



งานไฟฟ้ารถยนต์ เบื้องต้น

Basic Automotive Electrical Practice



ผศ. น.อ. บุญเลิศ ปัทมบุตร
ผศ. น.อ. งามจิตต์ ฤทธิศรี

110.-



งานไฟฟ้ารถยนต์เบื้องต้น

(Basic Automotive Electrical Practice)

รหัสวิชา 30101-0004

รายวิชาปรับปรุงพื้นฐานวิชาชีพ

ประเภทวิชาอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคนิคเครื่องกล

หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2563

สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) กระทรวงศึกษาธิการ



เรียบเรียงโดย

ผศ.น.อ. บุญเลิศ ปีกขุนทด

ผศ.น.อ. รามจิตติ ฤทธิศร

งานไฟฟ้ารถยนต์เบื้องต้น (Basic Automotive Electrical Practice)

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2563

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

บุญเลิศ ปิกขุนทด.

งานไฟฟ้ารถยนต์เบื้องต้น.-- กรุงเทพฯ : วังอักษร, 2563.

352 หน้า.

1. รถยนต์--เครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้า. 2. รถยนต์--การเดินสายไฟฟ้า. 3. ยานยนต์--
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. I. งามจิตติ ฤทธิศร, ผู้แต่งร่วม. II. ชื่อเรื่อง.

629-254

ISBN 978-616-495-144-0

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย



บริษัท วังอักษร จำกัด

69/3 ถนนอรุณอมรินทร์ แขวงวัดอรุณ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

โทร. 0-2472-3293-5 โทรสาร 0-2891-0742 Mobile 08-8585-1521

e-Mail : wangaksorn9@gmail.com

Facebook : สำนักพิมพ์ วังอักษร

<http://www.wangaksorn.com>

ID Line : @wangaksorn



สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537

โดย บริษัท วังอักษร จำกัด ห้ามนำส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้
ไปทำซ้ำ ดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชน ไม่ว่ารูปแบบใด ๆ
นอกจากได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางบริษัทฯ เท่านั้น
ชื่อและเครื่องหมายการค้าอื่น ๆ ที่อ้างถึงในหนังสือฉบับนี้
เป็นสิทธิโดยชอบด้วยกฎหมายของเจ้าของแต่ละราย
โดย บริษัท วังอักษร จำกัด มิได้อ้างความเป็นเจ้าของแต่อย่างใด

งานไฟฟ้ารถยนต์เบื้องต้น (Basic Automotive Electrical Practice)

รหัสวิชา 30101-0004

จุดประสงค์รายวิชา เพื่อให้

1. เข้าใจ หลักการทำงาน ไฟฟ้าพื้นฐาน ของระบบไฟฟ้ารถยนต์
2. ต่อสายไฟแบบชั่วคราว แบบถาวร ของระบบไฟฟ้ารถยนต์
3. ใช้เครื่องมือวัด เครื่องมือทดสอบของระบบไฟฟ้ารถยนต์
4. ถอดประกอบ ตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้ารถยนต์
5. บริการ บำรุงรักษา แก้ไขข้อขัดข้องระบบไฟฟ้ารถยนต์
6. มีกิจนิสัยที่ดีในการทำงาน รับผิดชอบ ประณีต รอบคอบ ตรงต่อเวลา สะอาดปลอดภัย

และรักษาสภาพแวดล้อม

สมรรถนะรายวิชา

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับ หลักการทำงาน ไฟฟ้าพื้นฐาน ระบบไฟฟ้ารถยนต์
2. ต่อสายไฟแบบบัดกรี และแบบชั่วคราวตามคู่มือ
3. ตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ารถยนต์ตามคู่มือ
4. ถอดประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ารถยนต์ตามคู่มือ
5. แก้ไขข้อขัดข้องของระบบไฟฟ้ารถยนต์ตามคู่มือ

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาและปฏิบัติเกี่ยวกับ หลักการทำงาน ไฟฟ้าพื้นฐาน การต่อสายไฟ การใช้เครื่องมือวัด และเครื่องมือทดสอบ ถอดประกอบ ตรวจสอบสภาพ บริการ บำรุงรักษา การแก้ไขข้อขัดข้อง แบตเตอรี่ ระบบสตาร์ท ระบบจุดระเบิด ระบบประจุไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบไฟฟ้าสัญญาณ และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกในระบบไฟฟ้ารถยนต์

คำนำ

วิชางานไฟฟ้ารถยนต์เบื้องต้น รหัสวิชา 30101-0004 จัดอยู่ในรายวิชาปรับปรุงพื้นฐานวิชาชีพ ประเภทวิชาอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคนิคเครื่องกล **ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2563** สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) ผู้เขียนได้บริหารสาระการเรียนรู้แบ่งออกเป็น 13 บท ได้จัดแผนการจัดการเรียนรู้/แผนการสอนที่มุ่งเน้นฐานสมรรถนะ (Competency Based) และการบูรณาการ (Integrated) ตรงตามจุดประสงค์รายวิชา สมรรถนะรายวิชา คำอธิบายรายวิชาในแต่ละบทเรียนมุ่งให้ความสำคัญส่วนที่เป็นความรู้ ทฤษฎี หลักการ กระบวนการ และส่วนที่เป็นทักษะ ประสบการณ์ เร่งพัฒนาบทบาทของผู้เรียนเป็นผู้จัดการแสวงหาความรู้ (Explorer) เป็นผู้สอนตนเองได้ สร้างองค์ความรู้ใหม่ และบทบาทของผู้สอนเปลี่ยนจากผู้ให้ความรู้มาเป็นผู้จัดการชี้แนะ (Teacher Roles) จัดสิ่งแวดล้อมเอื้ออำนวยต่อความสนใจเรียนรู้ และเป็นผู้ร่วมเรียนรู้ (Co-investigator) จัดห้องเรียนเป็นสถานที่ทำงานร่วมกัน (Learning Context) จัดกลุ่มเรียนรู้ให้รู้จักทำงานร่วมกัน (Grouping) ฝึกความใจกว้าง มุ่งสร้างสรรค์คนรุ่นใหม่ สอนความสามารถที่นำไปทำงานได้ (Competency) สอนความรัก ความเมตตา (Compassion) ความเชื่อมั่น ความซื่อสัตย์ (Trust) เป้าหมายอาชีพอันยังประโยชน์ (Productive Career) และชีวิตที่มีศักดิ์ศรี (Noble Life) เหนือสิ่งอื่นใด เป็นคนดีทั้งกาย วาจา ใจ มีคุณธรรม จรรยาบรรณ ทางธุรกิจและวิชาชีพ

ส่งเสริมสนับสนุนยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบคุณวุฒิวิชาชีพ (Vocational Qualification System) สอดคล้องตามมาตรฐานอาชีพ (Occupational Standard) สร้างภูมิคุ้มกัน เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ กำลังแรงงาน การพัฒนามาตรฐานการปฏิบัติงานระดับชาติ (National Benchmarking) และการวิเคราะห์หน้าที่การงาน (Functional Analysis) เพื่อให้เกิดผลสำเร็จในภาคธุรกิจ อุตสาหกรรมทุกสาขาอาชีพ เป็นการเตรียมความพร้อมของผู้เรียนเข้าสู่สนามการแข่งขันในประชาคมอาเซียน

ขอขอบคุณ ท่านอาจารย์ผู้สอน ผู้ประสาทวิชาความรู้ เอกสาร หนังสือที่ใช้ประกอบในการเรียบเรียงไว้ ณ โอกาสนี้

ผศ.น.อ. บุญเลิศ ปีกขุนทด

ผศ.น.อ. รามจิตติ ฤทธิศร

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 หลักการเบื้องต้นของไฟฟ้าในรถยนต์	1
ไฟฟ้าและอะตอม	2
ตัวนำและฉนวนไฟฟ้า	6
แรงดันไฟฟ้า	7
ชนิดของกระแสไฟฟ้า	8
ความต้านทานไฟฟ้า	9
กฎของโอห์ม	10
วงจรไฟฟ้า	11
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	15
บทที่ 2 แม่เหล็กและแม่เหล็กไฟฟ้า	16
อำนาจดึงดูดแม่เหล็ก	17
สนามแม่เหล็ก	19
แม่เหล็กไฟฟ้า	19
การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า	23
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	26
บทที่ 3 อิเล็กทรอนิกส์ในรถยนต์	27
สารกึ่งตัวนำ	28
ไดโอด	30
ทรานซิสเตอร์	33
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ	35
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	38
บทที่ 4 วงจรและการเดินสายไฟในรถยนต์	39
สัญลักษณ์ของไฟฟ้ารถยนต์	40
วงจรไฟฟ้ารถยนต์	43
สายไฟฟ้า	47
แผ่นหน้าปัดรถยนต์แบบอิเล็กทรอนิกส์	50
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	60

ใบงานที่ 4.1 การต่อวงจรไฟใหญ่แบบใช้รีเลย์	61
ใบงานที่ 4.2 ไฟในแก๊งและไฟประตู	65

บทที่ 5 แบตเตอรี่ในรถยนต์ 68

แบตเตอรี่รถยนต์	69
ชนิดของแบตเตอรี่	70
โครงสร้างของแบตเตอรี่	71
การทำงานของแบตเตอรี่	72
คุณสมบัติของแบตเตอรี่	75
การทดสอบแบตเตอรี่	76
การบำรุงรักษาแบตเตอรี่	78
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	81
ใบงานที่ 5.1 การประจุไฟแบตเตอรี่	82

บทที่ 6 ระบบสตาร์ท 87

คุณสมบัติของมอเตอร์สตาร์ท	89
โครงสร้างของมอเตอร์สตาร์ท	90
การทำงานของมอเตอร์สตาร์ท	93
การทดสอบวงจรสตาร์ท	96
การบำรุงรักษามอเตอร์สตาร์ท	98
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	99
ใบงานที่ 6.1 การถอดประกอบมอเตอร์สตาร์ท	100
ใบงานที่ 6.2 การตรวจสอบมอเตอร์สตาร์ท	105
ใบงานที่ 6.3 วงจรแรงดันน้ำมันเครื่อง	110
ใบงานที่ 6.4 การศึกษาวงจรเครื่องวัดความเร็วรอบเครื่องยนต์	114
ใบงานที่ 6.5 การศึกษาและเดินสายไฟวงจรสตาร์ท	118

บทที่ 7 ระบบจุดระเบิด 124

ระบบจุดระเบิด	126
ประเภทของระบบจุดระเบิด	127
โครงสร้างของระบบจุดระเบิด	128
การทำงานของระบบจุดระเบิด	133
การบำรุงรักษาระบบจุดระเบิด	135

แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	136
ใบงานที่ 7.1 การอ่านวงจรและการเดินสายไฟวงจรน้ำมันเชื้อเพลิง	137
ใบงานที่ 7.2 การศึกษาและเดินสายไฟวงจรจุดระเบิด	142

บทที่ 8 ระบบประจุไฟฟ้า **148**

ชนิดของระบบประจุไฟฟ้า	149
การทำงานของระบบประจุไฟฟ้า	151
โครงสร้างของเจนเนอเรเตอร์	153
โครงสร้างของอัลเทอเนเตอร์	154
โครงสร้างของเรกูเลเตอร์	156
ไอซีเรกูเลเตอร์	158
คัตเอาต์รีเลย์	167
การทดสอบและการบำรุงรักษา	169
แบบทดสอบและกิจกรรมฝึกทักษะ	173

