

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 คำนำ

เนื้อหา ในส่วน นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยเรียงลำดับตั้งแต่การทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีของแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎีและส่วนประกอบทางด้านกังหันลมและ ทฤษฎีการผสมเรซินหล่อใส ซึ่งจะช่วยให้สามารถเข้าใจถึงโครงสร้างและระบบการทำงานของ กังหันลมพลังงานแม่เหล็กสำหรับการผลิตไฟฟ้าในโครงการวิจัยนี้ได้ดียิ่งขึ้น

2.2 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

ทฤษฎีแม่เหล็ก ไฟฟ้า ที่เกี่ยวข้องกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ในโครงการนี้จะแบ่งเป็นทฤษฎีแม่เหล็กถาวร, ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า, การแบ่งประเภทของวัสดุแม่เหล็ก, และทฤษฎีสนามแม่เหล็ก

2.2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กถาวร

2.1.1.7 ประเภทของแม่เหล็กถาวร

ก) Neodymium Magnets แม่เหล็กประเภทนี้จะมีแรงดูดสูง มีคุณสมบัติ และประสิทธิภาพสูงสุดในประเภทของแม่เหล็กถาวร เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนมากใช้ประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้าเครื่องแยกเศษเหล็ก เครื่องจักรต่างๆ ฮาร์ดดิสก์ มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เซนเซอร์ ฯลฯ



รูปที่ 2.1 แม่เหล็กประเภท Neodymium

ข) Ferrite Magnets (Ceramic) แม่เหล็กประเภทนี้จะมีราคาถูกกว่าแม่เหล็กประเภท

อื่นๆ และนับว่า เป็นแม่เหล็กที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด เพราะคุณสมบัติ หลายๆ ด้าน และทนความร้อน ส่วนมากใช้ประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ทางด้านวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรม อุปกรณ์การสื่อสาร ของเล่น ฯลฯ



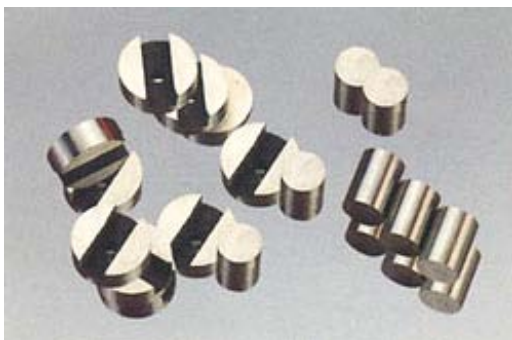
รูปที่ 2.2 แม่เหล็กประเภท Ferrite Magnets

ค) SmCo Magnets แม่เหล็กประเภทนี้มีแรงดูดสูงเหมาะสำหรับ งานหลายประเภทที่ทนความร้อนสูง และทนต่อการกัดกร่อน ส่วนมากใช้ประกอบในเครื่องมือ นาฬิกา เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แม่พิมพ์ ฯลฯ



รูปที่ 2.3 แม่เหล็กประเภท SmCo Magnets

ง) AlNiCo Magnets เป็นแม่เหล็กที่ทนต่ออุณหภูมิสูง และทนต่อ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี ส่วนมากใช้ประกอบในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน เครื่องมือวัด แม่พิมพ์ ฯลฯ



รูปที่ 2.4 แม่เหล็กประเภท AlNiCo Magnets

2.2.2 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

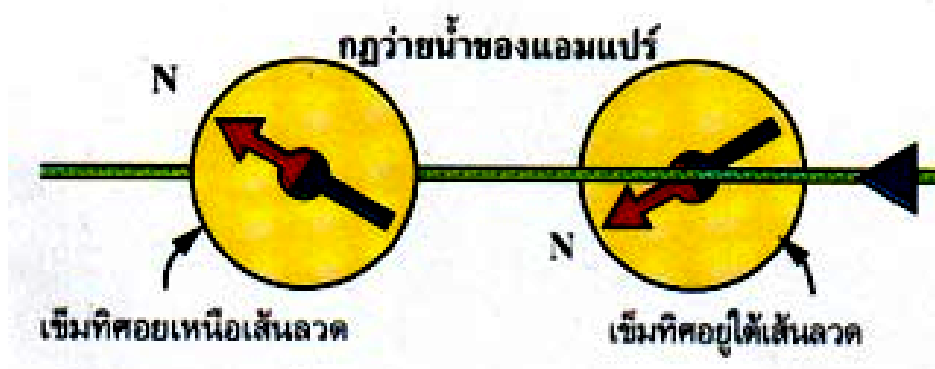
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ เส้นลวด ลักษณะของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นลวดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้เขียนได้โดยวิธีเดียวกับสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ผลที่เกิดขึ้นเรียกว่า “แม่เหล็กไฟฟ้า” ซึ่งใช้สร้างแม่เหล็กที่มีกำลังสูง และ ใช้สำหรับทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของสนามแม่เหล็ก

2.2.2.1 กฎำยน้ำของแอมแปร์

กล่าวว่ำ ขั้วเหนือของเข็มทิศซึ่งวางอยู่ใกล้เส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะเบนไปทางมือซ้าย ของคนที่ว่ายน้ำไปในทิศทางที่กระแสไหล โดยหันหน้าเข้าหาเส้นลวด



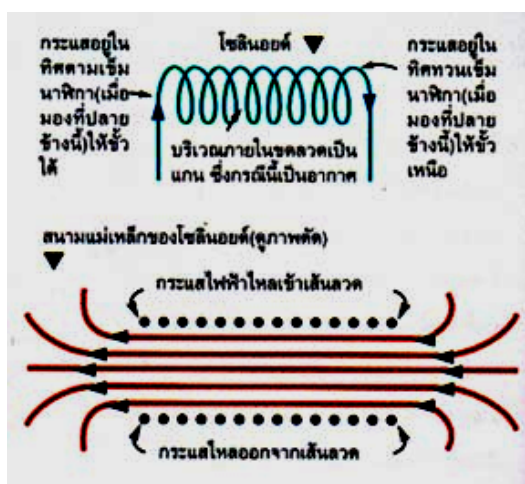
รูปที่ 2.6 กฎำยน้ำของแอมแปร์

ขดลวด (Coil) หมายถึงขดลวดหลายๆ รอบที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำได้โดยใช้เส้นลวดพันรอบวัตถุที่เป็นแกน ตัวอย่างเช่นขดลวดแบนและโซลินอยด์

ขดลวดแบน (Flat coil or plane coil) เป็นขดลวดที่มีความยาวน้อยเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง

โซลินอยด์ (Solenoid) เป็นขดลวดที่มีความยาวมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางสนามแม่เหล็กที่เกิดจากโซลินอยด์คล้ายกับแท่งแม่เหล็ก ตำแหน่งของขั้วขึ้นอยู่กับการไหลของกระแสไฟฟ้า

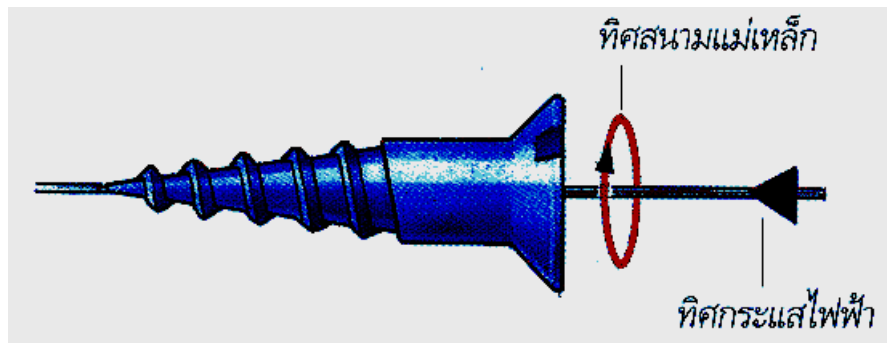
แกน (Core) เป็นวัตถุที่ใช้เป็นแกนของขดลวดเป็นสิ่งบอกความเข้มสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กชั่วคราว หรือเหล็กอ่อนทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง และนิยมใช้ทำแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 สนามแม่เหล็กของโซลินอยด์

2.2.2.2 กฎสกรูของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's screw rule)

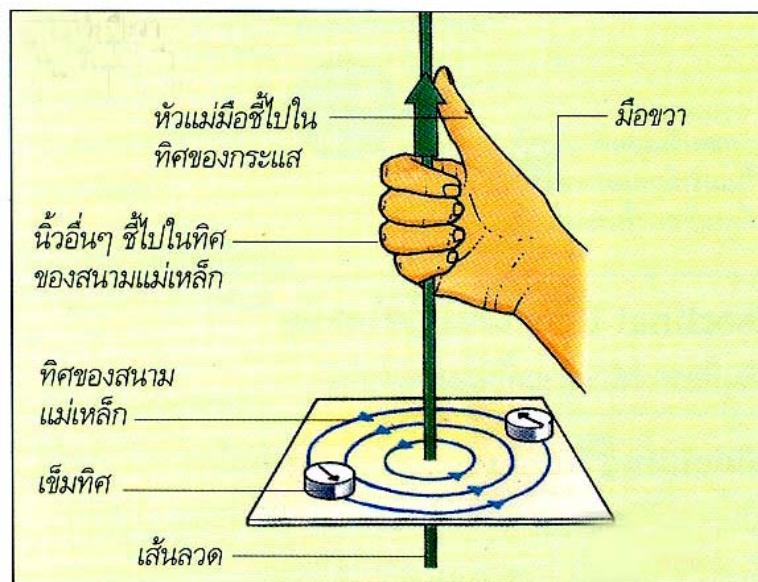
กล่าวว่าทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะอยู่ในทิศที่สกรูหมุนเมื่อกันสกรูเข้าไปตามทิศของกระแสไฟฟ้า

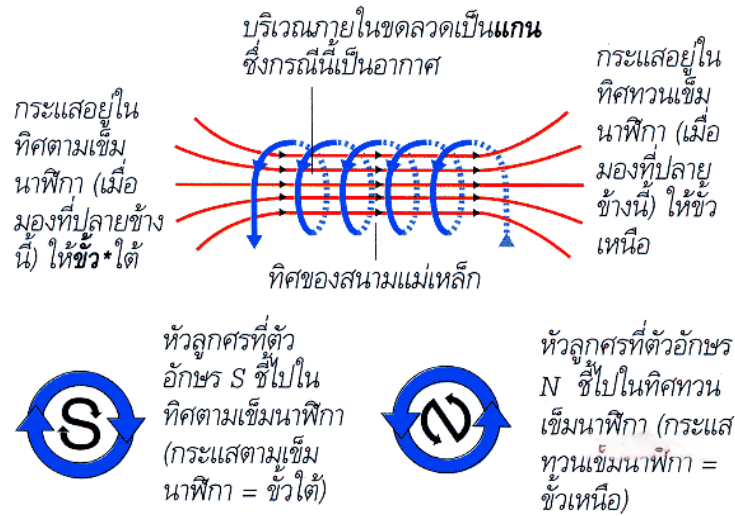


รูปที่ 2.8 กฎสกรูของแมกซ์เวลล์

2.2.2.3 กฎกำมือขวา (Right -hand grip rule)

กล่าวว่า ทิศของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดอยู่ในแนวนิ้วมือขวาที่กำรอบเส้นลวด โดยที่นิ้วหัวแม่มือชี้ไปตามทิศของกระแสในเส้นลวด

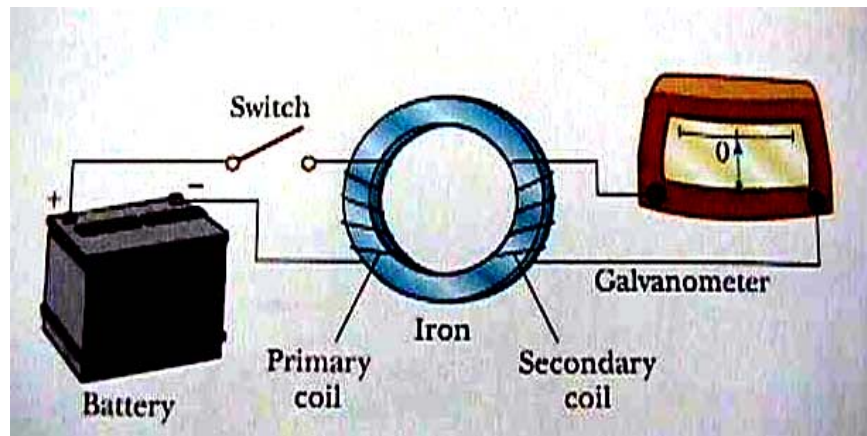




รูปที่ 2.9 กฎกำมือขวา

2.2.2.4 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

ไมเคิล ฟาราเดย์ พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสนามแม่เหล็กจะมีผลให้เกิดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในตัวนำนั้น เรียกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเกิดขึ้นเสมอในตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง

