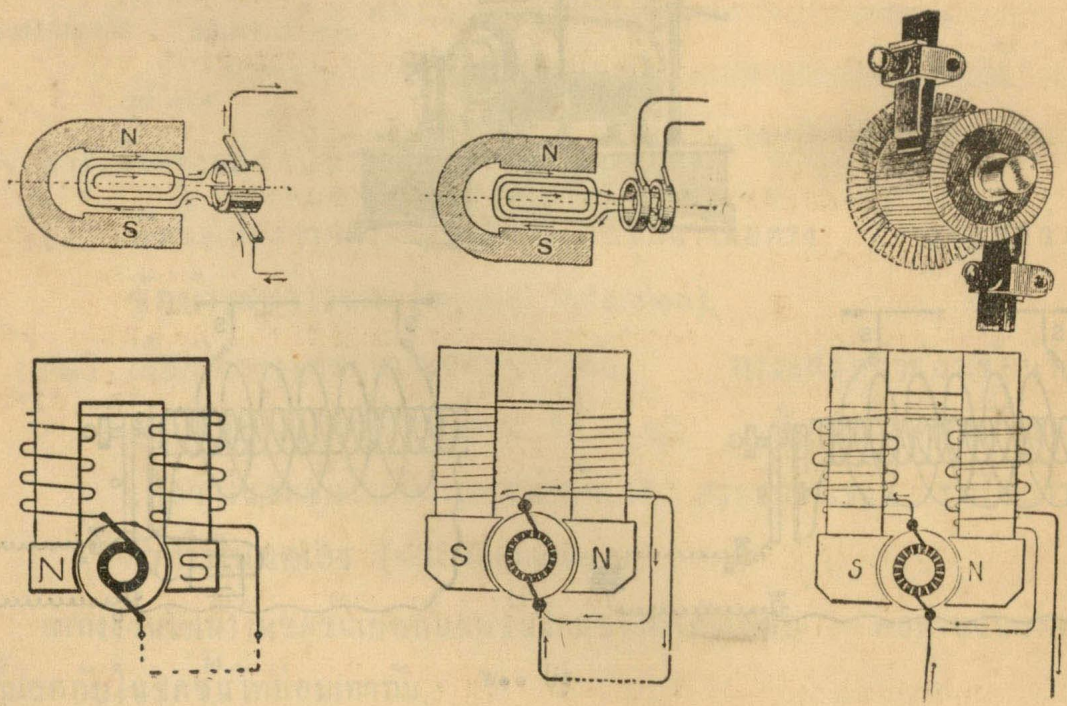
รูป ๑๑๖

(๓) เครื่องโทรศัพท์ (telephone)



รูป ๑๑๗

(๔) เครื่องไดนะโมทำไฟฟ้า (dynamo)



รูป ๑๑๘

โจทย์แบบฝึกหัดอีเลคโตรไดแนมิคส์

ค่าสมมูลย์ไฟฟ้าเคมี

ไฮโดรเจน .๐๐๐๐๑๐๓๙.

ทองแดง .๐๐๐๓๒๙.

สังกะสี .๐๐๐๓๓๗.

เงิน .๐๐๓๑๑๙.

๑. กระแสไฟ $\frac{๑}{๕}$ แอมแปร์จะแยกเนื้อทองแดงออกจากน้ำยาในเวลา ๒๕ นาฑีได้เท่าไร ?

๒. ถ้าจะให้กระแส .๖ แอมแปร์แยกเนื้อเงินออกจากน้ำยาได้ ๑ กรัม จะกินเวลานานเท่าไร ?

๓. ต่อไฟให้กระแสผ่านวอลแตมิเตอร์สำหรับแยกน้ำและวอลแตมิเตอร์สำหรับแยกทองแดง เมื่อปล่อยให้ไฟเดินได้ ๑๐ นาฑี แยกไฮโดรเจนได้ .๐๐๘ กรัม ให้คำนวณจำนวนทองแดงที่แยกได้ และคำนวณกระแสไฟที่ใช้.

๔. เมื่อเอาหม้อแบบแดเนี่ยลด์มาต่อไฟใช้ได้ ๑๒ นาฑี แท่งสังกะสีกร่อนไป .๑ กรัม ดังนี้จะมีทองแดงเกาะเพิ่มที่ข้างกะป๋องเท่าไร และหม้อนั้นปล่อยกระแสไฟเท่าไร ?

๕. แผ่นโลหะมีพื้นที่ ๒๐ ตาราง ซม. ถ้าต้องการชุบเงินให้ดิดหนา .๐๒๕ มม. โดยใช้กระแสไฟ ๑.๕ แอมแปร์ จะกินเวลานานเท่าไรจึงเสร็จการ ? ความแน่นของเงิน ๑๐.๕.

๖. ไฮโดรเจนมีความแน่น .๐๐๐๐๘๙๖ เมื่อใช้ไฟแยกไฮโดรเจนได้ ๑๐๐ ลบ. ซม. ไฟจำนวนนั้นจะแยกทองแดงได้เท่าไร ? ในเรื่องนี้ถ้าจะให้แล้วเสร็จในเวลา ๒๕ นาฑี จะต้องใช้กระแสเท่าไร ?

๗. ปล่อยกระแสไฟให้ผ่านวอลแตมิเตอร์สำหรับแยกทองแดงและแยกเงิน ถ้าแยกทองแดงได้ .๑ กรัม จะแยกเงินได้เท่าไร ?

๘. กระแสไฟ .๕ แอมแปร์ปล่อยให้ไหลผ่านน้ำยาทองแดงซัลเฟตกับน้ำยาเงินไนเตรต ชั่วเวลา ๒๐ นาที จะแยกทองแดงและเงินได้อย่างละเท่าไร ?

๙. น้ำหนักปรมาณูของ ออกซิเจน เงิน และไนโตรเจน เท่ากับ ๑๖, ๑๐๘, และ ๑๔ เมื่อปล่อยกระแสไฟให้ผ่านน้ำยาทองแดงกับน้ำยาเงินไนเตรต แยกทองแดงได้ .๑๔ กรัม ดังนี้เงินไนเตรตจะถูกแยกด้วยเท่าไร ?

๑๐. มีกระแสไฟผ่านวอลแตมิเตอร์สำหรับแยกทองแดงและผ่านแคนเจนต์กัลวานอมิเตอร์อยู่ชั่วเวลา ๑๕ นาที แยกทองแดงได้ .๑๕ กรัม และเข็มกัลวานอมิเตอร์หัน ๔๕° ถ้าความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลกเท่ากับ .๑๘ เกาส์ รีดักชันแฟคเตอร์ของกัลวานอมิเตอร์จะเป็นเท่าไร ?