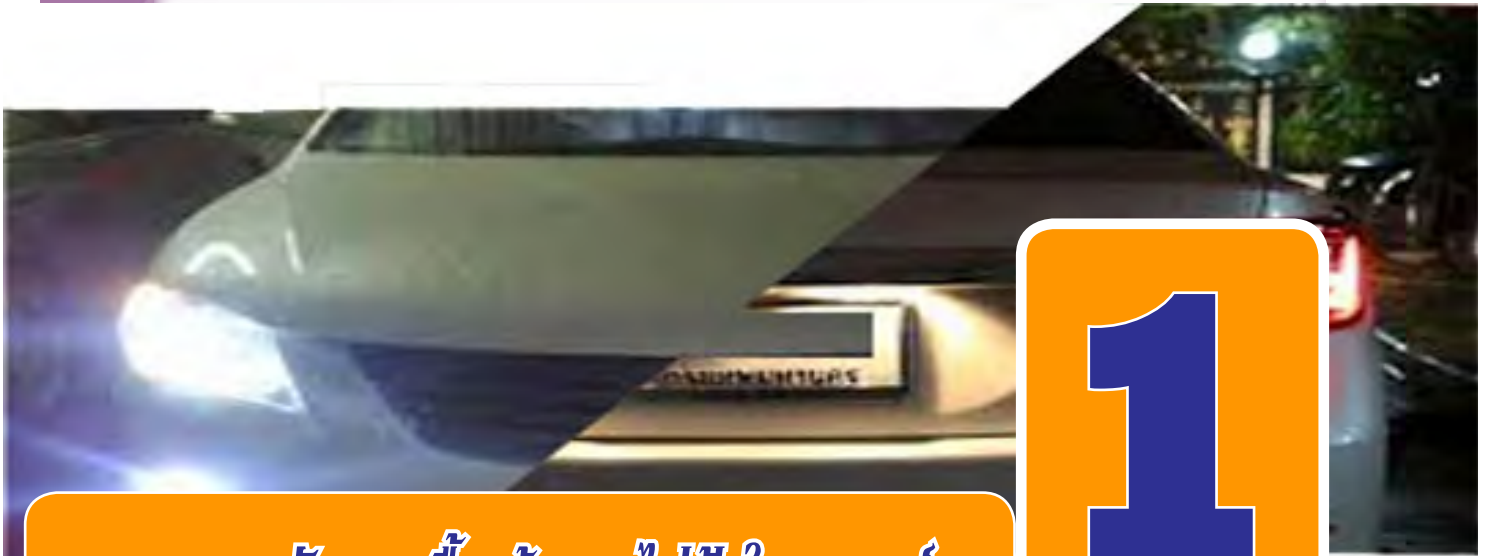
บทที่ 9 ระบบไฟแสงสว่างและอำนวยความสะดวก **174**

ประเภทของระบบไฟแสงสว่าง	176
งานถอดประกอบระบบแสงสว่าง	182
อุปกรณ์ป้องกันวงจร	189
ระบบอำนวยความสะดวก	198
ตัวอย่างวงจรพื้นฐาน	209
การทดสอบและการบำรุงรักษา	214
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	215
ใบงานที่ 9.1 การถอดประกอบหลอดไฟในรถยนต์	216
ใบงานที่ 9.2 การปรับตั้งไฟใหญ่	225

บทที่ 10 การใช้เครื่องมือวัดและเครื่องมือทดสอบระบบไฟฟ้ารถยนต์ **231**

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบไฟฟ้ารถยนต์	232
การตรวจสอบฟิวส์แบบเสียบหรือไขมีด	234
การตรวจสอบหลอดไฟใหญ่หน้าแบบ H4	238
การตรวจสอบหลอดไฟแบบขั้วขัด	240
การตรวจสอบหลอดไฟแบบขั้วสองด้าน	242

การตรวจสอบหลอดไฟแบบเสียบหรือแบบรูปเล่ม	244
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	247
ใบงานที่ 10.1 การใช้มัลติมิเตอร์	249
บทที่ 11 การถอดประกอบระบบไฟฟ้ารถยนต์	256
ขั้นตอนการถอดและเปลี่ยนหลอดไฟใหญ่หน้า	258
ขั้นตอนการถอดและเปลี่ยนหลอดไฟแบบขั้วขัด	263
ขั้นตอนการถอดและเปลี่ยนหลอดไฟแบบเสียบหรือแบบรูปเล่ม	264
ขั้นตอนการถอดและเปลี่ยนหลอดไฟเลี้ยวข้าง	265
ขั้นตอนการถอดและเปลี่ยนหลอดไฟท้ายแบบเสียบ	266
ขั้นตอนการถอดและเปลี่ยนหลอดไฟส่องป้ายทะเบียน	267
ขั้นตอนการถอดและเปลี่ยนหลอดไฟส่องสว่างภายในห้องโดยสาร (ไฟเก๋ง)	268
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	270
บทที่ 12 การตรวจสอบระบบไฟสัญญาณ	272
การตรวจสอบระบบไฟใหญ่หน้า	273
การตรวจสอบและซ่อมทำระบบไฟสัญญาณอื่นๆ	291
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	296
บทที่ 13 การตรวจสอบระบบไฟฟ้าเครื่องยนต์	298
การตรวจสอบระบบจุดระเบิด	299
การตรวจสอบระบบไฟชาร์จบนรถยนต์	307
ไฟรั่วในรถยนต์	312
แบบทดสอบและกิจกรรมการฝึกทักษะ	315
ใบงานที่ 13.1 ขั้นตอนการตรวจสอบสมรรถภาพแบตเตอรี่และระบบไฟรถยนต์	317
คำถามเพื่อการทบทวน	321
คำศัพท์	324
บรรณานุกรม	330



หลักการเบื้องต้นของไฟฟ้าในรถยนต์

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (Behavioral Objectives)

หลังจากศึกษาจบบทเรียนนี้แล้ว นักเรียนจะมีความสามารถดังนี้

1. อธิบายเกี่ยวกับไฟฟ้าและอะตอม
2. เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้า
3. อธิบายแรงดันไฟฟ้า
4. บอกชนิดของกระแสไฟฟ้า
5. สรุปกฎของโอห์ม
6. บอกส่วนประกอบพื้นฐานของวงจรไฟฟ้า
7. ต่อยวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม แบบขนาน และแบบผสม
8. คำนวณหาความต้านทานของวงจร