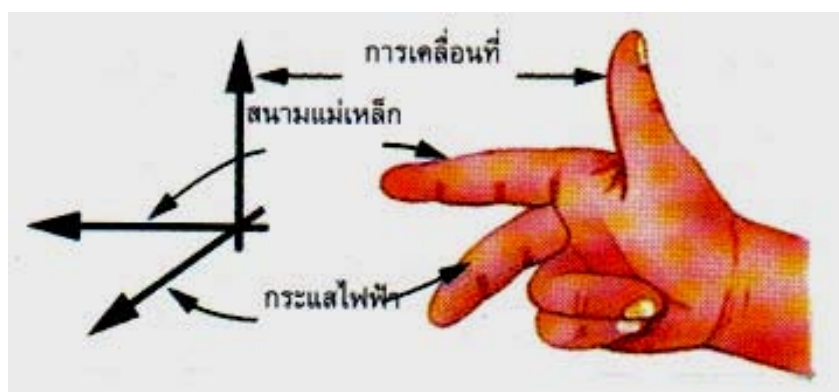


รูปที่ 2.10 ชุดการทดลองของฟาราเดย์

กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ กล่าวว่าขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำ เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก

กฎของเลนซ์กล่าวว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นเพื่อขัดขวางสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่น ในมอเตอร์ไฟฟ้า จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นเสมือนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพื่อขัดขวางแรงเคลื่อนไฟฟ้า (e.m.f) ที่ต่อไว้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์นั้น

กฎมือขวาของเฟรมมิงหรือกฎไดนาโมกล่าวว่าทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำหาได้จาก ทิศของสนามแม่เหล็ก และทิศการเคลื่อนที่โดยใช้มือขวา

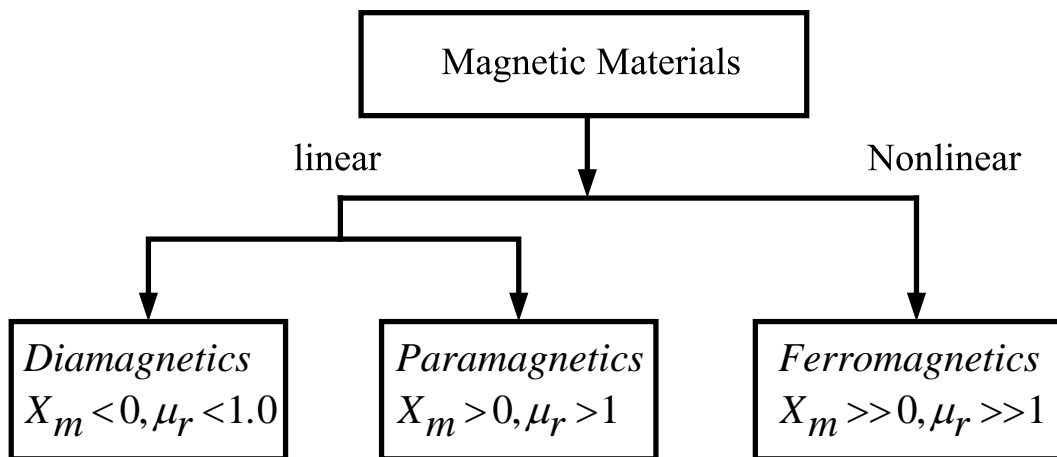


รูปที่ 2.11 กฎมือขวาของเฟรมมิง

2.2.3 การแบ่งประเภทของวัสดุแม่เหล็ก (Classification of Magnetic Materials)

โดยทั่วไปเราใช้ x_m (Magnatisatig reactance) หรือ μ_r (Relative permeability) เพื่อแบ่งประเภทของวัสดุในทอมของคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ถ้า $x_m = 0$ (หรือ $\mu_r = 1$) เราเรียกว่า วัสดุนั้นไม่เป็นแม่เหล็ก (Nonmagnetic) แต่ถ้าวัสดุใดไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวถือว่าเป็นแม่เหล็ก

วัสดุแม่เหล็กแบ่งอย่างกว้างๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ ไดอามกเนติก (Diamagnetic) , พาราแมกเนติก (Paramagnetic) , และเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ดังรูป



รูปที่ 2.12 ประเภทของวัสดุในทอมของคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

วัสดุใดที่เป็นไดอะแมกเนติกมี $\mu_r \sim < 1$ หรือ x_m เป็นลบเล็กน้อย, วัสดุที่เป็นพาราแมกเนติกมี $\mu_r \sim > 1$ หรือ x_m เป็นบวกเล็กน้อย และถ้าวัสดุมี $\mu_r \gg 1$ หรือ x_m เป็นบวกมาก วัสดุนั้นจะเป็นเฟอร์โรแมกเนติก

2.2.3.1 ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic)

ไดอะแมกเนติก เกิดขึ้นในวัสดุที่มีสนามแม่เหล็ก ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอนเองหักล้างซึ่งกันและกัน โมเมนต์แม่เหล็กถาวร (อินทรีนสิก) ของแต่ละอะตอมเป็นศูนย์ วัสดุนิดนี้จึงได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อย (เช่น บิทมัส, ตะกั่ว, ทองแดง, ซิลิคอน, เพชร, โซเดียมคลอไรด์)

วัสดุประเภท ตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) เมื่ออุณหภูมิใกล้ศูนย์สัมบูรณ์จะเปลี่ยนเป็นวัสดุไดอะแมกเนติกสมบูรณ์ คือมีค่า $x_m = -1$ หรือ $\mu_r = 0$ และ $B = 0$ ดังนั้น ตัวนำยิ่งยวดจึงไม่มีสนามแม่เหล็กวัสดุไดอะแมกเนติก (ยกเว้นตัวนำยิ่งยวด) แทบจะไม่ได้นำมาใช้งาน

วัสดุที่อะตอมมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรไม่เป็นศูนย์ อาจเป็นพาราแมกเนติกหรือเฟอร์โรแมกเนติกก็ได้

2.2.3.2 พาราแมกเนติก (Paramagnetic)

พาราแมกเนติก เกิดขึ้นในวัสดุที่มีสนามแม่เหล็ก ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส และการหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอนเองที่ไม่หักล้างกันอย่างสมบูรณ์ (ต่างกับไดอะแมกเนติก) วัสดุพาราแมกเนติก (เช่น อากาศ, พลาตินัม, ทังสแตน, โปแทสเซียม) นิยมใช้งานในตัวส่งคลื่นวิทยุ

2.2.3.3 เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic)

เฟอร์โรแมกเนติก เกิดขึ้นในวัสดุซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรขนาดใหญ่อยู่ในอะตอมวัสดุ เฟอร์โรแมกเนติก เช่น เหล็ก, โคบอลต์, นิกเกิล, และอัลลอย ปกติมักใช้วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก มากกว่าวัสดุไดอะแมกเนติกและพาราแมกเนติก

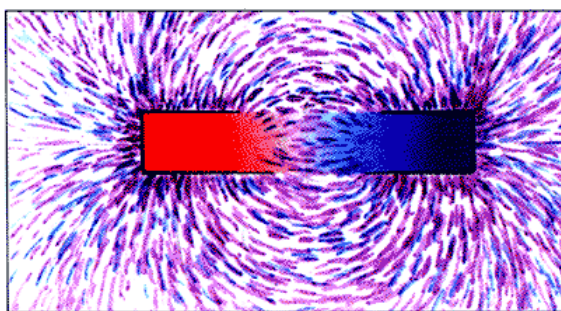
วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติที่สำคัญดังต่อไปนี้

- ใช้สนามแม่เหล็กสร้างเป็นแม่เหล็กได้ และได้แรงมาก
- เมื่อนำออกมาจากสนามแม่เหล็กยังคงเก็บความเป็นแม่เหล็กได้มาก
- เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิเคอริ (Curie Temperature) วัสดุนี้จะสูญเสียคุณสมบัติความเป็นเฟอร์โรแมกเนติก (ไม่เป็นเชิงเส้น) และเปลี่ยนเป็นวัสดุพาราแมกเนติกที่เป็นเชิงเส้น เช่นถ้าให้ความร้อนเกินกว่าอุณหภูมิเคอริ (กรณีของเหล็กเป็น 770°C) แก่แม่เหล็กถาวร จะสูญเสียสภาพแม่เหล็ก

2.2.4 ทฤษฎีสานแม่เหล็ก

2.2.4.1 เส้นแรงแม่เหล็ก หรือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic field lines or flux lines)

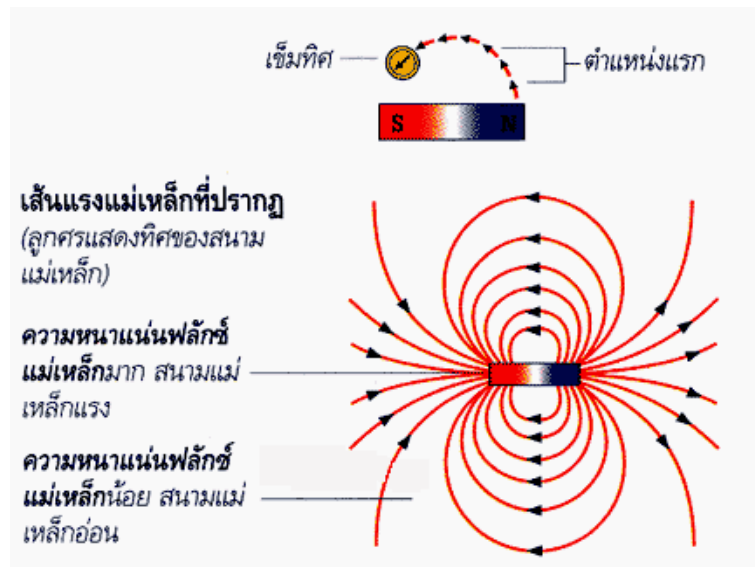
เป็นเส้นที่แสดงทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก นอกจากนั้นยังแสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วย ทิศของสนามคือ ทิศของแรงนี้กระทำกับขั้วเหนือ ในสนามแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กแสดงให้เห็นได้โดยใช้ผงเหล็กโรยรอบๆ แท่งแม่เหล็ก หรือการระบุตำแหน่งของเข็มทิศเล็กๆ ณ จุดต่างๆ รอบๆ แท่งแม่เหล็กผลของการโรยผงเหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก ผงเหล็กจะเรียงตัวเนื่องจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก



รูปที่ 2.13 ผงเหล็กที่โรยรอบๆ แท่งแม่เหล็ก

2.2.4.2 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)

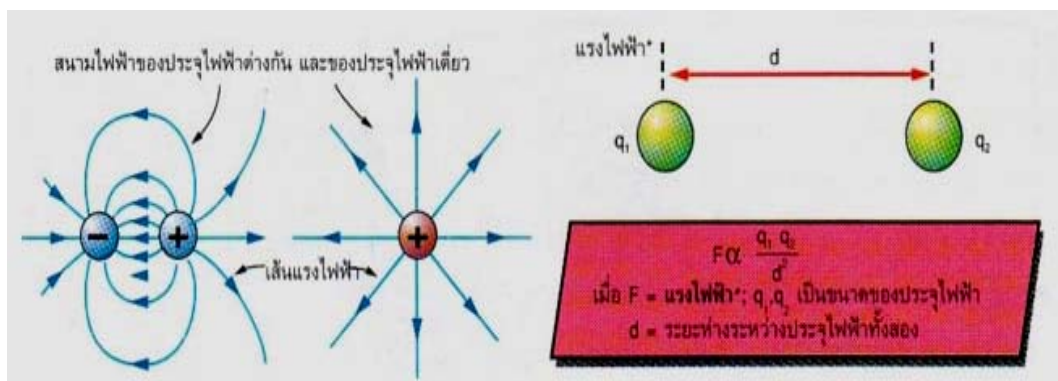
เป็นการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดๆหนึ่ง แสดงได้โดย เส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ชิดกัน โดยปกติความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากรอบๆขั้ว