๑๑. มีกระแสไฟผ่านวอลแตมิเตอร์สำหรับแยกทองแดงและผ่านแคนเจนต์กัลวานอมิเตอร์อยู่ชั่วเวลาพอควร แยกทองแดงได้นาทีละ .๐๑ กรัม เข็มกัลวานอมิเตอร์หัน ๓๑° ถ้ากัลวานอมิเตอร์นั้นมีรีดักชันแฟคเตอร์ .๘๔๗ ความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลกตรงนั้นเป็นเท่าไร ? (แทน ๓๑° = .๖).

๑๒. กัลวานอมิเตอร์มีลวด ๕๐ ขด รัศมี ๗ ซม. จะมีค่านิจ (กัลวานอมิเตอร์คอนสแตนต์) เท่าไร ?

๑๓. กัลวานอมิเตอร์มีลวด ๒๐ ขดลวด รัศมี ๑๐ ซม. กัลวานอมิเตอร์นั้นจะมีค่านิจ (กัลวานอมิเตอร์คอนสแตนต์) เท่าไร ?

๑๔. กัลวานอมิเตอร์ ๕๐๐ ขดลวด รัศมี ๑๕ ซม. ต้องการกระแสไฟเท่าไรเข็มจึงจะหัน ๔๕° ? ความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลก .๑๘.

๑๕. กระแส .๒๕ แอมแปร์ทำให้เข็มกัลวานอมิเตอร์หัน ๓๐° ณ ที่ที่มีความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลก .๑๘ ถ้าเอาไปวางที่ความเข้มของแรงแม่เหล็กของโลกเท่ากับ .๒๒ เข็มกัลวานอมิเตอร์จะหันเท่าไร ?

๑๖. กระแสไฟผ่านวอลแตมิเตอร์ทองแดงกับแตนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ซึ่งเรียงเป็นอันดับ กัลวานอมิเตอร์มีลวด ๑๐ ขด รัศมี ๘ ซม. เข็มหัน ๔๕° ให้คำนวณจำนวนทองแดงที่แยกออกจากน้ำยาในเวลาครึ่งชั่วโมง.

๑๗. กัลวานอมิเตอร์มีลวด ๑๕ ขด รัศมี ๓๐ ซม. เมื่อปล่อยไฟให้เข็มหัน ๒๗° ไฟผ่านกัลวานอมิเตอร์นาฬิกากี่คูลอมบ์? (แทน ๒๗° = .๕๑).

๑๘. หม้อไฟฟ้ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ๑.๑ วอลต์ ความต้านทานภายใน ๑.๔ โอห์ม เมื่อเอาลวดมีความต้านทาน ๒ โอห์มมาต่อ จะได้กระแสไฟเท่าไร ?

๑๙. หม้อไฟฟ้ามีความต้านทานภายใน .๕ โอห์มสามารถส่งกระแสผ่านลวด๒.๕โอห์มได้ .๕ แอมแปร์ หม้อนั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าไร ?

๒๐. หม้อไฟ ๑๒ วอลต์ ความต้านทานภายใน ๕ โอห์ม เมื่อเอาลวดมาต่อใช้ไฟได้กระแส ๒ แอมแปร์ ลวดนั้นมีความต้านทานเท่าไร ?

๒๑. แบตเตอรี่ ๕๐ วอลต์ ความต้านทานภายใน ๑๐๐ โอห์ม จะส่งกระแสผ่านหลอดไฟมีความต้านทาน ๓๐๐ โอห์มได้กี่แอมแปร์ ?

๒๒. กระแสไฟไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์และความต้านทาน ๑๐ โอห์ม เรียงกันเป็นอันดับ กัลวานอมิเตอร์มีรีดัคชันแฟคเตอร์ .๕ เข็มหัน ๔๕° ถ้าความต้านทานภายในของหม้อไฟน้อยมากจนไม่ต้องเอามาคิดด้วย หม้อไฟนั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าไร ?

๒๓. หลอดไฟความต้านทาน ๑๐๐ โอห์ม ได้รับกระแส ๑.๑ แอมแปร์ ให้คำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าของไดนะโมที่จุดหลอดนั้น ?

๒๔. หม้อไฟ ๑.๘ วอลต์ ความต้านทานภายใน .๕ โอห์ม เมื่อเอาลวด ๔ โอห์มมาต่อให้ไฟเดิร ความต่างศักย์ที่ขั้วหม้อจะเป็นเท่าไร ?

๒๕. กระแสไฟ .๒๕ แอมแปร์ ไหลผ่านเส้นลวด ๓ โอห์มกับ ๕ โอห์มเรียงกันเป็นอันดับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้นั้นเท่าไร ? ความต่างศักย์ระหว่างปลายลวดเส้นละเท่าไร ?

๒๖. แบตเตอรี่มี ๔ หม้อ หม้อละ ๑.๑ วอลต์ความต้านทานภายใน ๓ โอห์ม เมื่อเอาลวด ๘ โอห์มมาต่อจะได้กระแสไฟเท่าไร ?

๒๗. ถ้าจะส่งกระแสไฟผ่านความต้านทาน ๑๖ โอห์มให้ได้ ๑ แอมแปร์ จะต้องใช้หม้อไฟ ๑.๔ วอลต์ ความต้านทาน .๕ โอห์มกี่หม้อ ?

๒๘. หม้อไฟมีความต้านทาน .๕ โอห์มส่งกระแสผ่านลวด ๕ โอห์มได้ .๒๕ แอมแปร์ หม้อนั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าไร ? และขณะที่ต่อไฟใช้ความต่างศักย์ที่ขั้วหม้อเป็นเท่าไร ?

๒๙. หม้อไฟเกือบไม่มีความต้านทานภายในเลยเลย เมื่อเอาต่อกับกัลวานอมิเตอร์และความต้านทาน ๑๐ โอห์ม เข็มหัน ๔๕° ครั้นเพิ่มความต้านทานเป็น ๕๐ โอห์ม เข็มหัน ๒๐° กัลวานอมิเตอร์นั้นมีความต้านทานเท่าไร (แทน ๒๐° = .๓๖).