หลักการเบื้องต้น ของไฟฟ้าในรถยนต์

ก่อนที่ช่างยนต์จะทำงานเกี่ยวกับไฟฟ้ารรถยนต์นั้น จะต้องเข้าใจคำว่าไฟฟ้าคืออะไร และไฟฟ้าทำงานได้อย่างไร นักวิทยาศาสตร์พบว่าสิ่งต่าง ๆ ในโลกนี้ทำขึ้นจากประจุไฟฟ้าทั้งนั้น ซึ่งประจุไฟฟ้ามีอยู่ 2 ชนิด คือ **ประจุลบ (Negative Charge)** และ **ประจุบวก (Positive Charge)** ถ้าประจุเหล่านี้รวมตัวกันจำนวนมาก หรือรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน แล้วเกิดการเคลื่อนที่รอบ ๆ เรียกว่า **“ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า”** สำหรับในรถยนต์นั้น จำเป็นต้องนำ ไฟฟ้าไปใช้ในส่วนต่าง ๆ เช่น ให้แสงสว่าง ใช้หมุนเครื่องยนต์ ทำให้เกิดไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับจุดระเบิดใช้กับเครื่องวัดต่าง ๆ เครื่องปรับอากาศ วิทยุ และระบบควบคุมอื่น ๆ อีกมากมาย

จะเห็นได้ว่าไฟฟ้านั้นทำหน้าที่หลายอย่างในรถยนต์ เมื่อเข้าใจกฎเกณฑ์เบื้องต้นของระบบไฟฟ้าในรถยนต์แล้ว ย่อมทำให้การทำงานบริการเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้ารรถยนต์ได้ง่ายขึ้น ช่างยนต์ที่เข้าใจการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในรถยนต์ ย่อมสามารถหาข้อขัดข้องและแก้ไขระบบไฟฟ้าได้ถูกต้อง

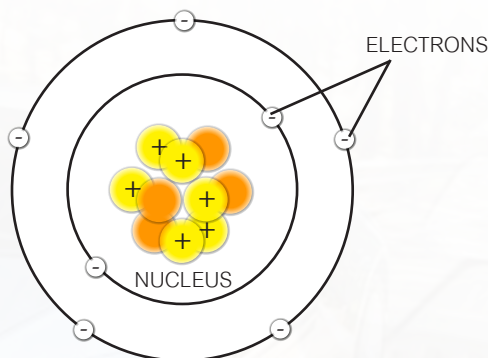


ไฟฟ้าและอะตอม

วัตถุที่อยู่ในจักรวาลนี้เป็นส่วนหนึ่งของสสาร (Matter) ทั้งสิ้น เนื่องจากสสารนั้นหมายถึง สิ่งที่มีตัวตน มีมวล มีน้ำหนัก และสามารถสัมผัสได้ ในโลก รอบ ๆ ตัวเราจะประกอบด้วยสสารอยู่ในลักษณะต่างกัน เช่น ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

สสารประกอบด้วยอนุภาคที่เล็ก ซึ่งเรียกว่า **อะตอม (Atom)** โดยอะตอมเหล่านี้ เมื่อรวมตัวกันเข้าเป็นกลุ่มตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไปจะเรียกว่า **โมเลกุล (Molecule)** โครงสร้างพื้นฐานของอะตอมของมวลสารทั้งหลายนั้น ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ นิวเคลียส (Nucleus) นิวตรอน (Neutron) โปรตอน (Proton) อิเล็กตรอน (Electron) และอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) จำนวนหนึ่ง โดยมีลักษณะดังนี้ คือ

1. แต่ละอะตอมประกอบด้วยโปรตอนและอิเล็กตรอนในจำนวนเท่ากัน
2. นิวเคลียสจะอยู่ตรงกลางของอะตอม ประกอบด้วยโปรตอนซึ่งมีประจุเป็นบวกและนิวตรอนซึ่งไม่มีค่าประจุใด ๆ
3. อิเล็กตรอนซึ่งมีค่าประจุเป็นลบ จะเคลื่อนที่เป็นวงแหวนโดยรอบนิวเคลียสของอะตอม
4. อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยูในวงแหวนรอบนอกสุดของอะตอม เรียกว่า **อิเล็กตรอนอิสระ** จะมีจำนวนมากสุดไม่เกิน 8 ตัว โดยถ้ามีจำนวนน้อยกว่า 4 ตัว แล้วจะทำให้สารหรือวัตถุนั้นเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของอะตอมอย่างง่าย

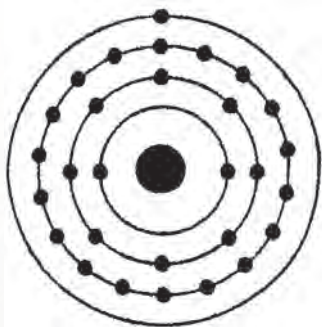
โดยปกติแล้ว อะตอมของสารแต่ละตัวจะต้องมีจำนวนนิวตรอน โปรตอน และอิเล็กตรอนเท่า ๆ กันอยู่ในสภาวะที่สมดุล หากอะตอมใดมีจำนวนของโปรตอนหรืออิเล็กตรอนแตกต่างกัน แล้ว จะทำให้อะตอมดังกล่าว นั้น อยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุล ตัวอย่างเช่น ถ้าอะตอมใดมีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าโปรตอนจะมีค่าประจุเป็นลบ ในทางตรงกันข้ามถ้าอะตอมใดมีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าโปรตอนจะมีค่าประจุเป็นบวก

เนื่องจากคุณสมบัติของนิวตรอนและโปรตอนจะอยู่ในสภาวะที่คงที่เสมอ ดังนั้น ในแต่ละอะตอมจะมีเพียงอิเล็กตรอนเท่านั้นที่เคลื่อนที่เป็นวงโคจรโดยรอบนิวเคลียส และมีอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งที่วิ่งวนอยู่ในวงโคจรรอบนอกสุด ซึ่งเรียกว่า **อิเล็กตรอนอิสระ** เพราะมันสามารถจะหลุดออกจากวงโคจรโดยง่ายเมื่อมีแรงใด ๆ ภายนอกมากกระทำต่ออะตอม ถ้าอะตอมของ