รูปที่ 2.14 เส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก

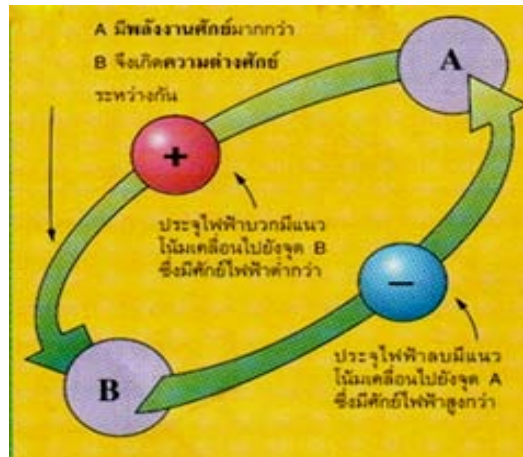
2.2.4.3 ศักย์ไฟฟ้าและความจุไฟฟ้า

ความแตกต่างของประจุไฟฟ้าใดๆ เป็นเหตุให้เกิดสนามไฟฟ้า เช่น สนามของแรง ซึ่งเกิดจากอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าออกแรงไฟฟ้ากระทำกัน ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่จุดหนึ่งคือ แรงที่กระทำกับประจุไฟฟ้าบวกหนึ่งหน่วยที่จุดนั้น และมีทิศตามที่ประจุจะเคลื่อนที่ ถ้าวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ในสนามไฟฟ้าจะมีพลังงาน



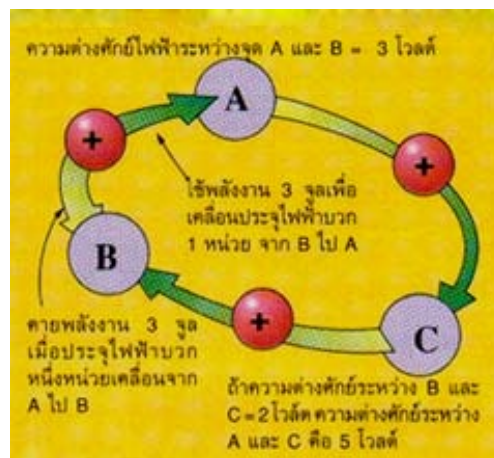
รูปที่ 2.15 สนามไฟฟ้าของประจุไฟฟ้าต่างกัน และประจุเดี่ยว

ศักย์ไฟฟ้า(Potential) เป็นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับประจุไฟฟ้าที่จุดหนึ่งในสนามไฟฟ้า เนื่องจากแรงที่กระทำกับประจุไฟฟ้านั้น พลังงานของประจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดของประจุและศักย์ไฟฟ้าที่จุดนั้น ประจุไฟฟ้าบวกจะมีแนวโน้มเคลื่อนที่เข้าสู่จุดที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่านั้น คือ เคลื่อนลงตาม เกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้า เราไม่สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ แต่สามารถวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดได้



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า

ความต่างศักย์ไฟฟ้า(Potential difference) ความต่างศักย์ของศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุด มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่อประจุไฟฟ้าบวกหนึ่งหน่วยเคลื่อนที่จากจุดหนึ่ง ไปยังอีกจุดหนึ่งในสนาม ไฟฟ้าหน่วยของความต่างศักย์ไฟฟ้าคือ โวลต์ บางทีเรียกความต่างศักย์ไฟฟ้าว่า โวลต์เตจ พลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยน ไป 1 จูล เมื่อประจุไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่ระหว่างจุดสองจุดที่มีความต่างศักย์ 1 โวลต์ มีการกำหนดจุดอ้างอิงจุดหนึ่ง(ต่อลงดิน) ให้มีศักย์ไฟฟ้าศูนย์



รูปที่ 2.17 ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด A, B และ C

จุดสมมูลศักย์ (Equipotential) หมายถึงผิวที่มีศักย์ไฟฟ้าคงที่
 ความจุไฟฟ้า (Capacitance) เมื่อให้ประจุไฟฟ้ากับตัวนำจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลง
 ศักย์ไฟฟ้า ความจุไฟฟ้าเป็นอัตราส่วน ระหว่างประจุไฟฟ้าที่วัตถุได้รับกับศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น
 วัตถุที่มีความจุไฟฟ้ามาก ต้องการประจุไฟฟ้ามากกว่าวัตถุที่มีความจุไฟฟ้าน้อยในการทำให้
 ศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเท่ากัน



รูปที่ 2.18 แสดงความจุไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บประจุไฟฟ้าประกอบด้วยแผ่นโลหะขนาน
 กัน และ กั้นด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนเรียกว่า ไดอิเล็กทริก ความจุของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับ ไดอิ
 เล็กทริกที่ใช้ ซึ่งจะถูกเลือกให้เหมาะสมกับความจุที่ต้องการและลักษณะของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ (Paper capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้แผ่นโลหะบาง
 2 แผ่น ขึ้นด้วยกระดาษอบไขบางๆ ทำหน้าที่เป็น ไดอิเล็กทริกตัวเก็บประจุชนิดพอลิเอ
 สเตอร์ สร้างได้วิธีเดียวกัน

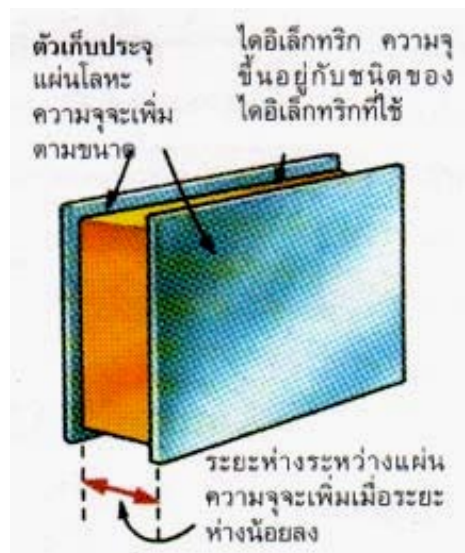
ฟารัด (Farad) เป็นหน่วยของความจุไฟฟ้าวัตถุที่มีความจุไฟฟ้า 1 ฟารัดจะมีศักย์ไฟฟ้า
 เพิ่มขึ้น 1 โวลต์ เมื่อให้ประจุไฟฟ้ากับวัตถุนั้น 1 คูลอมบ์



รูปที่ 2.19 ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ

ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic capacitor) ตัวเก็บประจุที่ใช้ ไดอิเล็กทริกที่มีลักษณะคล้ายเยลลี่หรือแป้งเปียกมีความจุสูงในปริมาตรเล็ก เนื่องจากสมบัติของไดอิเล็กทริกจะต้องต่อขั้วตัวเก็บประจุชนิดนี้กับแบตเตอรี่ให้ถูกต้อง

ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) เป็นสัดส่วนระหว่างความจุของตัวเก็บประจุ เมื่อใช้ไดอิเล็กทริก ที่กำหนดให้กับความจุเมื่อเป็นสุญญากาศ ค่าที่ได้เป็นตัวเลขที่แสดงว่าเมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่มีไดอิเล็กทริกที่กำหนดให้ จะเพิ่มความจุจากกรณีที่เป็นสุญญากาศ (มีผลใกล้เคียงกับอากาศ



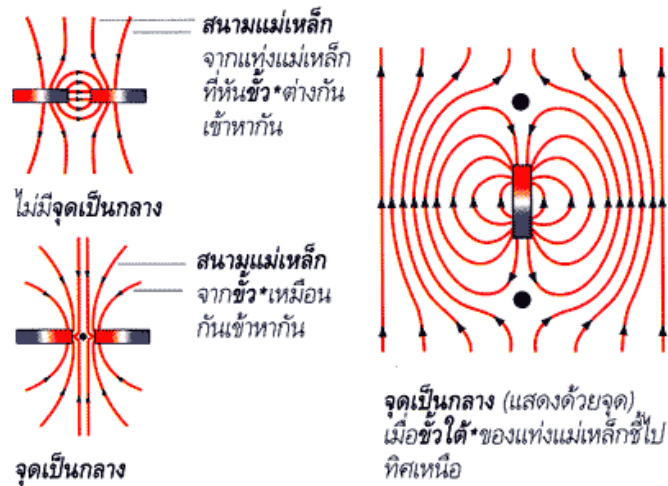
รูปที่ 2.20 ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ

ตัวเก็บประจุเปลี่ยนค่าได้ (Variable capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะติดอยู่บนแกนหมุน ใช้ไดอิเล็กทริกเป็นอากาศ เมื่อหมุนแกนพื้นที่ระหว่างแผ่นที่ซ้อนกันจะเปลี่ยนมีผลให้ความจุเปลี่ยนไป

ขวดเลย์เด็น (Leyden jar) เป็นตัวเก็บประจุชนิดหนึ่งทำด้วยขวดแก้วซึ่งใช้แผ่นโลหะบางๆ ติดอยู่ทั้งภายในและภายนอก เป็นตัวเก็บประจุชนิดหนึ่งที่ประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรก

2.2.4.4 จุดเป็นกลาง (Neutral point)

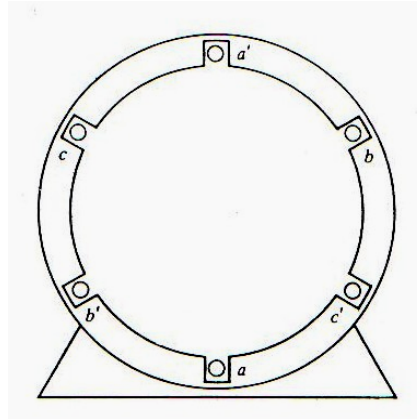
เป็นจุดที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์ เกิดจากมีสนามแม่เหล็ก 2 สนาม หรือมากกว่า มีปฏิกริยาต่อกันและกันด้วยอำนาจที่เท่ากัน แต่ทิศตรงกันข้าม แท่งแม่เหล็กที่แขวนตามเมริเดียนแม่เหล็ก โดยที่ขั้วได้ ขั้วทิศเหนือจะมีจุดสะเทิน 2 จุด ในแนวแกนแม่เหล็ก



รูปที่ 2.21 จุดที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์

2.2.4.5 สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field)

สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส หมายถึง ผลลัพธ์ของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่หมุนตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 3 เฟส (ซึ่งมีขนาดเท่ากันแต่มีมุมต่างเฟสกัน 120°) ที่จ่ายให้แก่ขดลวดอาร์เมเจอร์ 3 ชุด



รูปที่ 2.22 ขดลวดอาร์มเจอร์ 3 ชุด (ที่สเตเตอร์)

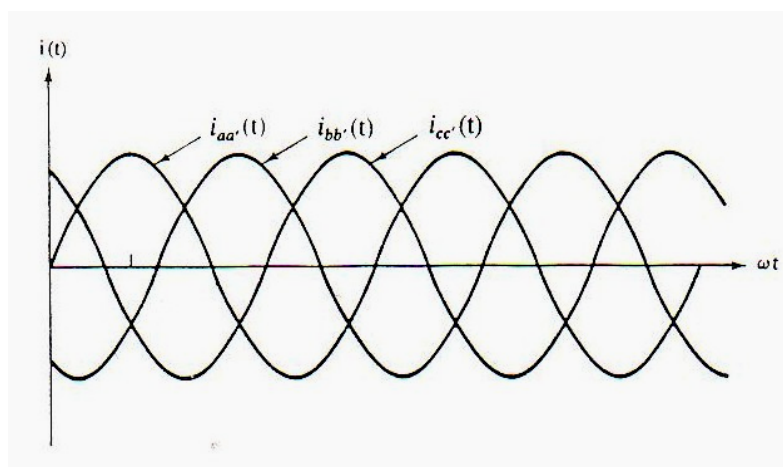
จากรูป แสดงให้เห็นขดลวดอาร์มเจอร์ 3 ชุด (ที่สเตเตอร์) แต่ละชุดวางตัวห่างกัน 120° ด้านที่ไม่มีเครื่องหมาย (คือ a, b และ c) เป็นด้านที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้า ด้านที่มีเครื่องหมาย (คือ a' , b' และ c') เป็นด้านที่มีกระแสไฟฟ้าไหลออก สมมติว่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะที่จ่ายให้ขดลวดดังกล่าวมีค่าดังนี้ คือ

$$i_{aa'}(t) = I_M \sin \omega t \quad (2.1 a)$$

$$i_{bb'}(t) = I_M \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.1 b)$$

$$i_{cc'}(t) = I_M \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (2.1 c)$$