๓๐. วงจรประกอบด้วยหม้อไฟ แดนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ และหีบต้านทาน เมื่อตั้งความต้านทาน ๕๑๒ โอห์ม เข็มหัน ๓๐° และเมื่อลดความต้านทานเหลือ ๒๕๖ โอห์ม เข็มหัน ๔๕° แดนเจนต์กัลวานอมิเตอร์นั้นมีความต้านทานเท่าไร ?

๓๑. กระแสไฟจากหม้อไฟซึ่งมีความต้านทาน ๒ โอห์มไหลผ่านแดนเจนต์กัลวานอมิเตอร์มีความต้านทาน ๕ โอห์ม และความต้านทานพิเศษที่ต่อเป็นอันดับอีก ๑๐

โอห์ม ถามว่าต้องเพิ่มความต้านทานพิเศษเป็นเท่าไร กระแสในแตนเจนกัลวานอมิเตอร์จึงจะเหลือเพียงครึ่งเดียว?

๓๒. หม้อไฟเมื่อต่อกับกัลวานอมิเตอร์ความต้านทาน ๒๐ โอห์ม เข็มหัน ๖๐° เมื่อเอาความต้านทานเติมเข้าไปในวงจรอีก ๑๘ โอห์ม เข็มหัน ๔๕° กัลวานอมิเตอร์มีความต้านทานเท่าไร?

๓๓. วงจรประกอบด้วยหม้อไฟ กัลวานอมิเตอร์ และหีบต้านทาน เข็มหัน ๔๕° เมื่อเพิ่มความต้านทานเข้าอีก ๓๐ โอห์ม เข็มหัน ๓๑° ให้หาคาบต้านทานของวงจรคราวแรกทั้งหมด (แทน ๓๑° = .๖).

๓๔. ลวด ๖ โอห์มกับ ๘ โอห์ม เมื่อต่อเป็นอันดับกับเป็นขนาน จะมีความต้านทานเท่าไร?

๓๕. ลวดคู่หนึ่ง เมื่อต่อเป็นอันดับมีความต้านทาน ๑๒ โอห์ม เมื่อต่อเป็นขนานมีความต้านทาน ๒ $\frac{๒}{๓}$ โอห์ม ลวดคู่นั้นมีความต้านทานเส้นละเท่าไร?

๓๖. หม้อไฟ ๑.๑ วอลต์ความต้านทานภายใน ๑.๕ โอห์ม ถ้าเอาลวด ๒ โอห์มกับ ๓ โอห์มเรียงเป็นอันดับมาต่อไฟใช้จะได้กระแสเท่าไร? ถ้าเอาลวดนั้นเรียงเป็นขนานมาต่อไฟใช้ จะได้กระแสเส้นละเท่าไร?

๓๗. หม้อไฟ ๑.๕ วอลต์ความต้านทานภายใน .๕ โอห์ม เมื่อเอาลวด ๑, ๒ และ ๓ โอห์มเรียงเป็นขนานมาต่อไฟใช้ ไฟจะออกจากหม้อเท่าไร?

๓๘. หม้อไฟเมื่อเอาลวด ๒ โอห์มกับ ๓ โอห์มเรียงกันเป็นอันดับมาต่อใช้มีไฟออกจากหม้อ .๒๕ แอมแปร์ และเมื่อเอาลวดเรียงกันเป็นขนานต่อมาไฟใช้มีไฟออกจากหม้อ .๕ แอมแปร์ หม้อไฟนั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความต้านทานภายในเท่าไร?

๓๙. หม้อ ๑๐ หม้อ ๆ ละ ๑.๕ วอลต์ ความต้านทานภายในหม้อละ .๕ โอห์ม เมื่อเอาลวด ๘ โอห์มมาต่อไฟใช้ จะได้กระแสเท่าไร (๑) เรียงหม้อเป็นอันดับ (๒) เรียงหม้อเป็นขนาน (๓) เรียงหม้อเป็นขนาน ๒ ตับ และเรียงเป็นอันดับตับละ ๕ หม้อ.

๔๐. หม้อไฟ ๑.๕ วอลต์ ความต้านทานภายใน .๒๕ โอห์ม เอาลวด ๑, ๒ โอห์มเรียงเป็นขนานมาต่อ กระแสไฟจะออกจากหม้อเท่าไร ? ไหลตามเส้นลวดเส้นละเท่าไร ?

๔๑. จะต้องใช้หม้อไฟ ๑.๐๘ วอลต์ความต้านทาน ๒ โอห์มเรียงเป็นอันดับกี่หม้อ จึงจะส่งกระแสผ่านความต้านทานภายนอก ๒๔ โอห์มได้ .๒๕ แอมแปร์?

๔๒. ขดลวดมีความต้านทาน ๑๐.๐๕ โอห์มจะต้องการขดลวดอื่นมีความต้านทานเท่าไร เมื่อเอาต่อเป็นขนานจึงจะได้ความต้านทานรวม ๑๐ โอห์มพอดี ?

๔๓. กัลวานอมิเตอร์มีความต้านทาน ๕๔ โอห์มต้องการความต้านทานอื่นเท่าไรมาช่วยแบ่งไฟ เพื่อให้เหลือกระแสในกัลวานอมิเตอร์แต่เพียง $\frac{๑}{๑๐}$?

๔๔. หม้อไฟมีความต้านทานภายในน้อยมาก ต่อกับกัลวานอมิเตอร์ เป็นวงจรกับลวดสองเส้น ความต้านทาน ๒๐ โอห์มกับ ๓๐ โอห์ม เมื่อลวดสองเส้นต่อเป็นอันดับกระแสไฟออกจากหม้อ .๒๕ แอมแปร์ และเมื่อลวดสองเส้นต่อเป็นขนาน กระแสไฟออกจากหม้อ .๗ แอมแปร์ ให้หาความต้านทานของกัลวานอมิเตอร์.

๔๕. หม้อไฟ ๗๒ หม้อ แรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อละ ๑.๔ วอลต์ ความต้านทานภายในหม้อละ ๑ $\frac{๑}{๓}$ โอห์ม เมื่อเอาลวด ๖ โอห์มมาต่อจะต้องเรียงหม้ออย่างไร จึงจะได้กระแสไฟมากที่สุด? และได้กระแสเท่าไร ?

๔๖. ในข้อ ๔๕ ถ้าเรียงหม้อเป็น ๖ ตับ ๆ ละ ๑๒ หม้อ จะได้กระแสไฟเท่าไร ?