มวลสารใดที่สูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไปจำนวนหนึ่ง มวลสารดังกล่าว จะมีค่าประจุเป็นบวกเท่ากับจำนวนของอิเล็กตรอนอิสระที่หายไปนั้น ในทางตรงกันข้ามถ้าอะตอมของมวลสารใดได้รับอิเล็กตรอนอิสระจากอะตอมอื่นภายนอก มวลสารนั้นจะมีค่าประจุเป็นบวก

โครงสร้างอะตอมของไฮโดรเจนมีโครงสร้างของอะตอมที่ง่ายที่สุด ประกอบด้วยจำนวนของโปรตอน และอิเล็กตรอนอย่างละ 1 ตัวเท่านั้น แต่ในขณะที่โครงสร้างอะตอมของยูเรเนียมนั้นถือว่าเป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากที่สุด เนื่องจากมีจำนวนของโปรตอนและอิเล็กตรอนอยู่มากที่สุดอย่างละ 92 ตัว

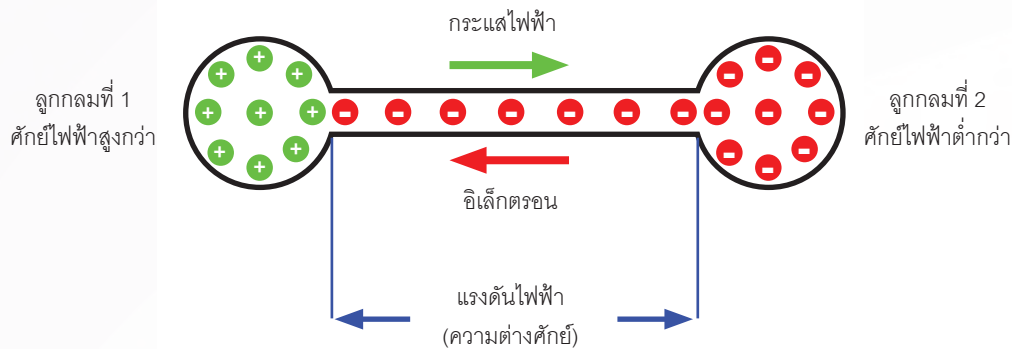
สำหรับโครงสร้างอะตอมของทองแดงจะประกอบด้วย จำนวนของโปรตอนและอิเล็กตรอนอย่างละ 29 ตัว โดยมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยรอบนิวเคลียสจำนวน 4 วง และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในวงนอกสุดเพียง 1 ตัว จึงทำให้ทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี (Good Conductor) เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนอิสระยังน้อยก็ยิ่งง่ายที่จะหลุดจากวงโคจรด้วยแรงไฟฟ้าต่ำ ๆ ทำให้กระแสไฟฟ้าจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่งสะดวกยิ่งขึ้น



รูปที่ 1.2 โครงสร้างอะตอมของทองแดง

โดยทั่วไปแล้ว อะตอมของมวลสารใดที่จำนวนอิเล็กตรอนอิสระในวงโคจรนอกสุดที่น้อยกว่า 4 ตัว มักจะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า (Conductor) แต่ถ้ามีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในวงโคจรนอกสุดที่มากกว่า 4 ตัว อิเล็กตรอนอิสระจะหลุดจากวงโคจรได้ยากกว่า จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่เลวหรือเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) นั่นเอง

ถ้ามีอิเล็กตรอนจำนวนมาก ๆ มารวมกันอยู่ที่ใดพื้นที่หนึ่งในอะตอม เรียกว่า ประจุไฟฟ้า (Charge of Electricity) แต่เมื่ออิเล็กตรอนเริ่มเคลื่อนที่ไปยังทิศทางหนึ่งทางใด เช่น วิ่งไปตามเส้นลวดตัวนำ จะเรียกผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ว่า **“กระแสไฟฟ้า (Electric Current)”**



รูปที่ 1.3 การไหลของอิเล็กตรอนในลวดตัวนำ

อันที่จริงแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ (Battery) เป็นตัวทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายจากส่วนหนึ่งของวงจรไปยังอีกส่วนหนึ่งของวงจร เมื่อต่อสายไฟฟ้าเข้ากับขั้วทั้งสองคือ ขั้วบวกและขั้วลบ อิเล็กตรอนที่มีอยู่เกินจำนวนทางขั้วลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะผลักอิเล็กตรอนอิสระให้หลุดออกไปจากอะตอมเคลื่อนที่ห่างจากขั้วลบไป อิเล็กตรอนจึงพากันดันผ่านไปตามวงจร (ประจุที่เหมือนกันจะผลักกัน แต่ประจุต่างกันจะดึงดูดซึ่งกันและกัน) และไหลไปยังขั้วบวก จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่แท้จริงก็คือ การไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วลบไปยังขั้วบวกนั่นเอง หรือเรียกว่า **กระแสอิเล็กตรอน (Electron Flow)** ดังนั้น จึงสรุปหรือให้คำจำกัดความว่า **“ไฟฟ้า (Electricity)”** หมายถึง การไหลของอิเล็กตรอนภายในตัวนำไฟฟ้าจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่ง

ไฟฟ้านั้นสามารถผลิตขึ้นมาได้ โดยการไหลของอิเล็กตรอน ซึ่งอาจพิสูจน์ได้โดยการนำเอาวัตถุที่มีประจุบวกและประจุลบมาต่อเข้าด้วยกัน ด้วยเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่มีจำนวนมากในวัตถุที่มีประจุลบก็จะถูกดึงเข้าไปเสริมในวัตถุที่มีประจุบวก เพื่อให้เกิดความสมดุลขึ้นในอะตอมที่อยู่ติดกัน จึงเป็นเหตุให้การไหลของอิเล็กตรอน ซึ่งก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้านั่นเอง