จากสมการ 2.1 เขียนรูปคลื่นได้ดังรูป



รูปที่ 2.23 กระแสไฟฟ้าชั่วขณะของขดลวดตามฟังก์ชันไซน์

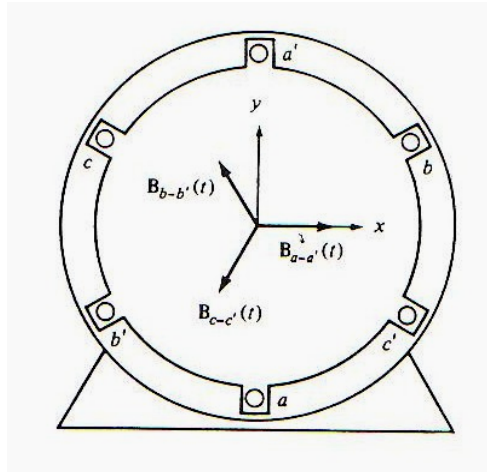
รูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะของขดลวดแต่ละขดเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันไซน์โดยมีมุมต่างเฟสกัน 120° ทำให้ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแต่ละขดเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันไซน์และมีมุมต่างเฟสกัน 120° ด้วย เขียนสมการได้ดังนี้

$$B_{aa'}(t) = B_M \sin \omega t \angle 0^\circ \quad (2.2 a)$$

$$B_{bb'}(t) = B_M \sin (\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (2.2 b)$$

$$B_{cc'}(t) = B_M \sin (\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad (2.2 c)$$

จากสมการ 2.2 เขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมได้ดังนี้ คือ



รูปที่ 2.24 เวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กที่กระแสมีมุมต่างเฟสกัน 120°

จากรูป เป็นเวกเตอร์แสดงความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กที่เกิดจากการพิจารณากระแสไฟฟ้าชั่วขณะที่มีมุมต่างเฟสกัน 120° โดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่น

แต่การพิจารณารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขณะเปลี่ยนแปลงตามแกนของเวลา ในรูปที่ 2.24 จะเห็นว่าเวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กรวมหมุนตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นตามขั้นตอนต่อไปนี้

เมื่อพิจารณารูป 2.25 ที่ $\omega t = 0^\circ$ (แทน $\omega t = 0^\circ$ ลงในสมการ 2.1) จะได้

$$i_{aa'}(t) = I_M \sin 0^\circ = 0$$

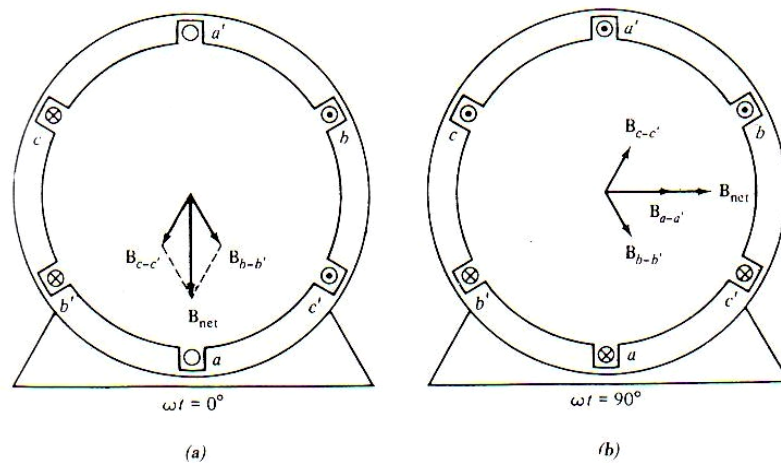
$$i_{bb'}(t) = I_M \sin (0^\circ - 120^\circ)$$

$$i_{cc'}(t) = I_M \sin (0^\circ - 240^\circ)$$

ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กรวม (B_{net}) จากขดลวดทั้ง 3 ชุด คือ

$$\begin{aligned} B_{net} &= B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'} \\ &= 0 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} B_M \right) \angle 120^\circ + \frac{\sqrt{3}}{2} B_M \angle 240^\circ \\ B_{net} &= 1.5 B_M \angle -90^\circ \end{aligned}$$

เขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมของ B_{net} ที่เวลา $\omega t = 0^\circ$ ได้ดังรูป



รูปที่ 2.25 เวกเตอร์ไดอะแกรมของ B_{net} ที่เวลา $\omega t = 0^\circ$

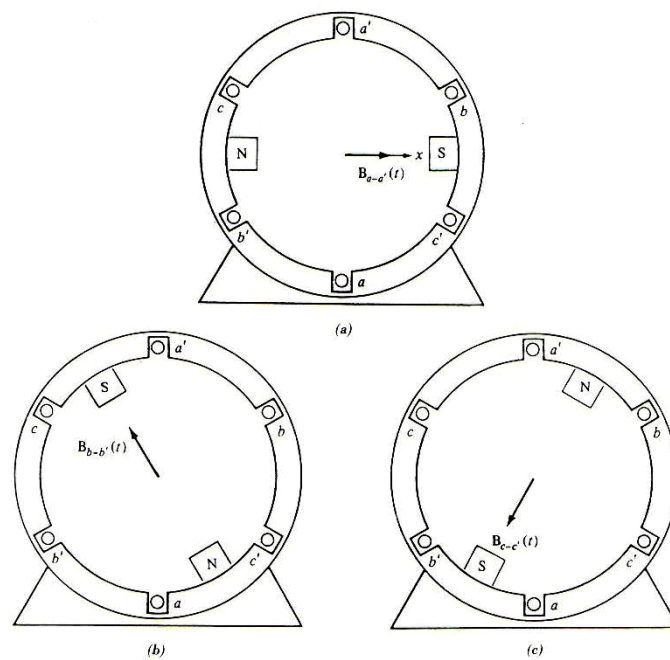
เมื่อพิจารณารูป 2.25 ที่ $\omega t = 90^\circ$ (แทน $\omega t = 90^\circ$ ลงในสมการ 2.1)

$$\begin{aligned} i_{aa'} &= I_M \sin 90^\circ \\ i_{bb'} &= I_M \sin (-30^\circ) \\ i_{cc'} &= I_M \sin (-150^\circ) \\ \therefore B_{net} &= B_M \angle 0^\circ + (-0.5) B_M \angle 120^\circ + (-0.5) B_M \angle 240^\circ \\ &= 1.5 B_M \angle 0^\circ \end{aligned}$$

เขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมของ B_{net} ที่ $\omega t = 90^\circ$ ได้ดังรูป 2.26 b

จากการเปรียบเทียบ B_{net} ในรูป 2.23 a และ 2.26 b จะเห็นว่าทิศทางของ B_{net} เปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ นั่นคือ หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ขนาดคงที่ ในกรณีนี้คือ $1.5 B_m$) ถ้านำหลักการดังกล่าวมาพิจารณารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ $\omega t = 180^\circ, 270^\circ$ และ 360° จะเห็นว่า B_{net} หมุนทวนเข็มนาฬิกาจนครบรอบ ลักษณะเช่นนี้เราเรียกว่า การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

2.2.4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ไฟฟ้ากับความถี่ในการหมุนของสนามแม่เหล็ก จากหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรทำให้ทราบว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กรวมจะพุ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ เมื่อนำหลักการดังกล่าวมาพิจารณาการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของเครื่องกลไฟฟ้าจึงเปรียบเสมือนเครื่องกลไฟฟ้ามีขั้วแม่เหล็กถาวรหมุนตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า ทำให้เวกเตอร์แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กรวมหมุนตามขั้วแม่เหล็กดังกล่าว ขั้วแม่เหล็กถาวรนี้เป็นขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์



รูปที่ 2.26 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์

เมื่อนำหลักการดังกล่าวมาอธิบายเวกเตอร์แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กรวมในรูป 2.25 ให้หมุนตามขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์ได้ดังรูป 2.27 กล่าวคือ ถ้ากำหนดให้ขั้ว

เหนือของขั้วแม่เหล็กหมุนทวนเข็มนาฬิกา ขั้วเหนือจะปรากฏระหว่างขดลวดอาร์เมเจอร์ตามลำดับดังต่อไปนี้

$$c-b' \rightarrow a-c' \rightarrow b-a' \rightarrow c-b'$$

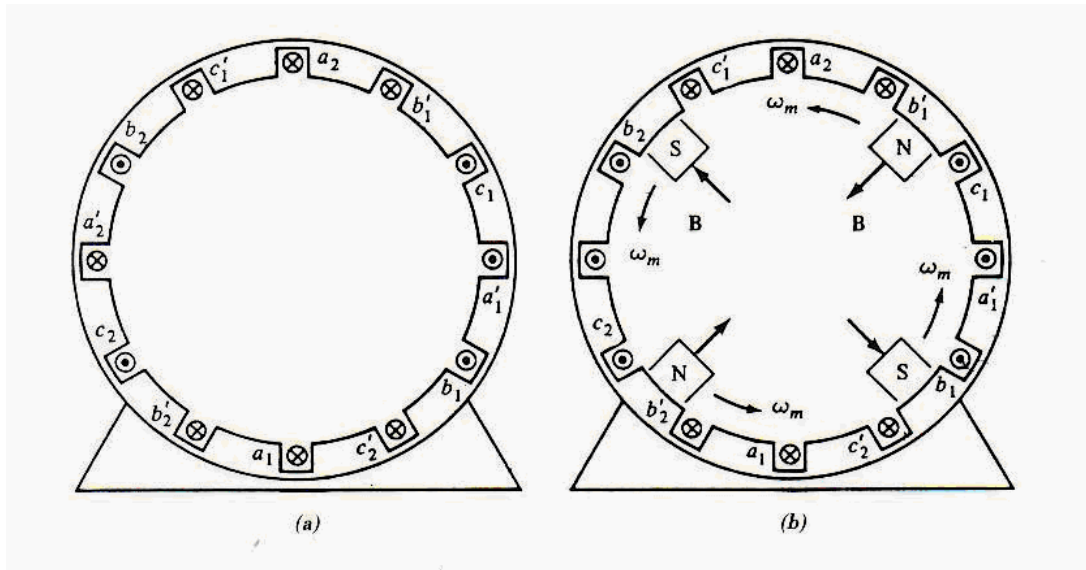
ถ้ากำหนดให้การหมุนของขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นการหมุนทางกล ส่วนการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดเป็นการหมุนทางไฟฟ้า ทำให้ทราบว่าเมื่อรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงครบ 1 cycle (ซึ่งเท่ากับการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า 2π เรเดียน หรือ 360°) จะทำให้ขั้วแม่เหล็กหมุนครบ 1 รอบ ดังนั้นความเร็วในการหมุนของขั้วแม่เหล็กครบ 1 รอบ/วินาที หรือความเร็วเชิงมุมทางกล (ω_m) จึงมีค่าเท่ากับความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าครบ 1 รอบ/วินาทีหรือเท่ากับความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (ω_e) เขียนสมการได้ดังนี้

$$\omega_e = \omega_m \quad (2.3)$$

ดังนั้นความถี่ทางไฟฟ้า (f_e หรือ f) จึงเท่ากับความถี่ทางกล (f_m) หรือ

$$f_e = f_m \quad (2.4)$$

สมการ 2.3 และสมการ 2.4 เป็นสมการของขั้วแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์เพียง 2 ขั้ว ถ้าเราเพิ่มจำนวนตัวนำในสเตเตอร์มากขึ้น (รูปที่ 2.28 a) จะได้ขั้วแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 4 ขั้ว (รูปที่ 2.28 b)