๔๗. หม้อไฟ ๑๖ หม้อ แรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อละ ๑.๕ วอลต์ ความต้านทานภายในหม้อละ ๑ โอห์ม เมื่อใช้ลวด ๑๐ โอห์มต่อจะได้กระแสเท่าไร (ก) เรียงเป็น ๔ ตับ (ข) เรียงเป็น ๒ ตับ.

๔๘. แบตเตอรี่ประกอบด้วยหม้อไฟ ๑๒ หม้อ แรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อละ ๑.๑ วอลต์ และความต้านทานภายในหม้อละ ๑ โอห์ม ต่อไฟอย่างไรจึงจะได้กระแสผ่านความต้านทานภายนอก ๓ โอห์มมากที่สุดและเป็นกระแสเท่าไร?

๔๙. หม้อไฟ ๔๒ หม้อเมื่อเรียงเป็น ๔ ตับๆละ ๖ หม้อได้กระแสไฟมากที่สุดผ่านความต้านทานภายนอก ๒ โอห์ม หม้อไฟเหล่านั้นมีความต้านทานภายในหม้อละเท่าไร?

๕๐. หม้อไฟ ๑.๑ วอลต์ความต้านทานภายใน ๑.๕ โอห์ม เอาลวด ๑,๒ และ ๓ โอห์มมาต่อเป็นขนาน จะได้กระแสในลวดเส้นละเท่าไร? กระแสทั้งหมดเท่าไร?

๕๑. หม้อไฟมีความต้านทานภายใน ๑ โอห์มต่อกับลวด ๘ โอห์มและ ๑๑ โอห์มเป็นอันดับ เส้น ๘ โอห์มมีความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสอง $\frac{8}{3}$ วอลต์ หม้อไฟมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าไร?

๕๒. แทนเจนต์กัลวานอมิเตอร์มีความต้านทาน ๑๐ โอห์มและมีลวด ๕ โอห์มมาช่วยแบ่งไฟ ถ้าเข็มหัน ๔๕° และรีดักชันแฟคเตอร์เท่ากับ .๐๔ มีกระแสผ่านกัลวานอมิเตอร์เท่าไร?

๕๓. ลวด ๑, ๒ และ ๔ โอห์มมีวิธีต่อให้ได้ความต้านทานต่างๆกันทั้งหมดกี่วิธี?

๕๔. กัลวานอมิเตอร์มีความต้านทาน ๒๐๐ โอห์มต่อเป็นอันดับกับลวด ๖๐ โอห์ม แต่กัลวานอมิเตอร์มีชันต์ ๕๐ โอห์ม ถ้ากระแสผ่านกัลวานอมิเตอร์ .๐๐๓ แอมแปร์ หม้อไฟที่ใช้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าไร?

๕๕. ไฟออกจากหม้อไฟแยกผ่านวอลแตมิเตอร์ทองแดงกับวอลแตมิเตอร์เงิน มีความต้านทาน ๒๐ โอห์มกับ ๑๕ โอห์มเป็นลำดับ ทองแดงแยกออกได้ชั่วโมงละ .๓ กรัม เงินจะแยกออกได้เท่าไร? หม้อไฟฟ้ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าไร?

๕๖ ความต้านทานจำเพาะของโลหะ .๐๐๐๕ โอห์ม ถ้าโลหะนั้นเป็นลวดยาว ๑๐ เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง .๖ มม. จะมีความต้านทานเท่าไร?

๕๗. ลวดยาว ๑๒.๕ เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง .๔ มม. มีความต้านทาน ๕๐ โอห์ม โลหะที่ใช้ทำลวดมีความต้านทานจำเพาะเท่าไร?

๕๘. ลวดชะนิดหนึ่งยาว ๕๐ ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง .๘ มม. มีความต้านทาน ๒.๓ โอห์ม ลวดชะนิดเดียวกันอีกเส้นหนึ่งยาว ๑.๓ เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง .๕ มม. มีความต้านทานเท่าไร?

๕๙. เงินเยอร์มันมีความต้านทานจำเพาะ ๑๓ เท่าของทองแดง ลวดทองแดงพื้นที่รอยตัด .๐๕ ตาราง มม. จะต้องยาวเท่าไรจึงจะมีความต้านทานเท่ากับลวดเงินเยอร์มัน ๑ เมตร พื้นที่รอยตัด .๕ ตาราง มม.?

๖๐. ลวดสี่เส้นมีความต้านทานเส้นละ ๑ โอห์มต่อเป็นขอบของรูปสี่เหลี่ยม เมื่อเอาขั้วหม้อไฟต่อที่มุมตรงกันข้าม ลวดสี่เส้นนั้นจะให้ความต้านทานเท่าไร?

๖๑. ในข้อ ๖๐ ถ้าเอาลวด ๒ โอห์มต่อที่มุมตรงกันข้ามเสียก่อน แล้วจึงเอาขั้วหม้อไฟต่อทั้งหมดจะให้ความต้านทานเท่าไร?

๖๒. ลวด ๓ เส้นต่อเป็นรูปสามเหลี่ยม กขค กข ๒ โอห์ม ขค ๓ โอห์ม คก ๔ โอห์ม กระแส $\frac{1}{2}$ แอมแปร์ ไหลเข้าทาง ค ไหลออกทาง ก รูปสามเหลี่ยมนั้นให้ความต้านทานเท่าไร? ความต่างศักย์ระหว่าง ก กับ ข เป็นเท่าไร?

๖๓. กขคง เป็นโครงสี่เหลี่ยมของลวด ๔ เส้น กข ๓ โอห์ม ขค ๔ โอห์ม คง ๖ โอห์ม งก ๘ โอห์ม ขง มีลวด ๕ โอห์มโยงถึงกัน ถ้าใน ขง มี

กระแส .๒ แอมแปร์ ใน ขกง กับ ขคง มีกระแสเส้นละเท่าไร?

๖๔. ลวด ๓ เส้น กข ขค คง มีความต้านทาน ๑๐ , ๓๐ , ๕. โอห์มเรียงกันเป็นลำดับและต่อกันเป็นรูปสามเหลี่ยม มุม ก กับ มุม ค ต่อกับหม้อไฟ ที่มุม ข มีลวดเส้นที่สี่ ขง ปลาย ง เลื่อนไปมาได้ตาม กค เมื่อเลื่อนปลาย ง ไปอยู่ที่จุดแห่งหนึ่งจนพอเหมาะไม่มีกระแสใน ขง ให้พิสูจน์ว่า กง $= \frac{1}{4}$ กค

๖๕. ลวด ๔ เส้น กข ๑ โอห์ม ขค ๒ โอห์ม คง ๓ โอห์ม งก ๔ โอห์ม ต่อกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม มีกระแส ๑ แอมแปร์ไหลเข้าที่มุม ก และไหลออกที่มุม ค ให้หาความต่างศักย์ระหว่าง (๑) ก กับ ค (๒) ก กับ ข (๓) ง กับ ค.