ก่อนที่จะมีทฤษฎีของอิเล็กตรอนดังกล่าวมาแล้วนี้ **เบนจามิน แฟรงคลิน (Benjamin Franklin)** นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันได้ค้นพบไฟฟ้าสถิต โดยการทดลองนำเอาแท่งอำพันถูกับแท่งแก้ว แต่ในขณะนั้น ยังไม่ได้มีนิยามที่ชัดเจนนักว่าไฟฟ้าคืออะไร เพียงแต่มีความเชื่อกันว่าไฟฟ้าเป็นสิ่งที่เรียกได้ว่า **“กระแส (Current)”** ซึ่งเคลื่อนที่จากด้าน (ขั้ว) บวกไปด้าน (ขั้ว) ลบ และเป็นเพียงเรื่องที่ตกลงกันเท่านั้น จึงเรียกทางเดินของกระแสว่า กระแสไฟฟ้าสมมติ (Conventional Direction of Current Flow) แต่ในปัจจุบันนี้ ได้ยอมรับทฤษฎีการไหลของอิเล็กตรอน (Theory of Electron Flow) ซึ่งสรุปได้ว่า การไหลของอิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วลบ (เกิดจากการรวมตัวอย่างหนาแน่นของอิเล็กตรอน) ไปยังขั้วบวก (มีจำนวนอิเล็กตรอนที่น้อยกว่า)



ตัวนำและฉนวนไฟฟ้า

ไฟฟ้าเกิดขึ้นได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนต้องการทางเดินหรือวงจรที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ ซึ่งมีสารบางชนิดที่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลหรือกระแสไฟฟ้าผ่านได้ดี เช่น เงิน ทองแดง เหล็ก อะลูมิเนียม และโลหะอื่น ๆ สารที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านอย่างดีนี้ ถูกเรียกว่า **“ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)”** แต่ยังมีสารบางชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มของอโลหะ เช่น แก้ว ยาง และไม้ มักจะไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ เนื่องจากมีความต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูง สารเหล่านี้เรียกว่าสารไม่ใช้ตัวนำไฟฟ้า (Nonconductor) หรือ **“ฉนวนไฟฟ้า (Insulation)”** นอกจากนี้แล้ว ยังมีสารบางชนิดที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไม่ดีเท่ากับตัวนำไฟฟ้าแต่ก็ดีกว่าฉนวนไฟฟ้า ตัวอย่าง เช่น ซิลิกอน และเยอรมาเนียม เป็นต้น ซึ่งเรียกลักษณะดังกล่าวนี้ว่า **“สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)”** ดังนั้น จึงสามารถจำแนกสารตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

ตัวนำไฟฟ้า เป็นสารที่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลหรือกระแสไฟฟ้าผ่านได้ดี เนื่องจากว่าโดยทั่วไปแล้ว อะตอมของสารในกลุ่มนี้มักจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ (ในวงโคจรนอกสุด) น้อยกว่า 4 ตัว จึงทำให้อิเล็กตรอนง่ายต่อการหลุดออกจากวงโคจรแม้มีแรงดันไฟฟ้าต่ำ เป็นเหตุให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ง่าย โลหะส่วนใหญ่จะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งทองแดงนั้น นอกจากจะนำไฟฟ้าได้ดีแล้วยังมีราคาไม่แพงมากนักเมื่อเทียบกับตัวนำไฟฟ้าอื่น ๆ จึงเป็นที่นิยมใช้ทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าในทางอุตสาหกรรมกันแพร่หลายในปัจจุบันนี้

ฉนวนไฟฟ้า เป็นสารที่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลหรือกระแสไฟฟ้าผ่านได้น้อยมาก มักจะเป็นกลุ่มของสารที่มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระของอะตอมมากกว่า 4 ตัว จึงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรค่อนข้างยาก ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นกลุ่มของอโลหะต่าง ๆ นิยมใช้เป็นที่หุ้มป้องกันเส้นลวดนำไฟฟ้าและส่วนที่เป็นโลหะของเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ ฉนวนไฟฟ้าทำหน้าที่คอยรักษาไม่ให้อิเล็กตรอนอิสระ (หรือกระแสไฟฟ้า) รั่วผิดทาง ซึ่งอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้หรือป้องกันไฟฟ้าทำอันตรายแก่ผู้ประกอบกันได้

สารกึ่งตัวนำ เป็นสารที่มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระของอะตอมเท่ากับ 4 ตัวพอดี จึงทำให้มีคุณสมบัติทั้งเป็นตัวนำและฉนวนไฟฟ้าไปในตัว โดยปกติแล้ว สารกึ่งตัวนำจะมีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงกว่าสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำกว่าสารที่เป็นฉนวนไปในตัวด้วย โดยคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิของระบบเปลี่ยนไป สารกึ่งตัวนำถ้าอยู่ในสถานะบริสุทธิ์จะไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ปฏิบัติงานในอุตสาหกรรม จึงต้องเติม (Dope) สารบางอย่างลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น

นอกจากนี้แล้ว โลกของเราก็ถือว่าเป็นสารตัวนำก้อนใหญ่ก้อนหนึ่ง ถ้านำเอาวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าไปต่อเข้ากับโลกด้วยสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า แล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังโลกได้ วิธีการต่อตัวนำไฟฟ้าเข้ากับโลกนี้เรียกว่า **“การลงดิน (Grounding)”**

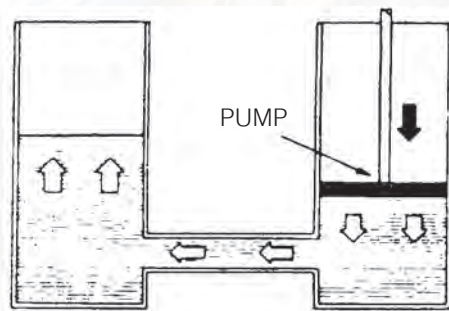
ฉนวนไฟฟ้าบางชนิด เช่น ยาง ผ้า กระดาษ และวัสดุที่นำมาทำการฉนวนส่วนที่ใช้งานอื่น ๆ ในรถยนต์นั้น โดยทั่วไปแล้ว ยังไม่สามารถที่จะเป็นฉนวนที่สมบูรณ์ได้นัก ยังปรากฏมีกระแสไฟฟ้าจำนวนน้อยรั่วหรือไหลผ่านได้ เช่น กระแสไฟฟ้าที่รั่วที่สารคอยล์จุดระเบิด หรือ สายหัวเทียน เป็นต้น