รูปที่ 2.27 ขั้วแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์

เมื่อจ่ายรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจำนวน 1 cycle (360°) ให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ จะทำให้ขั้วแม่เหล็ก หมุนเพียง $\frac{1}{2}$ รอบ (หรือ 180°) เท่านั้น นั่นคือ ขั้วแม่เหล็กหมุนครบรอบเพียง 2 ขั้ว ถ้าต้องการให้ขั้วแม่เหล็กทั้ง 4 ขั้วหมุนครบรอบต้องจ่ายรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจำนวน 2 cycle (720°) เมื่อกำหนดให้ P เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์

$$\square_e = \frac{P}{2} \square_m \quad (2.5)$$

นอกจากนี้

$$f_e = \frac{P}{2} f_m \quad (2.6)$$

$$\square_e = \frac{P}{2} \square_m \quad (2.7)$$

ความเร็วทางกลของสนามแม่เหล็ก (n_m) มีหน่วยเป็นรอบ/นาที (rev/min) แต่ความถี่ทางไฟฟ้า f_e มีหน่วยเป็นรอบ/วินาที (Hz) เมื่อต้องการแสดงความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง จะต้องแทนค่า $f_m = n_m/60$ ในสมการ 2.6

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2.8)$$

เมื่อ $P =$ จำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์

นอกจากนี้เราจะได้ความเร็วเชิงมุมทางกล หรือความเร็วเชิงมุมของการหมุนของโรเตอร์
ดังนี้

$$\omega_m = 2\pi f_m$$

$$\omega_m = \frac{2\pi n_m}{60} \quad (2.9)$$

2.3 ทฤษฎีและส่วนประกอบทางด้านกังหันลม

พลังงาน ลม (Wind energy) คือ การเคลื่อนตัวของอากาศที่มีความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิและความดัน เนื่องจากได้รับความร้อนจากแสงแดดที่ไม่เท่ากัน ทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำความหนาแน่นจะต่ำลอยขึ้นด้านบนและเมื่ออากาศที่มีอุณหภูมิต่ำความหนาแน่นจะสูงเคลื่อนที่เข้ามาแทน ทำให้เกิดเป็นพลังงานจลน์รูปหนึ่ง ที่เรียกว่า “ลมพัด” พลังงานลมมีอยู่ตามธรรมชาติ โดยทั่ว ๆ ไปไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำมาใช้และไม่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศเหมือนกับน้ำมัน เชื้อเพลิง และ เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิด มลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลังงานลมสามารถจะนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่มีวันหมดไปจากโลกใบนี้ถ้าโลกยังคงหมุนและมีแสงแดดอยู่ ดังนั้นเราจึงต้องหาอุปกรณ์ที่จะเปลี่ยนพลังงานจลน์ของลมให้มาเป็นพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้า ที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับอยู่ในขณะนี้ถือว่าเป็นเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด มีชื่อเรียกว่า กังหันลม (Wind turbine)

2.3.1 ชนิดของกังหันลม

การแบ่งชนิดของกังหันลมสามารถจำแนกออกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ อาทิเช่น แบ่งตามลักษณะการใช้งาน แบ่งตามหลักการทำงานของเครื่องจักรหรือสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของแกนเพลลาของกังหันลมในแนวระนาบที่เป็นมุมมองจากด้านบนของโลก

อย่างไรก็ตาม โดยทั่ว ๆ ไปแล้วในปัจจุบันเราสามารถแยกชนิดของกังหันลมออกเป็น 2 ชนิดหลัก ๆ คือ

- กังหันลมชนิดแนวแกนเพลลาขนานกับพื้นระดับของโลกโดยมีชื่อเรียกว่า Horizontal Axis Wind Turbines หรือ HAWTs



รูปที่ 2.28 แสดงภาพกังหันลมแนวแกนนอน

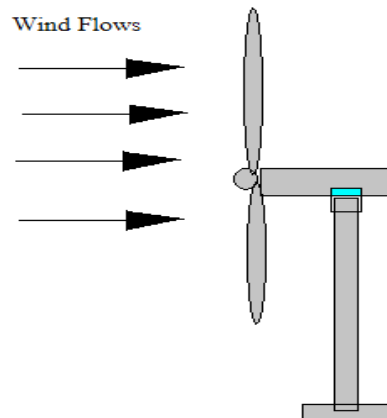
- กังหันลมชนิดแนวแกนเพลาตั้งฉากกับพื้นระดับของโลกโดยมีชื่อเรียกว่า Vertical Axis Wind Turbines หรือ VAWTs



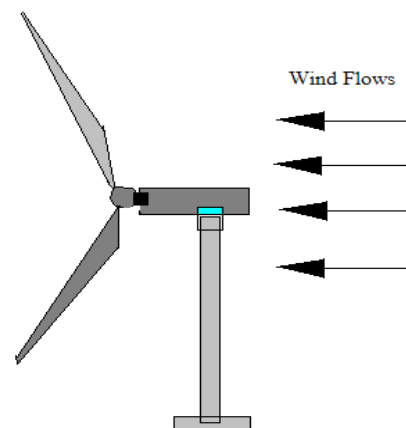
รูปที่ 2.29 แสดงภาพกังหันลมแนวแกนตั้ง

ชนิดของกังหันลมแบบแนวแกนนอนผลิตกระแสไฟฟ้า

ในปัจจุบันเราสามารถแยกชนิดของกังหันลมแบบแนวแกนนอนผลิตกระแสไฟฟ้าออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ นั่นคือ กังหันลมชนิดแนวแกนนอนรับลมมาจากด้านหน้า (Up-wind HAWTs) และ ชนิดที่ 2 คือ กังหันลมชนิดแนวแกนนอนรับลมมาจากด้านหลัง (Down-wind HAWTs)



รูปที่ 2.30 แสดงภาพกังหันลมชนิดแนวแกนนอนรับลมมาจากด้านหน้า



รูปที่ 2.31 แสดงภาพกังหันลมชนิดแนวแกนนอนรับลมมาจากด้านหลัง

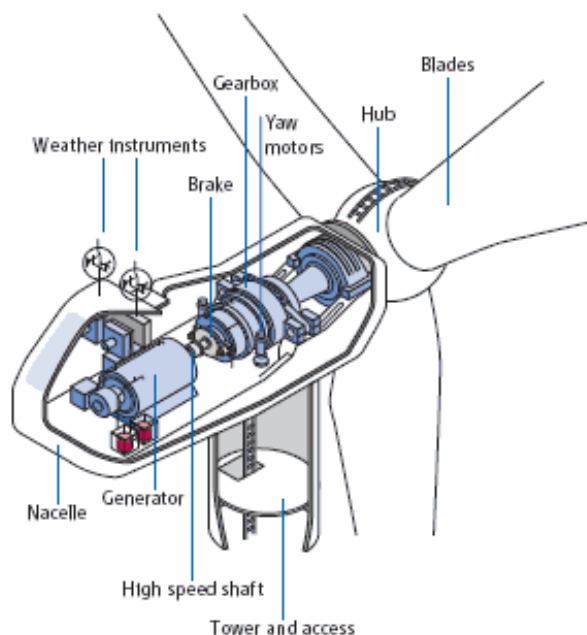
ข้อดีของกังหันชนิดแนวแกนนอนรับลมมาจากด้านหน้าคือ ใบพัดสามารถรับลมได้โดยไม่มีเสาของกังหันลมมาบังการเคลื่อนที่ของกระแสลม ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง แต่อย่างไรก็ตามกังหันลมชนิดนี้ไม่สามารถปรับใบพัดให้ปะทะลมตามทิศทางของกระแสลมที่เปลี่ยนแปลง

ไปได้ด้วยตัวเอง (Wind changing directions) ทำให้ต้องมีระบบปรับใบพัดเมื่อทิศทางของกระแสลมเปลี่ยนไป เราเรียกระบบนี้ว่า (Yaw mechanism) ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นในตอนที่ลมเปลี่ยนทิศทาง โดยเฉพาะตอนกระแสลมมีความแปรปรวนสูง กังหันลมชนิดรับลมมาจากด้านหลัง มีข้อได้เปรียบจากการที่ไม่ต้องมีระบบปรับใบพัดเมื่อลมเปลี่ยนทิศทาง อีกทั้งยังทำให้ระบบรองรับ (Supporting system) มีการออกแบบได้ง่ายขึ้นจากการที่น้ำหนักของตัวควบคุมมีขนาดเบา ลง ซึ่งมีผลทำให้อายุการใช้งานของแบร์ริงนานขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันกังหันลมรุ่นใหม่ ๆ ที่มีกำลังผลิตสูงและมีขนาดใบพัดใหญ่ ก็ยังมีความนิยมใช้กังหันลมชนิดรับลมมาจากด้านหน้า เพราะจากการใช้งานและทดสอบเปรียบเทียบกันแล้วกังหันลมชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าชนิดรับลมมาจากด้านหลัง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีการพัฒนาทางด้านอุปกรณ์ช่วยในการรับลมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากมีการวิจัยที่ต่อเนื่องแล้วยังรวมไปถึงระบบควบคุมที่ทันสมัยของกังหันลมชนิด Up-wind HAWTs และมีความแม่นยำสูงขึ้นอีกด้วย

2.3.2 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของกังหันลมแบบแนวแกนนอนผลิตกระแสไฟฟ้า

ในปัจจุบันนี้กังหันลมส่วนใหญ่ที่ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าจะเป็นกังหันลมชนิดแนวแกนนอน มีข้อดีหลัก ๆ คือสามารถเริ่มต้นทำงานเองได้ (Self start) โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการเริ่มต้นการทำงาน อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมชนิดอื่น ๆ ประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมชนิดนี้มีประมาณ 45 % นั่นคือสามารถแปลงพลังงานจลน์ของลม (Kinetic energy) จาก 100% มาเป็นพลังงานกล (Mechanical energy) ได้ 45% แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้วยังมีค่าความสูญเสีย (Losses) ในส่วนต่าง ๆ ของระบบอีกหลายส่วนซึ่งทำให้เมื่อมีการใช้งานจริง ๆ ประสิทธิภาพในการทำงานเหลือแค่ 35 % เท่านั้น ส่วนประกอบหลัก ๆ ของกังหันลมชนิดนี้สามารถดูได้จากรูปภาพที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงรายละเอียดของกังหันลมแบบแนวแกนนอน

ใบกังหัน

ใบกังหันนับว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ทำหน้าที่รับพลังงานจลน์ (Kinetic energy) จากการเคลื่อนที่ของลมซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดพลังงานกลที่แกนหมุน (Rotor hub) เพื่อถ่ายทอดกำลังไปยังเพลาแกนหมุนหลัก (Main shaft) ในที่นี้หมายถึง (Low speed shaft) ใบกังหันจะมีรูปทรงคล้ายกับปีกของเครื่องบินซึ่งถูกออกแบบโดยใช้หลักทางด้านอากาศพลศาสตร์ วัสดุที่ใช้ทำใบกังหันควรเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง จำนวนของใบกังหันอาจมีตั้งแต่หนึ่งใบถึงหลายสิบใบขึ้นอยู่กับลักษณะของงานและกำลังที่ต้องการ กังหันที่มีจำนวนใบพัดมากจะใช้ในงานที่ต้องการแรงบิดสูง ในทางตรงกันข้ามกังหันที่มีจำนวนใบพัดน้อยจะใช้กับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง เช่น ในการใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า กังหันขนาด 3 ใบพัด จัดว่าดีที่สุดในการกวาดรับแรงลมและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน



รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะใบพัดของกังหันลมแบบแนวแกนนอน

เพลาส่งกำลัง

เพลาส่งกำลังทำจากโลหะเหล็กคุณภาพสูงที่สามารถทนต่อแรงกระแทก การสั่นสะเทือนและอุณหภูมิสูงได้ดี ทำหน้าที่รับแรงจากแกนหมุน (Rotor hub) เพื่อส่งถ่ายกำลังไปยังชุดเกียร์ทด หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) โดยตรงในกรณีที่ไม่มีชุดเกียร์ทด



รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะเพลาส่งกำลังที่ทำจากโลหะคุณภาพสูง

ห้องทดรอบกำลัง

ห้องทดรอบกำลังจะประกอบไปด้วยเฟืองขนาดต่าง ๆ ทำจากโลหะคุณภาพสูงที่สามารถทนต่อแรงบิดและการสึกกร่อนได้ดี ทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยนรอบการหมุนเพื่อถ่ายทอดกำลังจากเพลาแกนหมุนหลัก (Main shaft) ที่มีความเร็วรอบต่ำไปยังเพลาส่งกำลังความเร็วรอบสูง (High speed shaft) เพื่อให้มีความเร็วรอบที่สูงขึ้นและเหมาะสมในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