๖๖. กระแสไฟ .๒๕ แอมแปร์ไหลผ่านความต้านทาน ๕ โอห์ม ให้คำนวณความร้อนที่เกิดขึ้นในเวลา ๘ นาที เป็นหน่วยกำลังงาน.

๖๗. เมื่อปล่อยกระแสไฟ .๑ แอมแปร์ผ่านความต้านทาน ๑๐ โอห์มไปแล้ว ๑๐ นาที จะเปลี่ยนแรงงานกี่เออร์ก?

๖๘. ลวดต้านทาน ๒๘ โอห์มจุ่มอยู่ในน้ำ ๒๕๐ กรัม เมื่อให้กระแสไฟ ๑ แอมแปร์ผ่านไปเวลาชั่ว ๑๕ นาที น้ำจะร้อนขึ้นอีกกี่มากน้อย? หนึ่งแคลอรี่เท่ากับ ๔๒ $\times$ ๑๐^{๖} เออร์ก

๖๙. ถ้าต้องการแยกน้ำให้ได้ .๑ กรัม จะต้องเปลี่ยงไฟฟ้ากี่คูลอมบ์? ถ้าใช้กระแส ๑.๒ แอมแปร์ จะกินเวลานานเท่าไรจึงจะแยกน้ำจำนวนนั้นแล้วเสร็จ?

๗๐. กัลวานอมิเตอร์มีลวด ๖ ขด รัศมี ๑๒ ซม. กระแสไฟที่ทำให้เข็มหัน ๔๕° จะแยกทองแดงได้ชั่วโมงละกี่มากน้อย?

๗๑. หม้อไฟ ๑.๑ วอลต์ความต้านทานภายใน ๑ โอห์ม เอาต่อกับกัลวานอมิเตอร์มีลวด ๕๐ ขด รัศมี ๑๐ ซม. ความต้านทาน ๑๐ โอห์ม เข็มจะหันกี่องศา?

๗๒. กระแสผ่านวอลแตมิเตอร์ทองแดงและแคนเจนต์กัลวานอมิเตอร์ ทองแดงแยกได้ชั่วโมงละ .๒๗ กรัม และเข็มหัน ๔๕° ขดลวดมีรัศมี ๑๖ ซม. กัลวานอมิเตอร์นั้นมีลวดกี่ขด ?

๗๓. กัลวานอมิเตอร์มีขดลวดซ้อนกันสองชั้น ชั้นในมีรัศมี ๑๕ ซม. ชั้นนอกรัศมี ๒๐ ซม. มีขดลวดชั้นละ ๒๐ รอบ ชั้นในและชั้นนอกต่อเป็นอันดับกันและวงทางเดียวกัน กระแสไฟกี่แอมแปร์จึงจะทำให้เข็มหัน ๖๐° ?

๗๔. ในข้อ ๗๓ ถ้าขดลวดวงสวนทางกัน จะต้องการกระแสเท่าไรเข็มจึงจะหัน ๖๐° ?

๗๕. หม้อไฟหม้อหนึ่งเมื่อเอาลวด ๓ โอห์มมาต่อได้กระแส .๔ แอมแปร์ และเมื่อเอาลวด ๖.๕ โอห์มมาต่อได้กระแส .๒ แอมแปร์ หม้อนั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าไร ? และความต้านทานภายในเท่าไร ?

๗๖. หม้อไฟ ๑.๕ วอลต์เมื่อเอาลวด ๔ โอห์มมาต่อได้กระแส $\frac{1}{3}$ แอมแปร์ ถ้าเอาลวด ๑๐ โอห์มมาต่อจะได้กระแสเท่าไร ?

๗๗. หม้อไฟ ๑.๑ วอลต์เมื่อเอาลวด ๙ โอห์มต่อจะได้กระแส .๑ แอมแปร์ ถ้าใช้หม้อเช่นนี้ ๑๐ หม้อและเอาลวด ๒๕ โอห์มต่อจะได้กระแสเท่าไร ?

๗๘. หม้อไฟมีความต้านทานภายใน ๒ โอห์ม เมื่อยังไม่มีลวดต่อ ที่ขั้วหม้อมีความต่างศักย์ ๑.๐๘ วอลต์ เมื่อเอาลวด ๑๐ โอห์มมาต่อ มีจะความต่างศักย์ที่ขั้วหม้อเท่าไร ?

๗๙. หม้อไฟ ๑.๘ วอลต์ เมื่อเอาลวด ๕ โอห์มมาต่อ ความต่างศักย์ที่ขั้วหม้อเท่ากับ ๑$\frac{1}{2}$ วอลต์ หม้อนั้นมีความต้านทานภายในเท่าไร ?

๘๐. หม้อไฟมีกำลังเท่ากันสองหม้อ เมื่อเอาลวดเส้นหนึ่งมาต่อให้ไฟเดิร ไม่ว่าจะเรียงหม้อเป็นอันดับหรือเป็นขนาน จะได้กระแสเท่ากันเสมอ จงพิสูจน์ว่าเส้นลวดที่ใช้ต่อมีความต้านทานเท่ากับความต้านทานภายในของหม้อ ๆ หนึ่ง

๙๑. หม้อไฟมีกำลังเท่ากัน ๔ หม้อ มีความต้านทานภายในหม้อละ ๑ โอห์ม เมื่อเอาลวดเส้นหนึ่งมาต่อ ถ้าเรียงหม้อเป็นอันดับได้กระแส ๓ เท่าของเมื่อเรียงหม้อเป็นขนาน ให้หาความต้านทานของลวดเส้นนั้น

๙๒. หม้อไฟมีกำลังเท่ากันสองหม้อเมื่อเรียงเป็นอันดับแล้วเอาลวด ๑๐ โอห์มมาต่อได้กระแส $\frac{๑}{๔}$ แอมแปร์ เมื่อเรียงหม้อเป็นขนานได้กระแส $\frac{๗}{๘}$ แอมแปร์ ให้หาแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับความต้านทานภายในของหม้อนั้น

๙๓. กัลวานอมิเตอร์มีความต้านทาน ๒๕๐ โอห์ม จะต้องใช้ความต้านทานเท่าไรมาช่วยแบ่งไฟ จึงจะมีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์แต่เพียง $\frac{๑}{๑๐}$ ของกระแสทั้งหมด ?