แรงดันไฟฟ้า

การไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ ก็เนื่องจากมีความแตกต่างกันระหว่างด้านประจุบวกและด้านประจุลบ ซึ่งสามารถนำเอาลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าไปเปรียบเทียบกับ การไหลของกระแสน้ำได้ โดยปกติแล้ว ธรรมชาติของกระแสน้ำนั้นจะไหลจากตำแหน่งที่มีระดับสูงกว่าไปยังตำแหน่งที่มีระดับต่ำกว่าเสมอด้วยกระแสน้ำมีพลังงานรูปหนึ่งแฝงอยู่ ดังนั้น เมื่อมีความแตกต่างกันในระดับความสูงของน้ำ ซึ่งนั่นคือความแตกต่างระดับน้ำ (Water Head) จึงเป็นเหตุทำให้เกิดการไหลของกระแสน้ำขึ้นได้

สำหรับกระแสไฟฟ้าก็เช่นเดียวกันกับกระแสน้ำ จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ ก็ต่อเมื่อเกิดมีความแตกต่างของระดับ ความแตกต่างของไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นนั่นเอง จะเรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า **“แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage)”** ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับแรงดันของน้ำ



รูปที่ 1.4 แรงดันของน้ำในถัง

พิจารณาแรงดันของน้ำในถัง 2 ใบ (ดังรูปที่ 1.4) เริ่มต้นจากการเติมน้ำไว้ให้มีระดับเท่ากัน พร้อมทั้งต่อท่อน้ำเข้ากับถังทั้งสอง น้ำจากถังทั้งสองจะไม่มีไหลไปหากันเพราะไม่มีความแตกต่างของระดับและแรงดัน แต่ถ้านำเอาปั๊ม (Pump) ไปติดตั้งยังถังทางขวามือและทำการปั๊มให้น้ำในถังนั้นมีแรงดันสูงขึ้น ทำให้เกิดมีความแตกต่างของแรงดันระหว่างถังทั้งสอง น้ำจากถังที่มีแรงดันสูงกว่าก็จะไหลไปสู่ถังที่มีแรงดันต่ำกว่าทันที ปริมาณของน้ำที่ไหลนี้จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันของปั๊มที่กำหนดให้

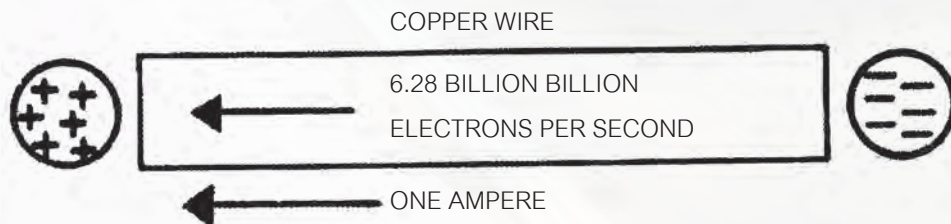
ในทำนองเดียวกัน การไหลของกระแสไฟฟ้าก็เป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ นั่นก็คือ แรงดันหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะไหลจากด้านที่มีศักย์สูงไปสู่ด้านที่มีศักย์ต่ำกว่า กระแสน้ำนั้นจะมีการไหลจากถังที่มีระดับน้ำสูงกว่าไปสู่ถังที่มีระดับน้ำต่ำกว่า จนกระทั่งน้ำในถังทั้งสองมีระดับเท่ากันจึงจะหยุดไหล กระแสไฟฟ้าก็เช่นเดียวกันจะไหลจากด้านที่มีประจุลบ (ศักย์สูง) ไปสู่ด้านประจุลบ (ศักย์ต่ำ) จนกระทั่งไม่มีความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเกิดขึ้นหรือมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน

สรุปได้ว่า แรงดันไฟฟ้า คือ แรงเคลื่อนหรือแรงดันที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสในตัวนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) โดยใช้อักษร V เป็นสัญลักษณ์แทนการวัดแรงดันไฟฟ้า กระทำได้โดยต่อโวลต์มิเตอร์ขนาน (Parallel) กับวงจร



ชนิดของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า (Current) หมายถึง อัตราการไหลของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) หรือจำนวนอิเล็กตรอนต่อวินาที แต่ที่นิยมใช้กันแพร่หลายทั่วไปจะใช้อักษรตัว A เป็นสัญลักษณ์แทนการวัดแรงดันไฟฟ้า กระทำได้โดยต่อแอมป์มิเตอร์อนุกรม (Series) กับวงจร โดยให้นิยามกระแสไฟฟ้า 1 A มีค่าเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอน 6.28 ล้านล้านอนุภาค (Billion Billion) ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าในเวลา 1 วินาที



รูปที่ 1.5 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้า 1 A

โดยทั่วไปแล้ว สามารถแบ่งประเภทของกระแสไฟฟ้าตามลักษณะการไหลของกระแสจากต้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกเป็น 2 ประเภท คือ ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ

ตามปกติกระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วลบผ่านตลอดวงจรที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกลับเข้าไปยังขั้วบวก เมื่อยังจ่ายกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็ยังคงมีกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและทิศทางเดียวกันตลอดเวลาระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งจะเรียกว่า **“ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current หรือ D.C.)”** เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงได้แก่ แบตเตอรี่รถยนต์ ถ่านไฟฉาย และไฟฟ้าจากพลังงานแสงแดด เป็นต้น

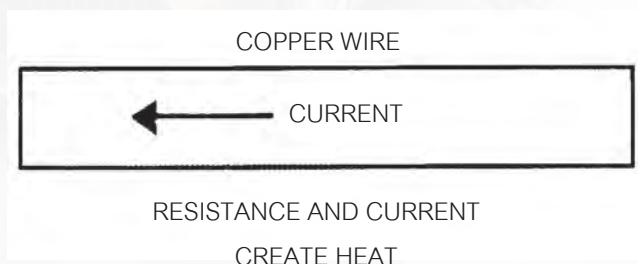
ในทางตรงกันข้าม กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ชั่วเปลี่ยนแปลงไปอยู่ตลอดเวลา อาจจะเป็นผลมาจากการใช้พลังงานกลในการผลิตกระแสไฟฟ้า จึงเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและทิศทางเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งเรียกว่า **“ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current หรือ A.C.)”** ตัวอย่างเช่น ไฟฟ้าตามบ้านเรือนและโรงงานต่าง ๆ ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่ามีทิศทางการไหล แรงดัน และชั่วเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในรถยนต์ จึงต้องมีอุปกรณ์บางอย่างมาทำการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงเสียก่อน จึงจะนำเอาไปประจุเข้ากับแบตเตอรี่ได้