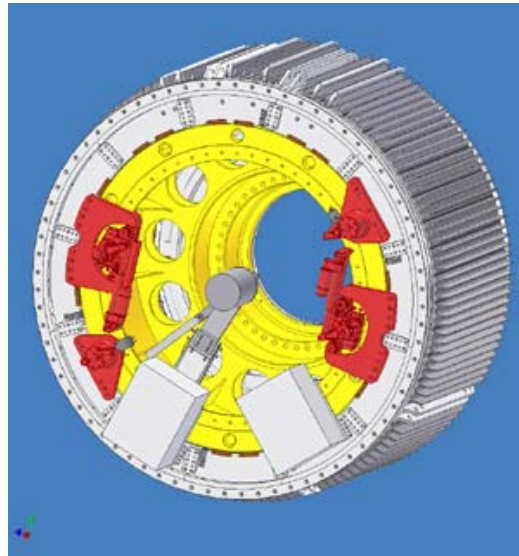
รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะชุดเกียร์ทดรอบกำลัง

เบรก

เป็นระบบกลไกใช้ควบคุมการหมุนของใบกังหันหรือใช้เพื่อที่จะหยุดการหมุนของใบกังหัน ในกรณีที่ต้องการลดความเร็วของใบกังหันหรือหยุดการทำงานของกังหันลมในระหว่างทำการซ่อมแซมบำรุงรักษา ระบบเบรกที่ใช้มีทั้งแบบกลไก น้ำมัน และระบบไฟฟ้า

2.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

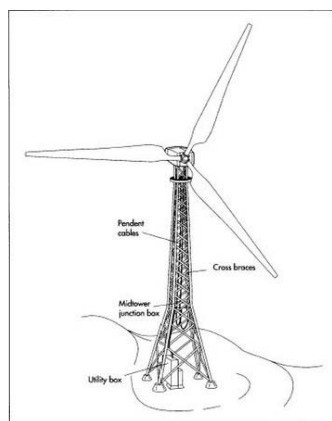
ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยทั่วไปที่ใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังในการหมุน



รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.3.4 เสา

เสาที่ใช้ในการติดตั้งกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันมีใช้งาน 2 แบบได้แก่ เสาแบบกลมกลวง (Tubular) และเสาแบบโครงถัก (Truss) ซึ่งทั้งสองแบบจะต้องมีการออกแบบทางด้านวิศวกรรมเป็นอย่างดีในการรับน้ำหนักและแรงปะทะของลม ในปัจจุบันนิยมใช้เสาแบบกลมกลวงมากกว่าเสาแบบโครงถัก



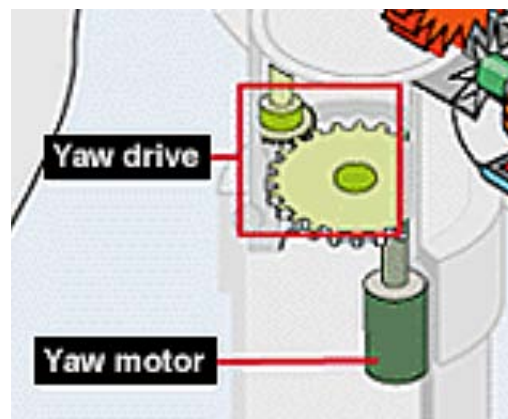
รูปที่ 2.37 แสดงลักษณะเสาแบบโครงถัก



รูปที่ 2.38 แสดงลักษณะเสาแบบกลมกลวง

2.3.5 ชุดหมุนปรับหาทิศทางลม

เป็นตัวบังคับให้ใบพัดหันรับแรงลมตามทิศทางเคลื่อนที่ของกระแสลม มีทั้งแบบควบคุมการหมุนด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์และใช้หางเสือเป็นตัวควบคุม แบบที่ใช้หางเสือเป็นตัวควบคุมโดยตรงจะใช้กับกังหันลมที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.39 แสดงลักษณะชุดหมุนปรับหาทิศทางลมควบคุมการหมุนด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์

2.3.6 ทฤษฎีกังหันลมแนวแกนนอน

พลังงานลม เป็นพลังงานจลน์ซึ่งในที่นี้เราจะพิจารณา อัตราการไหลของลม (\dot{m}) และ ความเร็วลม (U) ดังนั้นสมการการหาพลังงานของลมสามารถเขียนได้เป็น

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} U^2$$

แต่อัตราการไหล

$$\dot{m} = \rho A U$$

ดังนั้น

$$P = \frac{1}{2} (\rho A U) U^2 = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.10)$$

เมื่อ P คือ กำลังงานที่ได้จากลม (Watt)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับลม (m^2)

U คือ ความเร็วลม (m/s)

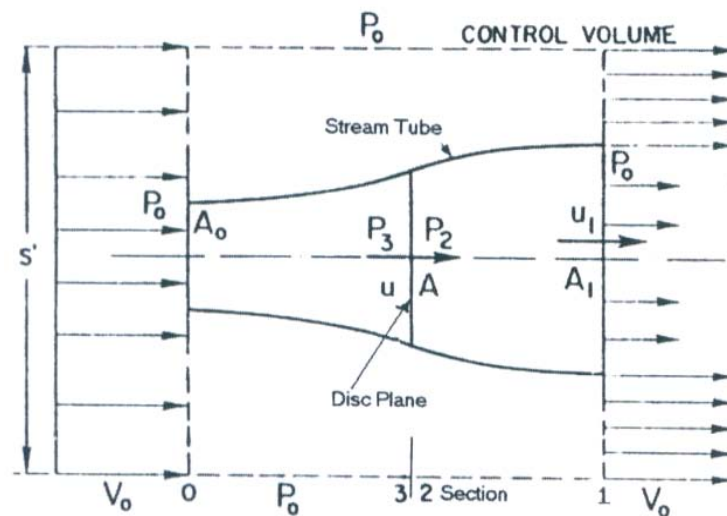
ดังนั้นจากสมการจะเห็นได้ว่ากำลังงานของลมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความเร็วของลม และพื้นที่หน้าตัดที่รับลม โดยจะพิจารณาความเร็วของลมเป็นหลักเนื่องจากกำลังงานของลมนั้นแปรผันตามความเร็วลมยกกำลังสาม

สัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient) เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ได้ออกมาจากกังหันลมต่อกำลังงานของลม หรือหมายถึงประสิทธิภาพของกังหันลมในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าโดยที่

$$C_p = \frac{P_w}{P} = \frac{P_w}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (2.11)$$

เมื่อ C_p คือ สัมประสิทธิ์กำลัง
 P_w คือ พลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกังหัน (Watt)

ในการศึกษาพลังงานจากลมนั้นสูตรการคำนวณที่จำเป็นต้องใช้โดยทั่ว ๆ ไปในการคำนวณที่นำมาหาประสิทธิภาพของกังหันลม ในตอนนี้เราจะหาประสิทธิภาพของกังหันลมโดยใช้ทฤษฎีของหลักการที่เรียกว่า Momentum theory โดยดูรายละเอียดของการวิเคราะห์ได้จากรูปที่ 2.40 ก่อน



รูปที่ 2.40 แสดงภาพหลักการ Momentum theory

ในทฤษฎีการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการของ Momentum theory นั้นเราจะต้องสมมติฐานก่อนดังนี้

- ลมที่พัดเข้ามาวิเคราะห์จะต้องมีการไหลที่สม่ำเสมอต่อเนื่อง
- ไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลของทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ
- การเคลื่อนที่ของลมไม่มีการปั่นป่วนที่ตัวใบพัดของกังหันลม
- ลมที่ไหลเข้ามาวิเคราะห์ต้องคิดว่าเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้จึงไม่มีผลในเรื่องของอุณหภูมิมาเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์

มาวิเคราะห์รูปที่ 2.40 มีตัวแปรใดบ้างที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมทุก ๆ ชนิด ตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องทราบคือ S' เท่ากับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่เราใช้อยู่ในขอบเขตของการวิเคราะห์ปริมาตรทั้งหมดของระบบ (Control volume)

V_0 คือ ความเร็วลมทางด้านเข้าและทางด้านออกของ Control volume (m/s)

u คือ ความเร็วลมก่อนที่จะถึงด้านหน้าของใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m/s)

u_1 คือ ความเร็วลมหลังจากผ่านตัวใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ทดสอบ (m/s)

P_0 คือ ความดันบรรยากาศทั่ว ๆ ไป (N/m^2)

P_2 คือ ความดันของอากาศที่ไหลผ่านตัวใบกังหันแล้ว (N/m^2)

P_3 คือ ความดันของอากาศก่อนที่จะปะทะตัวใบกังหัน (N/m^2)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวใบกังหัน (m^2)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดทางเข้าของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^2)

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดทางออกของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^2)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^3/s)

ในการวิเคราะห์ทฤษฎีของ Momentum นั้นเราสมมุติว่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิต้องฟ้าปกติมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.225 kg/m^3 และจากกฎของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity equation) นั้น การไหลต้องเท่ากันทั้งระบบ นั่นคือ $Q = A \cdot V$ จะได้ $V_0 A_0 = uA = u_1 A_1$ และจากกฎของเบอร์นูลลี โดยวิเคราะห์ในส่วนของความดันอย่างเดียวตั้งแต่ส่วนที่ 0 ถึงส่วนที่ 3 และจากส่วนที่ 2 ถึงส่วนที่ 1 ของรูปที่ 2.40

กล่าวถึงตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมทุก ๆ ชนิด ซึ่งจะมีผลการวิเคราะห์ได้ คือ

$$\frac{1}{2} \rho V_0^2 + P_0 = \frac{1}{2} \rho u^2 + P_3 \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + P_2 = \frac{1}{2} \rho u_1^2 + P_0 \quad (2.13)$$

ดังนั้นแรงผลัก (Thrust) T_a ที่เกิดขึ้นในใบกังหันจะได้

$$T_a = P \cdot A \quad \text{นั่นคือ} \quad A(P_3 - P_2) \quad (2.14)$$

$(P_3 - P_2)$ คือ การที่พลังงานจากลมได้ถ่ายทอดให้กับแผ่นดิสก์เรียบร้อยแล้ว พลังงานก็จะถูกสะสมอยู่ในใบกังหันนั่นเอง หรือถ้าจะวิเคราะห์ส่วนของความเร็วลมก็จะได้ว่าแรงผลักที่เกิดในใบกังหันคือ

$$T_a = \frac{\rho A (V_0^2 - u_1^2)}{2} \quad (2.15)$$

สมการที่ 2. 15 ได้มาจากพลังงานจลน์ของลมนั่นเองคือ $KE = \frac{1}{2} \rho A V^2$ แต่จากสมการที่ 2.15 จะเห็นว่าพลังงานได้ถ่ายทอดให้กับใบกังหันไปแล้ว มาถึงจุดนี้เราจะได้ว่า

$$Au = A_1 u_1 \quad \text{ดังนั้น} \quad u = \left(\frac{V_0 + u_1}{2} \right) \quad (2.16)$$

u คือ ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมดของระบบที่เรากำลังวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์นั้นเราสมมุติว่าระบบจะต้องมีการสูญเสียโดยกำหนดให้เป็นค่าที่เรียกว่า Axial interference factor โดยค่านี้คือค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลม ในระหว่างลมที่เข้ามาอย่างอิสระและลมที่ปะทะตัวใบกังหัน นั่นคือ

$a = \frac{v}{V_0}$ และจาก $v = V_0 - u$ ดังนั้นเราแทนค่า $v = V_0 - u$ เป็นค่าของการสูญเสียจะได้

$$u = V_0(1 - a) \quad (2.17)$$

ดังนั้นแทนค่าลงในสมการ 2.7 จะได้ u_1 คือ

$$u_1 = V_0(1 - 2a) \quad (2.18)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันนั้นถ้าค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมมีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือไม่มีการรบกวนของระบบ คือลมที่ทางเข้าและทางออกไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมเลย ซึ่งเป็นไปไม่ได้และขณะเดียวกันค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมมีค่าเท่ากับ 1 นั่นก็คือไม่มีการถ่ายเทพลังงานของลมให้แก่ใบกังหันเลย ซึ่งเราก็ไม่ต้องการ ในการวิเคราะห์ครั้งนี้นี้เราสามารถกำหนดว่าพลังงานจากลมได้ถูกถ่ายทอดให้กับใบกังหันต่อหน่วยเวลาใด ๆ