๙๔. ลวดแปลตินอยด์มีความต้านทานเมตรละ ๑๓.๔ โอห์ม จะต้องใช้ลวดชนิดนี้ยาวเท่าไรเอามาช่วยแบ่งไฟจากกัลวานอมิเตอร์มีความต้านทาน ๑๒๐ โอห์ม กระแสไฟจึงจะไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์แต่เพียง $\frac{๑}{๒๕}$ ของกระแสทั้งหมด ?

๙๕. หม้อไฟมีความต้านทานภายในน้อยมาก ใช้ต่อกับเครื่องกัลวานอมิเตอร์ เมื่อเอาลวด ๒๐ โอห์มมาช่วยแบ่งไฟ กระแสผ่านกัลวานอมิเตอร์แต่เพียง $\frac{๑}{๑๐}$ ให้หาความต้านทานของกัลวานอมิเตอร์

๙๖. ลวดเส้นหนึ่งมีความต้านทาน ๕.๑ โอห์ม จะต้องใช้ลวดมีความต้านทานเท่าไรมาต่อเป็นขนานจึงจะได้ความต้านทานรวม ๕ โอห์มพอดี ?

๙๗. กระแสจากหม้อไฟแยกออกเป็นสองทาง ทางหนึ่งผ่านความต้านทาน ๖๐ โอห์ม อีกทางหนึ่งผ่านกัลวานอมิเตอร์ มีความต้านทาน ๑๕ โอห์ม มีขดลวด ๕๐ รอบ รัศมี ๑๐ ซม. เข็มกัลวานอมิเตอร์หัน ๔๕° ถ้าหม้อไฟมีความต้านทานภายใน ๒ โอห์ม แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อไฟเท่าไร ?

๙๘. หม้อไฟมีความต้านทานภายใน ๒ โอห์ม ส่งกระแสผ่านกัลวานอมิเตอร์ ๓๐

โอห์ม ซึ่งมีลวด ๒๕ โอห์มช่วยแบ่งไฟอยู่ด้วย ถ้ากระแสผ่านกัลวานอมิเตอร์ $\frac{๑}{๓๐}$ แอมแปร์ ให้หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของหม้อไฟนั้น

๘๙. หม้อไฟส่งกระแส $\frac{๒}{๑๕}$ แอมแปร์ผ่านกัลวานอมิเตอร์มีความต้านทาน ๖ โอห์มครั้นเอาความต้านทาน ๘ โอห์มมาชันต์กับกัลวานอมิเตอร์ กระแสผ่านกัลวานอมิเตอร์เพียง $\frac{๑}{๗}$ แอมแปร์ หม้อไฟนั้นมีความต้านทานภายในเท่าไร?

๙๐. กระแสไฟ ๕ แอมแปร์ผ่านความต้านทานจำนวนหนึ่งเกิดความร้อนวินาทีละ ๒๐ แคลอรี่ ความต้านทานนั้นกี่โอห์ม ($J = ๔๒ \times ๑๐^{๖}$ เออร์ก)

๙๑. ลวดขดหนึ่งจุ่มอยู่ในน้ำ ๕๐ กรัม เมื่อเอากระแส .๒ แอมแปร์ผ่านชั่วเวลา ๒๐ นาที น้ำร้อนขึ้น ๖° ซ. ลวดขดนั้นมีความต้านทานเท่าไร?

๙๒. กระแส .๗๕ แอมแปร์ไหลผ่านหลอดไฟ ๓๐๐ โอห์ม จะมีความร้อนเกิดขึ้นวินาทีละเท่าไร?

๙๓. ก ข ค ง เป็นรูปสี่เหลี่ยม ก ข ข ค ค ง ง ก มีความต้านทาน ๓, ๑, ๒, ๔ โอห์ม เป็นลำดับ ก กับ ง มีลวด ๔ โอห์มโยงถึงกัน ถ้า ก กับ ง ต่อกับขั้วหม้อไฟ ลวดทั้งหมดจะให้ความต้านทานรวมเท่าไร?

๙๔. ลวด ๖ เส้นมีความต้านทานเส้นละ ๑ โอห์ม ถ้าสี่เส้นต่อเป็นด้านของรูปสี่เหลี่ยม และอีกสองเส้นต่อเป็นเส้นทะแยงมุม เมื่อเอามุมคู่ใดของรูปสี่เหลี่ยมต่อกับขั้วหม้อ ลวดทั้งหมดจะมีความต้านทานรวมเท่าไร?

๙๕. ลวดยาว ๑ เมตร ขดเป็นวงกลมและมีความต้านทาน ๒๕ โอห์ม เอาหม้อไฟ ๑.๕ วอลต์ ความต้านทานภายใน ๑ โอห์มต่อที่เส้นลวดห่างกัน ๒๐ ซม. ให้หากระแสที่ออกจากหม้อ และที่ไหลในเส้นลวด

๙๖. หม้อไฟ ๑๒ หม้อ แรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อละ ๑.๕ วอลต์ ความต้านทานภายในหม้อละ ๑ โอห์ม จะส่งกระแสไฟมากที่สุดผ่านลวด ๓ โอห์มได้เท่าไร?

๙๗. หม้อไฟ ๓๖ หม้อ ความต้านทานหม้อละ .๗๕ โอห์ม ถ้าจะให้ส่งกระแสมากที่สุดผ่านลวด ๒.๕ โอห์ม จะต้องเรียงหม้ออย่างไร?

๙๘. เมื่อหม้อไฟส่งกระแสผ่านลวดสองเส้นเรียงเป็นขนาน จำนวนความร้อนที่เกิดขึ้นในลวดทั้งสองนั้นจะได้ส่วนตามความนำของลวด จงพิสูจน์ให้เห็นจริง

๙๙. หม้อไฟมีความต้านทานภายใน ๕ โอห์มส่งกระแสผ่านลวด ๒๐ โอห์ม จะต้องใช้ชันต์เท่าไรมาช่วย ความร้อนที่เกิดขึ้นในลวดเส้นนั้นจึงจะเหลือเพียง $\frac{1}{4}$ ของเมื่อเดิม?