ความต้านทานไฟฟ้า

การไหลของอิเล็กตรอนทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าขึ้น โดยฉนวนไฟฟ้าจะให้ความต้านทานสูงสุด ส่วนตัวนำไฟฟ้านั้นมีความต้านทานเพียงเล็กน้อย ด้วยเหตุนี้เองตัวนำที่ดีที่สุด เช่น ลวดทองแดงจะให้ความต้านต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในตัวมันเพียงเล็กน้อย เพราะแรงดันเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันตลอดเส้นลวด นอกจากนี้แล้ว การชนกันของอิเล็กตรอนทำให้เกิดความต้านทาน และเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวนำได้



รูปที่ 1.6 แสดงความต้านทานไฟฟ้า

ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ

1. ชนิดของวัสดุหรือสาร (Material)
2. พื้นที่หน้าตัด (Cross Section Area) โดยแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด
3. ความยาว (Length) โดยแปรผันตามความยาว
4. อุณหภูมิ (Temperature) วัสดุส่วนมากถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีความต้านทานเพิ่มขึ้น

ความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยวัดเป็นโอห์ม (Ohm) ซึ่งใช้ W เป็นสัญลักษณ์ การวัดความต้านทานนั้นกระทำได้โดยใช้โอห์มมิเตอร์วัดตัวนำไฟฟ้า โดยนิยามความต้านทาน 1 โอห์ม คือ ความต้านที่ยอมให้แรงดัน 1 โวลต์ผลักดันให้กระแสไหลได้ 1 แอมแปร์



กฎของโอห์ม

กฎของโอห์ม แสดงถึงความสัมพันธ์เกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งนิยามไว้ดังนี้ คือ “การไหลของกระแสผ่านตัวนำไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ตัวนำ และเป็นปฏิกิริยาโดยกลับกับความต้านทานไฟฟ้าในตัวนำ” ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการของความสัมพันธ์เป็น

$$I = \frac{E}{R}$$

เมื่อ

I = กระแสไฟฟ้า (A)

E = แรงดันไฟฟ้า (V) และ

R = ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

นอกจากนี้แล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า อาจจะเขียนอยู่ในรูปของกำลังงานไฟฟ้า โดยนิยามไว้ว่า **กำลังงานไฟฟ้า (Electrical Power)** คือ กำลังงานที่ได้จากแรงดัน ผลักดันให้มีกระแสไหลในวงจรมีหน่วยวัดเป็นวัตต์ (Watt) ใช้อักษรตัว W เป็นสัญลักษณ์ การวัดกำลังงานไฟฟ้ากระทำได้โดยใช้วัตต์มิเตอร์โดยตรง หรือแอมป์มิเตอร์แล้วคำนวณได้จากสูตรดังนี้ คือ

$$\text{กำลังงานไฟฟ้า (W)} = \text{แรงดัน (V)} \times \text{กระแส (A)}$$

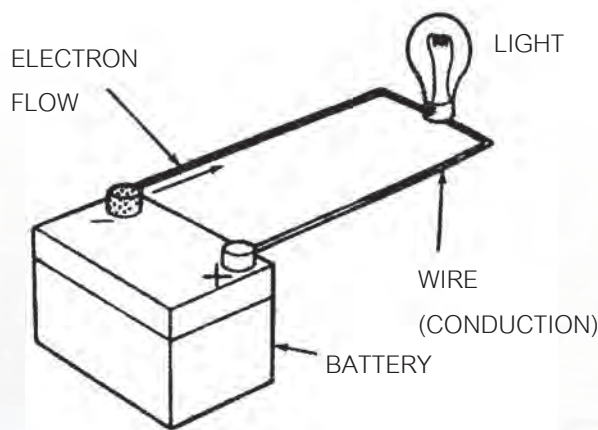
ดังนั้น กำลังงานไฟฟ้า 1 วัตต์ คือ แรงดันไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ ดันให้มีกระแสไฟฟ้าจำนวน 1 แอมแปร์ ไหลในวงจร



วงจรไฟฟ้า

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย ถ้าปราศจากทางเดินให้กระแสไหลผ่าน ถึงแม้ว่าจะกำหนดแรงดันไฟฟ้าให้ก็ตาม ทางเดินของกระแสไฟฟ้านี้เรียกว่า **“วงจรไฟฟ้า (Electrical Circuits)”** วงจรไฟฟ้าพื้นฐานประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ

1. แหล่งจ่ายแรงดันหรือแหล่งกำเนิดพลังงาน (Voltage Source) เช่น แบตเตอรี่
2. ตัวต้านทาน (Resistor) เช่น หลอดไฟฟ้า
3. ตัวนำไฟฟ้า (Conductor) เช่น ลวดทองแดง ซึ่งต่อให้เกิดเป็นวงจร



รูปที่ 1.7 แสดงวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย

โดยปกติแล้ว มีการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้งานอยู่ 3 แบบ คือ วงจรอนุกรม (Series Circuit) วงจรขนาน (Parallel Circuit) และวงจรผสม (Series & Parallel Circuit) โดยในแต่ละแบบ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนี้ คือ

วงจรอนุกรม เป็นการต่อตัวต้านทานตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกัน ตัวต้านทาน (หรืออุปกรณ์ไฟฟ้า) ที่นำมาต่ออนุกรม จะต้องได้รับกระแสในปริมาณเท่ากันหมด แต่ไม่จำเป็นต้องเป็นชนิดเดียวกันทำให้ความต้านทานรวมของวงจรสูงขึ้น