นั่นคือ P_w โดย

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u V_0^2 - \frac{1}{2} \rho u_1^2 A u$$

และแทนค่า a ลงไปจะได้ว่า

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2 \quad (2.19)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันลมโดยทั่ว ๆ ไปนั้น เราคิดพลังงานลมที่เกิดจากการไหลอิสระนั้น เราจะมีสูตรการคำนวณคือ P_a ผ่านพื้นที่รับลมใด ๆ จะได้ว่า

$$P_a = (\text{ปริมาตรของการไหล}) \times (\text{พลังงานจลน์ของลมต่อปริมาตรการไหล})$$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมนั้น ตัวแปรที่จะต้องใช้นั้นเราเรียกว่าค่า C_p (Power coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ตัวกังหันลมได้ดึงเอาไว้ P_w เปรียบเทียบกับตัวพลังงานที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a นั่นคือ ถ้าวิเคราะห์กันทางกลก็คือกำลังงานเท่ากับพลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าไปสู่ระบบนั่นเอง ในทางวิศวกรรมของพลังงานลมนั้นเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมได้คือ

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} \quad (2.20)$$

ดังนั้นค่า $C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.21)$

ดังนั้นถ้าเราอยากจะรู้ว่าถ้าออกแบบให้ดีที่สุดแล้วตัวกังหันลมสามารถมีประสิทธิภาพสูงสุดได้เท่าไรนั้น โดยการ Differentiate สมการที่ 2.21 นั่นคือ

$C_p = 4a - 8a^2 + 4a^3$ และเมื่อทำการ Differentiate เปรียบเทียบกับค่า a แล้วเราจะ

$$\frac{dC_p}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0$$

$$12a^2 - 16a + 4 = 0$$

$$3a^2 - 4a + 1 = 0$$

ดังนั้นจะได้ว่า a คือ

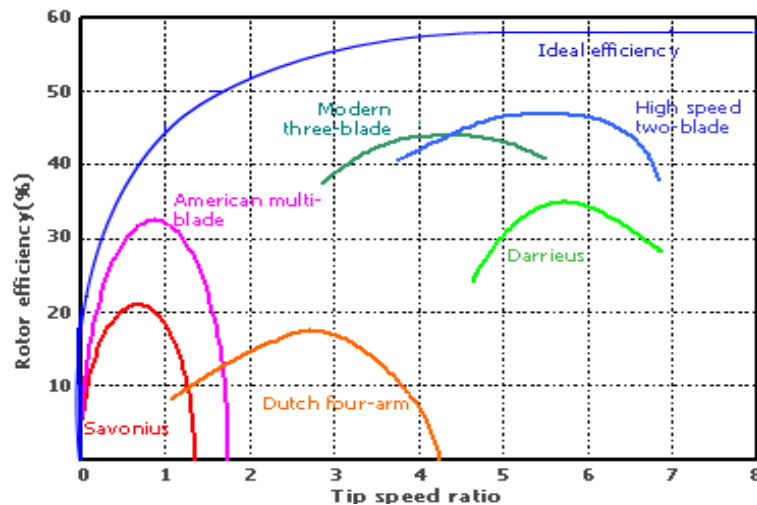
$$a = \frac{4 \pm \sqrt{(-4)^2 - 4 \times 3 \times 1}}{2 \times 3}, a = \frac{4 \pm \sqrt{4}}{6}$$

นั่นก็จะได้ค่า $a = \frac{2}{3} \pm \frac{1}{3}$

สมการจะเป็นจริงได้มีค่า a แค่ 2 ค่า คือ

$$a = 1 \text{ และ } a = \frac{1}{3}$$

ดังนั้นถ้าเราแทนค่า $a = \frac{1}{3}$ ลงในสมการที่ 2.21 เราจะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า $C_{p_{max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 นั่นคือถ้าลมให้พลังงานมา 100 % กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26 % เนื่องด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 2. 41 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่าง ๆ ว่าไม่มีกังหันลมชนิดใดที่สามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพได้ถึง 45 % ด้วยซ้ำไปแต่อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบชุดกังหันลมให้มีประสิทธิภาพรวมได้ถึง 30% ก็ถือว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูงแล้วเนื่องจากลมเป็นพลังงานที่สะอาดและจะไม่มีวันหมดไปเหมือนพลังงานจากเชื้อเพลิงสารไฮโดรคาร์บอนนั่นเอง



รูปที่ 2.41 แสดงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่าง ๆ

กำลังงานที่ได้ออกมาจากกังหันลมคือ กำลังงานไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$P_w = VI \quad (2.22)$$

เมื่อ P_w คือ กำลังงานไฟฟ้า (Watt)
 V คือ ความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า (Volt)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (Amp)

หรือ
$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U^3 C_p \quad (2.23)$$

อัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วที่ปลายใบกังหัน (Tip speed) ในขณะที่กังหันผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงสุดต่อความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหัน ในขณะที่กังหันผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงสุดเช่นกัน โดยที่ความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหันนั้นจะเป็นความเร็วลมที่เราต้องการเพื่อให้กังหันผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุด ตัวอย่างเช่น กังหันลมที่ออกแบบมา สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 100 วัตต์ที่ความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนความเร็วสูงสุดจะใช้ตัวย่อว่า TSR หาได้จากสมการ

$$TSR = \frac{\Omega R}{U} \quad (2.24)$$

เมื่อ Ω คือ ความเร็วเชิงมุมที่ส่วนปลายใบกังหัน
 R คือ รัศมีของใบกังหัน
 U คือ ความเร็วลมที่ทำให้กังหันผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุด

โดยทั่วไปกังหันลมแบบหลายใบหรือเป็นแบบที่หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำจะใช้อัตราส่วนความเร็วสูงสุดอยู่ที่ค่าระหว่าง 1 ถึง 4 และกังหันลมที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูงจะใช้อัตราส่วนความเร็วสูงสุดอยู่ที่ค่าระหว่าง 5 ถึง 7 ในการออกแบบครั้งนี้ใช้ค่า $TSR = 7$

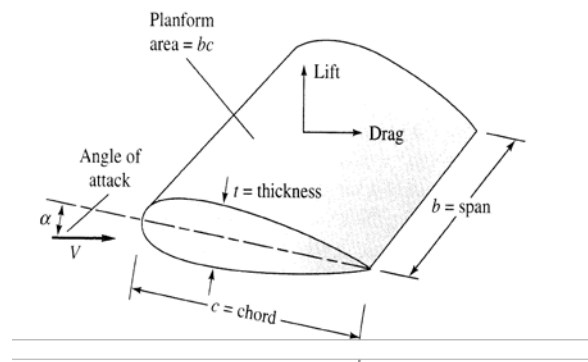
และ
$$\Omega = 2\pi N$$

ดังนั้นสมการจะเปลี่ยนรูปเป็น

$$TSR = \frac{2\pi NR}{U} \quad (2.25)$$

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของใบกังหัน (rps)

แพนของอากาศ (Airfoil) จะถูกนิยามเป็นวัตถุที่มีรูปร่างเพรียตามกระแสการไหลซึ่ง ออกแบบเพื่อทำให้เกิดแรงยกขึ้น วัตถุรูปร่างอื่นที่ทำให้เกิดแรงยกนอกเหนือจากแพนอากาศจะ ได้แก่ แผ่น hydrofoil หรือแผ่นคัตโค้ง



รูปที่ 2.42 แสดงลักษณะของแรงยกที่เกิดจากการไหลของอากาศ

ขอบด้านหน้า (Leading edge) คือ ส่วนหรือสันด้านหน้าของการแพนอากาศที่หันหน้าเข้าหาการไหล

ขอบปลายด้านหลัง (Trailing edge) คือ ส่วนปลายด้านหลังของแพนอากาศ

เส้นคอร์ด (Chord line) คือ เส้นที่ลากเชื่อมระหว่างขอบด้านหน้าไปสู่ปลายขอบด้านหลังในแนวเส้นตรง โดยมีความยาวของคอร์ดเท่ากับ c

เส้นแคมเบอร์ (Camber line) คือ เส้นแบ่งครึ่งรูปแพนอากาศโดยลากจากขอบด้านหน้าไปสู่ปลายขอบด้านหลัง

ระยะแคมเบอร์ (Camber) คือ ระยะห่างมากที่สุดระหว่างเส้นแคมเบอร์กับเส้นคอร์ด

เส้นที่ให้ค่าแรงยกเป็นศูนย์ (Zero line) คือ เส้นบนแพนอากาศที่เมื่อของไหลเคลื่อนที่เข้าหาแพนอากาศ ในแนวของเส้นดังกล่าวจะไม่มีค่าแรงยกเกิดขึ้น

มุมปะทะ (Angle of attack) คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างทิศของการไหลสัมพัทธ์ของของไหลกับเส้นคอร์ด

เมื่อแพนอากาศเคลื่อนที่ผ่านของไหลหรือของไหลไหลผ่านแพนอากาศที่มุมปะทะค่าหนึ่ง ของไหลจะแยกเคลื่อนที่ผ่านผิวด้านบนและด้านล่าง หากมุมปะทะมีค่าเป็นบวกและยังมีค่าไม่สูงถึงค่าที่กำหนดให้เกิดปรากฏการณ์การแยกขึ้น ของไหลจะเคลื่อนที่บนผิวด้านบนของแพนอากาศด้วยความเร็วสูงกว่าผิวด้านล่างของแพนอากาศ ทำให้ความดันที่ผิวด้านล่างของแพนอากาศมีค่าสูงกว่าความดันที่ผิวด้านบนของแพนอากาศ ผลลัพธ์ของความดันแตกต่างระหว่างผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศจะทำให้เกิดเป็นแรงกระทำต่อแพนอากาศ และแรงดังกล่าวที่อยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลจะถูกเรียกว่า แรงยก L แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนที่ผิวและแรงจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหลจะถูกเรียกว่า แรงหน่วง D

ค่าแรงยกและแรงหน่วง จะได้จากการทดสอบแพนอากาศดังกล่าวในอุโมงค์ลม ซึ่งมักจะแสดงค่าแรงยกและแรงหน่วงอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก C_L และสัมประสิทธิ์แรงหน่วง C_D โดยที่นิยามของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะเขียนได้เป็น

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (2.26)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (2.27)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ระนาบของแพนอากาศ
สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง TSR กับ C_p

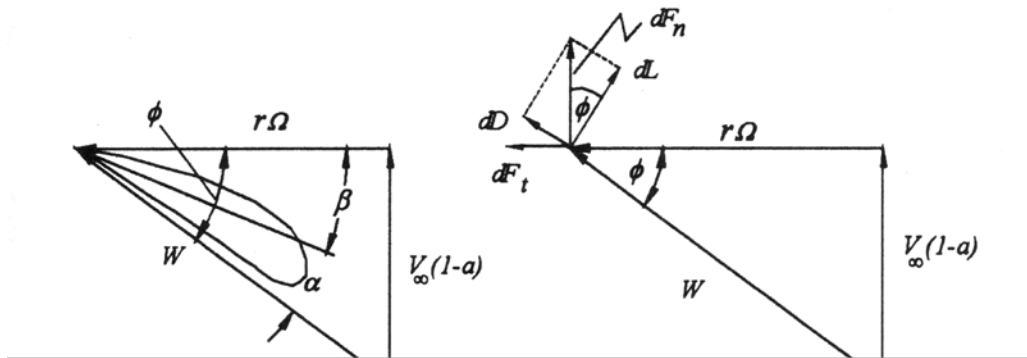
$$C_p = \frac{1}{2} C_D TSR(1 - TSR)^2 \quad (2.28)$$

โดยใบกังหันที่ออกแบบมาจะมีค่า สัมประสิทธิ์แรงยก $C_L = 1.2$ และสัมประสิทธิ์แรงหน่วง $C_D = 0.05$

2.3.7 ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหัน

ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหัน (Blade element theory) คือ ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ที่ใช้คำนวณหาค่าแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนย่อยเล็ก ๆ ของใบพัดแต่ละส่วน โดยมีข้อสมมติฐานที่ว่าแรงที่เกิดขึ้นบนแต่ละชิ้นส่วนย่อยเล็ก ๆ ของใบกังหันนั้นจะมีแค่แรงยกและแรงหน่วงเท่านั้น