๑๐๐. ราคาไฟฟ้ายูนิตละ ๓๐ สตางค์ หลอดไฟธรรดา ๒๐ กำลังเทียน ๑๐๐ ดวง จุดเฉลี่ย ๓ คืน ๆ ละ ๑๐ ชั่วโมงจะต้องเสียเงินประมาณเท่าไร? กำลังไฟฟ้าจำนวนนั้นจะช่วยมอเตอร์รถราง ๕๐๐ วอลต์ ๕ แอมแปร์หมุนอยู่ได้นานประมาณเท่าไร?

คำตอบ

แม่เหล็ก

(๑) ๔๘ ดายน์

(๒) ๖๓ หน่วย

(๓) ๑๕ หน่วย

(๔) ๓ ดายน์

(๕) ๑๘ ดายน์

(๖) ๘ ซม.

(๗) ๑ ดายน์

(๘) ๐.๑๗๕ ดายน์

(๙) ๒๐๐ ; ๒๕๐

(๑๐) ๒๐๐ ; ๒๐ หน่วย

(๑๑) ๐.๐๔๔ ดายน์

(๑๒) ๐.๓๒ ดายน์; ๐.๐๖ ดายน์

(๑๓) ๑๓.๕ ดายน์

(๑๔) ๐.๐๓ ดายน์

(๑๕) $\frac{๑}{๓๒}$ ดายน์

(๑๖) ๒๔

(๑๗) ๑๔.๔

(๑๘) ๒๔

(๑๙) ๓๗.๓°

(๒๐) ๘.๒๓ วินาที

(๒๑) ๐.๑๗๔

(๒๒) ๗๗.๑

(๒๓) ๑๖ : ๒๕

(๒๔) ๑๔.๓ วินาที

(๒๕) ๘๑ : ๑๐๐

(๒๖) ๑๐๐๐ : ๒๓๓๑

(๒๗) ๕ นาที ๑ วินาที

๔ นาที ๒๔ วินาที

(๒๘) ๘ : ๒๗

(๒๙) ๓๐

(๓๐) ๒๓ $\frac{๑}{๒}$°

(๓๑) ๕๗.๗

(๓๒) ๕๑๒ : ๗๒๙

(๓๓) ๙°

(๓๔) ๐.๐๘๒ ; ๐.๒๘๓ ดายน์

(๓๕) ๑๕/๖๔ ดายน์

(๓๖) ๑๑๐.๕ ; ๑๐๑.๙

(๓๗) ๖๓.๕ วินาที ๔๗.๘ วินาที

(๓๘) ๑๓๘.๖

(๓๙) ๐.๐๓ ดายน์

(๔๐) ๕ : ๖

(๔๑) ๒๕๓.๕

(๔๒) ๐.๓ หน่วย ซี. จี. เอส.

(๔๔) ๔๒๕ : ๗๐๔

(๔๕) ๒ นาที ๒๔ วินาที

(๔๖) ๓ นาที ๕๙ วินาที

(๔๗) ๐.๑๘ หน่วย ซี. จี. เอส.

(๔๘) ๗๐๙

(๔๙) $๗๑\frac{๑}{๕}$

(๕๐) ๗๗.๓ ; ๐.๒๑ หน่วย ซี. จี. เอส.

อีเลคโตรสแตติคส์

(๑) ๒๓.๐๔ ดายน์

(๒) ๓ ซม.

(๓) ๕ , ๓๐

(๔) ๑.๐๘ ดายน์

(๕) ๑.๖ ดายน์

(๖) ๑๒ หน่วย

(๗) ๐.๗๑๖๘ ดายน์

(๘) ๕.๓ ดายน์

(๙) ๘ ดายน์ ; ๙ ดายน์

(๑๐) ๙.๖๖ ดายน์

(๑๑) ๑๘๘๕ หน่วย

(๑๒) ๐.๒

(๑๓) ๔ ซม. จากประจุอันน้อย

(๑๔) ๕๕

(๑๕) $๓\sqrt{๓}$

(๑๖) -๔๒

(๑๗) $-\frac{๓}{๒๐}$

(๑๘) $๑๓\frac{๑}{๓}$ ซม.

(๑๙) $๓\frac{๑}{๓}$ ซม.

(๒๐) ๑๓.๑๗ ; ๑.๘๖ ดายน์

(๒๑) ๕๐๐

(๒๒) ๓๐๐

(๒๓) ๑๒

(๒๔) ๖.๕ ; ๓๙ หน่วย

(๒๕) ๑๖ หน่วย ; ๓๒ หน่วย

(๒๖) ๔๐ หน่วย

(๒๗) ๕.๗

(๒๘) ๑๕.๙๒

(๒๙) ๒๓๘.๘๕

(๓๐) $๓๓\frac{๑}{๓}$

(๓๑) ๖๐๐ วอลต์

(๓๒) ๔๗.๗๗

(๓๓) ๑๑๑.๔๗

(๓๔) ๗.๕ ซม.

(๓๕) ๑๐๐ หน่วย

(๓๖) $\sqrt{๓}$; ๐.๐๓ ดายน์

(๓๗) ๑.๓๑ ดายน์

(๓๘) ๑๐.๗ ซม. จากประจุอันมาก

(๓๙) ๒๐๐ ; ๖๐๐ ; ๑๐ หน่วย

(๔๐) ๓๐ หน่วย ; ๑๕๐ ; ๓๐๐ ; ๔๕๐

(๔๑) ๒ : ๑

(๔๒) ๔๙๗๔๐ เออร์ก (เกือบไป)

(๔๓) ๔๘ ; ๓๖ ; ๓๕.๓ ; ๔๗ เออร์ก

(๔๔) ๑๕๐ เออร์ก

(๔๕) ๕๙๗ ; ๒๙๘๔๐๐๐ เออร์ก (ประมาณ)