(พิจารณาเป็น 2 มิติ) และสิ่งที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันแต่ละส่วนจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนย่อยของใบกังหัน ส่วนถัดไปรูปจะแสดงถึงลักษณะของใบกังหันลม ความเร็ว และแรงที่เกี่ยวข้อง โดยที่ผู้สังเกตการณ์ยืนอยู่บนใบกังหันที่หมุนจะเห็นความเร็วรวม W อันเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของความเร็วลมในแนวแกนที่ถูกชะลอให้ช้าลงจากลมต้นทางจนมีค่าเท่ากับ $V_\infty(1-a)$ กับความเร็วลมที่สังเกตเห็นจากการยืนอยู่บนใบกังหัน ซึ่งมีค่าเท่ากับความเร็วของส่วนใบกังหัน $r\Omega$ โดยมีทิศทางสวนกับความเร็วของใบกังหัน โดยที่ Ω คือความเร็วเชิงมุมของใบกังหันและมุม α เป็นมุมปะทะของความเร็วลมรวมกับเส้นแรงยกเป็นศูนย์ (zero lift line) ของชิ้นส่วนใบกังหัน มุม β เป็นมุมบิดของใบกังหันทำกับระนาบใบกังหันและ ϕ เป็นมุมที่เป็นผลรวมของมุม α และมุม β



รูปที่ 2.43 แสดงถึงใบกังหันลมพร้อมทั้งความเร็วและแรงที่เกี่ยวข้อง

แรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันจะสามารถเขียนเป็นแรงย่อยในแนวตั้งฉากและแนวนานกับระนาบใบกังหันลมได้เป็น

$$dF_n = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (2.29)$$

$$dF_t = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad (2.30)$$

$$\tan \phi = \frac{V_\infty(1-a)}{r\Omega} \quad (2.31)$$

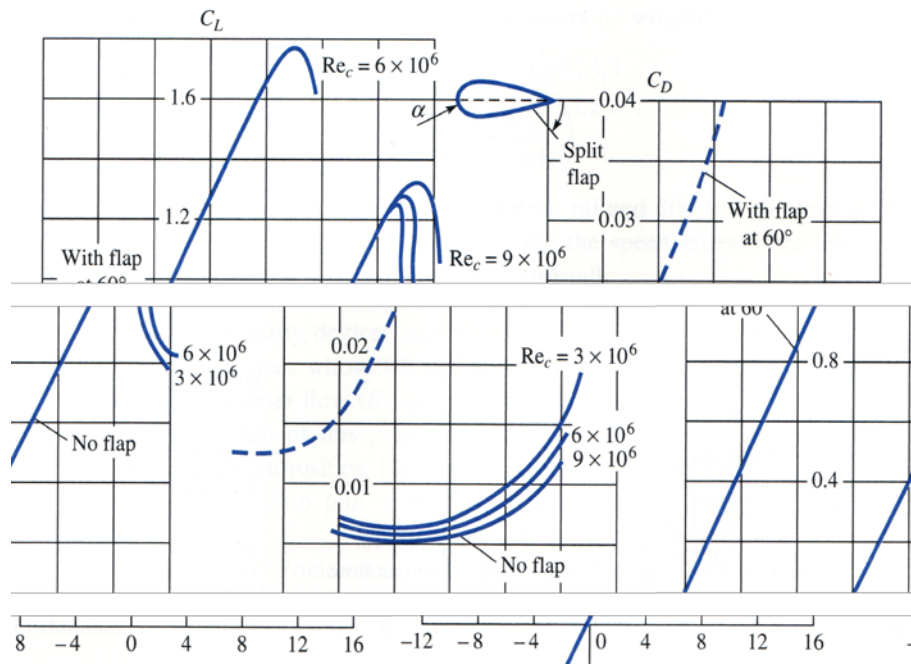
โดยที่ F_n และ F_t เป็นแรงที่อยู่ในทิศตั้งฉากและขนานกับระนาบใบกังหัน L และ D คือแรงยกและแรงหน่วง ϕ คือมุมของสามเหลี่ยมความเร็วและหากสมการถูกจัดให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ ก็จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_n = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \tag{2.32}$$

$$C_t = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \tag{2.33}$$

ค่า C_n, C_t, C_L และ C_D เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงในแนวตั้งฉาก แรงในแนวขนาน สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วง ตามลำดับ ซึ่งค่า C_L และ C_D นั้นจะสามารถหาค่าได้จากผลการทดลองสมรรถนะของแพนอากาศ ดังรูปที่แสดงถึงตัวอย่างข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของใบกังหันที่มีรูปภาคตัดขวางเป็นแพนอากาศที่แปรตามมุมปะทะ ดังนั้นค่าแรงทอร์คที่พิจารณาจากชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันที่มีขนาดความกว้างของใบเท่ากับ c และมีจำนวน B ใบนั้น จะสามารถเขียนได้เป็น

$$dT = \frac{1}{2} B \rho W^2 C_n c dr \tag{2.34}$$



รูปที่ 2.44 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของใบกังหันที่มีรูปภาคตัดขวางเป็นแพนอากาศ

2.3.8 การออกแบบเพลลา

ในการหาขนาดเพลลานั้น เพลลาจะมีโมเมนต์ที่กระทำต่อเพลลาในลักษณะที่ทำให้เกิดการบิด เรียกว่า โมเมนต์บิด (Torque) โมเมนต์บิดนี้จะเป็นส่วนที่สำคัญที่จะทำให้เพลลาเกิดการเสียหายได้ หากโมเมนต์บิดที่กระทำกับเพลลามีมากเกินไป ในการออกแบบจึงต้องพิจารณาแรงส่วนนี้เป็น สำคัญ ในการออกแบบเพลลาให้รับโมเมนต์บิดจะต้องพิจารณาไม่ให้โมเมนต์บิดมีมากเกินไป ในการกระทำกับเพลลานั้น โมเมนต์จะพยายามบิดท่อนวัสดุให้เปลี่ยนรูปไปจากเดิม โมเมนต์บิดจะทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้นในตัวเพลลา

การคำนวณการบิดจะต้องมีสมมติฐานเกี่ยวกับการบิด ดังนี้

1. จะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงระนาบของวัสดุก่อนและหลังการบิด
2. ความเค้นที่เกิดขึ้นของการบิดนั้นจะต้องไม่เกินค่าขีดจำกัดสัดส่วน
3. วัสดุนั้นต้องมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดความยาวของชิ้นส่วนวัสดุนั้นที่นำมาพิจารณา
4. รัศมีจะต้องมีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้และจะต้องเป็นไปตามกฎของฮุก

มุมบิด (Angle of twist) ของเพลลาที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานจะต้องมีค่าไม่มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ถ้ามุมบิดมากไปจะทำให้เสียความเที่ยงตรงทางด้านตำแหน่งและยังก่อให้เกิดความสั่นสะเทือนซึ่งมีผลทำให้เฟืองและเบริงที่รองรับเพลลาอยู่เกิดความเสียหายได้ง่าย

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกำลัง ลักษณะการใช้งานโดยทั่วไปของเพลลา ก็คือ การถ่ายทอดกำลังจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่ง กำลัง (Power) คือ อัตราการทำงานดังนั้นกำลังที่เกิดจากแรงบิดหรือโมเมนต์บิดก็คือ

$$P = T \times \omega = \frac{2\pi NT}{60} \quad (2.35)$$

เมื่อ	P	คือ กำลังงาน (W.) หรือ (kW.)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)
แต่	ω	มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi \times N}{60}$
และ	N	คือ ความเร็วรอบของเพลลา (rpm.)
	T	คือ โมเมนต์บิดหรือแรงบิดที่เกิดขึ้น (N · m)

สูตรในการหาความเค้นเฉือนสูงสุดของเพลาดันและเพลากลวง คือ

$$\tau_{\max} = \frac{Tr}{J} \quad (2.36)$$

เมื่อ J คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว สามารถหาได้จาก

เพลาดัน $J = \frac{\pi D^4}{32}$

เพลากลวง $J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32}$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของเพลาดัน

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเพลาดัน

2.4 ทฤษฎีการผสมเรซินหล่อใส (เบอร์ 240 BS ของเยอรมัน)

2.4.1 คุณสมบัติของเรซินเบอร์ 240 BS

เรซินเบอร์นี้ ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโรงงานแล้ว (มีสีฟ้าอ่อน) เวลาใช้งานใส่แต่ตัวทำแข็งอย่างเดียว เนื้อเรซินใสเหมือนแก้ว มีความเหนียวกว่าเบอร์เบอร์อื่นๆ ไม่แตกง่าย แห้งช้ามาก แห้งสนิทประมาณ 8-10 ชั่วโมง บางครั้งอาจต้องใช้ความร้อนอบ หรือตากแดดช่วยให้แห้งเร็วขึ้น

2.4.2 อัตราส่วนผสมของเรซินเบอร์ 240 BS

อัตราส่วนผสมของเรซินเบอร์ 240 BS นี้ใช้ประมาณ 0.5 – 1 % ต่อน้ำหนักเรซิน ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2.1 โดยจะแสดงอัตราน้ำหนักรเรซินต่ออัตราน้ำหนักรตัวทำแข็ง

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนผสมของเรซินเบอร์ 240 BS

อัตราส่วนผสมของเรซินเบอร์ 240 BS	
น้ำหนักเรซิน	ใช้ตัวทำแข็ง
1,000 กรัม (1 ก.ก.)	7 กรัม (หรือ 5 ซี.ซี.)

500 กรัม	4 กรัม (หรือ 3 ซี.ซี.)
100 กรัม	1 กรัม (ประมาณ 1 ซี.ซี. หรือ 25 หยด)
30 กรัม (1 ถ้วยแดง)	0.5 กรัม (ประมาณ 10 – 12 หยด ของหลอด 15 ซี.ซี.)

ส่วนผสมตามตัวอย่างนี้ ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จึงถอดออกจากแม่พิมพ์ได้แล้ววางไว้จนกว่าจะแห้งสนิท 10 ชั่วโมง

2.4.3 คำแนะนำและข้อระวัง

- ถ้าทำงานช่วงบ่ายแดดร้อนจัด ควรลดตัวทำแข็งลงใช้ 0.5-1% ถ้าทำงานช่วงค่ำหรือตอนฝนตก อากาศเย็นต้องเพิ่มตัวทำแข็งเป็น 1-2% (ไม่ควรใช้มากกว่านี้ ชิ้นงานจะแตกร้าวเองได้)

- เรซินมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาชื่อ *ระยะแรก* จะเป็นลักษณะคล้ายวุ้นภายใน 20 – 30 นาที *ระยะที่สอง* จะเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนแห้งสนิท ฉะนั้นเมื่อใส่ตัวทำแข็งแล้วต้องรีบกวนให้เข้ากัน และใช้งานให้หมดภายใน 20 นาที

- ถ้างานที่หล่อเป็นชิ้นใหญ่ หรือ หนามาก ต้องลดตัวทำแข็งลง เพราะปริมาณเรซินมากก็จะเกิดความร้อนมาก ทำให้แห้งเร็วขึ้นอาจทำไม่ทัน และเมื่อชิ้นงานแห้งสนิทจะแตกเอง ถ้าใส่ตัวเร่งมาก(ต้องลดลง)

- ควรผสมสีหรือผงหินอ่อนในเรซินก่อนและแช่ทิ้งไว้ครึ่งวัน ในขณะที่กวนให้เข้ากันมันจะเกิดฟองมาก ควรตั้งทิ้งไว้ให้ฟองหมดเสียก่อน แล้วจึงนำมาแบ่งใส่ตัวแข็งภายหลังเมื่อจะใช้งาน

- เรซินทุกเบอร์ ถ้าเก็บไว้นานหลายเดือนจะข้นมากใช้งานไม่ได้ ต้องผสมโมโนสไตรีน (หรือ สไตรีน โมโนเมอร์) ประมาณ 5-7% ของน้ำหนักเรซิน กวนให้เข้ากันให้เรซินเหลวเหมือนใหม่ แล้วทิ้งให้ฟองอากาศหมดก่อนประมาณ 3 ชั่วโมงขึ้นไป จึงแบ่งออกมาผสมตัวแข็งใช้งานต่อไป