(๔๖) ๒๒๐ ; ๔๘๔ เออร์ก

๔๔๐๐๐๐๐ ,,

๙๖๘๐๐๐๐ ,,

(๔๗) ๑๕๐ เออร์ก

(๔๘) $๒๗๓๔๓\frac{๓}{๔}$ เออร์ก

(๔๙) ๖๐๐ หน่วย ; ๑.๓๓

(๕๐) ๘.๙๗ หน่วย ; ๒๑๔๑ หน่วย

อีเลคโตรไดแนมิคส์

(๑) ๐.๑๒๓ กรัม

(๒) ๒๔ นาฑี ๕๑ วินาฑี

(๓) ๐.๒๕๓ กรัม ; ๑.๒๘ แอมแปร์

(๔) ๐.๐๙๗ กรัม ; ๐.๔๑ แอมแปร์

(๕) ๓ โมง ๔๓ นาฑี ๓๗ วินาฑี

(๖) ๐.๒๘๓ กรัม ; ๐.๕๗๖ แอมแปร์

(๗) ๐.๓๔๑ กรัม

(๘) ๐.๑๙๗ กรัม ; ๐.๖๗๑ กรัม

(๙) ๐.๗๕๑ กรัม

(๑๐) ๐.๕๐๙

(๑๑) ๐.๙๔๗

(๑๒) ๓๑.๔๓

(๑๓) ๑๒.๕๗ กรัม

(๑๔) ๐.๐๐๙๖ แอมแปร์

(๑๕) ๐.๓๐๖ แอมแปร์

(๑๖) ๐.๑๓๕ กรัม

(๑๗) ๑๗.๕๔

(๑๘) ๐.๓๒ แอมแปร์

(๑๙) ๑.๕ วอลต์

(๒๐) ๕๕ โอห์ม

(๒๑) $\frac{๑}{๘}$ แอมแปร์

(๒๒) ๕ วอลต์

(๒๓) ๑๑๐ วอลต์

(๒๔) ๑.๖ วอลต์

(๒๕) ๒ ; ๐.๗๕ ; ๑.๒๕ วอลต์

(๒๖) ๐.๒๒ แอมแปร์

(๒๗) ๑๘

(๒๘) ๑.๓๗๕ ; ๑.๒๕ วอลต์

(๒๙) ๑๒.๕ โอห์ม

(๓๐) ๘๓.๘ โอห์ม

(๓๑) ๑๗ โอห์ม

(๓๒) ๔.๖ โอห์ม

(๓๓) ๔๕ โอห์ม

(๓๔) ๑๔ โอห์ม ; $๓\frac{๓}{๗}$ โอห์ม

(๓๕) ๘ ; ๔ โอห์ม

(๓๖) ๐.๑๗ ; ๐.๑๖๓ ๐.๒๔๕ แอมแปร์

(๓๗) ๑.๔๓๕ แอมแปร์

(๓๘) ๑.๘ วอลต์ ; ๒.๖ โอห์ม

(๓๙) ๑.๑๕ ; ๐.๑๘ ; .๘๑ โอห์ม

(๔๐) ๑.๖๓ ; ๑.๐๘ ; ๐.๕๕ แอมแปร์

(๔๑) ๑๑

(๔๒) ๒๐๑๐ โอห์ม

(๔๓) ๖ โอห์ม

(๔๔) $๙\frac{๑}{๔}$ โอห์ม

(๔๕) ๔ ดับ ; ๒.๑ แอมแปร์

(๔๖) ๑.๙๔ แอมแปร์

(๔๗) ๐.๕๕ ; ๐.๓ แอมแปร์

(๔๘) ๑.๑ แอมแปร์

(๔๙) $๑\frac{๑}{๓}$ โอห์ม

(๕๐) ๐.๒๙ ; ๐.๑๕ ; ๐.๑๐ ;
๐.๕๔ แอมแปร์

(๕๑) ๑.๐๗ วอลต์

(๕๒) ๐.๑๒ แอมแปร์

(๕๓) ๑๗

(๕๔) ๑.๕ วอลต์

(๕๕) ๑.๓๖ กรัม ; ๕.๐๑ วอลต์

(๕๖) ๑๗.๗ โอห์ม

(๕๗) ๐.๐๐๐๕ โอห์ม

(๕๘) ๑๕.๓ โอห์ม

(๕๙) ๑๓๐ ซม.

(๖๐) ๑ โอห์ม

(๖๑) $\frac{๒}{๓}$ โอห์ม

(๖๒) $๒\frac{๒}{๗}$ โอห์ม ; $\frac{๔}{๗}$ วอลต์

(๖๓) $\frac{๑}{๑๑}$; $\frac{๑}{๑๐}$ แอมแปร์

(๖๕) ๒.๔ , ๐.๘ , ๐.๖ วอลต์

(๖๖) ๑๕ × $๑๐^{๘}$ เออร์ก

(๖๗) ๖ × $๑๐^{๕}$ เออร์ก

(๖๘) ๒๔°ซ.

(๖๙) ๑๐๗๐.๔ คูลอมบ์

๑๔ นาที ๕๒ วินาที

(๗๐) ๐.๖๘ กรัม

(๗๑) ๖๐°

(๗๒) ๒๐

(๗๓) ๐.๐๒ แอมแปร์

(๗๔) ๐.๑๕ แอมแปร์

(๗๕) ๑.๔ วอลต์ ; $\frac{๑}{๒}$ โอห์ม

(๗๖) $\frac{๑}{๗}$ แอมแปร์

(๗๗) $\frac{๑}{๔}$ แอมแปร์

(๗๘) ๐.๙ วอลต์

(๗๙) ๐.๔ โอห์ม

(๘๑) ๑๑ โอห์ม

(๘๒) ๑.๕ วอลต์ ; ๑ โอห์ม

(๘๓) ๒๗ $\frac{๗}{๙}$ โอห์ม

(๘๔) ๓๗.๓ ซม.

(๘๕) ๑๘๐ โอห์ม

(๘๖) ๒๕๕ โอห์ม

(๘๗) ๑ วอลต์

(๘๘) ๑.๑๕ วอลต์

(๘๙) $๒\frac{๒}{๑๑}$ โอห์ม

(๙๐) ๓๓๖ โอห์ม

(๙๑) $๒๖\frac{๑}{๔}$ โอห์ม

(๙๒) ๔๐.๒ แคลอรี

(๙๓) ๑.๕ โอห์ม

(๙๔) $\frac{๑}{๒}$ โอห์ม

(๙๕) ๐.๒๘ ; ๐.๒๒๔ ; ๐.๐๕๖ แอมแปร์

(๙๖) ๑.๔ แอมแปร์

(๙๗) ๓ คับ

(๙๙) ๒ โอห์ม

(๑๐๐) ๑๘ บาท ; ๒๔ ชั่วโมง

(สำเนา)

29/ม.ค.๒๕
4 ก.พ.๒๖
2๐ ก.พ.๒๖

ฉะบับที่

หน

ของ พ

พิมพ์ครั้งที่

เจ้าห

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงธรรมการ

(ใช้ได้ฉะเพาะในการพิมพ์คราวนี้เท่านั้น)

และห้ามมิให้นำใบอนุญาตนี้ไปพิมพ์ในหนังสือเรื่องอื่นที่มิได้รับอนุญาตเป็นอันขาด



[๑๓๒ : ๓/๗๖]