

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ชนิดและประโยชน์ของพลังงานน้ำ

พลังงานน้ำเป็นรูปแบบหนึ่งของการสร้างกำลังโดยการอาศัยพลังงานของน้ำที่เคลื่อนที่ ปัจจุบันนี้พลังงานน้ำส่วนมากจะถูกใช้เพื่อผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้แล้วพลังงานน้ำยังถูกนำไปใช้ในการชลประทาน การทอผ้า และใช้ในโรงเลื่อย พลังงานของมวลน้ำที่เคลื่อนที่ได้ถูกมนุษย์นำมาใช้งานหลายศตวรรษแล้ว โดยได้มีการสร้างกังหันน้ำเพื่อใช้ในการงานต่าง ๆ ในอินเดีย และชาวโรมันก็ได้มีการประยุกต์ใช้เพื่อใช้ในการโม่แป้งจากเมล็ดพืชต่าง ๆ ส่วนผู้คนในประเทศจีนและประเทศแถบตะวันออกไกลก็ได้มีการใช้พลังงานน้ำเพื่อสร้าง Pot Wheel สำหรับใช้ในการช่วยวิดน้ำเพื่อการชลประทาน โดยในช่วงทศวรรษ 1830 ซึ่งเป็นยุคที่การสร้างคลองเฟื่องฟูถึงขีดสุด ก็ได้มีการประยุกต์เอาพลังงานน้ำมาใช้เพื่อขับเคลื่อนเรือขึ้นและลงจากเขา โดยอาศัยรางรถไฟที่ลาดเอียง โดยตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานแบบนี้อยู่ที่คลอง Tyrone ในไอร์แลนด์เหนือ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการประยุกต์ใช้พลังงานน้ำในยุคแรกนั้นเป็นการส่งต่อพลังงานโดยตรง (Direct Mechanical Power Transmission) ทำให้การใช้พลังงานน้ำในยุคนั้นต้องอยู่ใกล้แหล่งพลังงาน เช่น น้ำตก แม่น้ำ เป็นต้น ปัจจุบันนี้พลังงานน้ำได้ถูกใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้า ทำให้สามารถส่งต่อพลังงานไปใช้ในที่ห่างไกลจากแหล่งน้ำได้

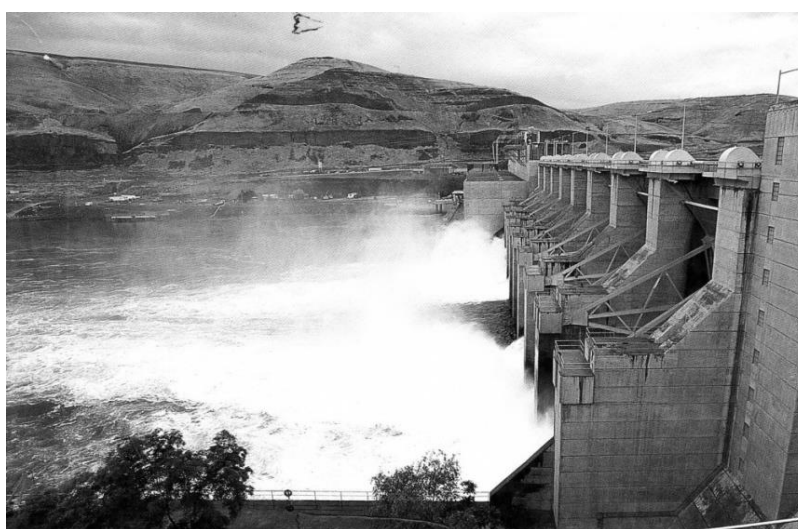
2.1.1 ชนิดของพลังงานน้ำ

พลังงานน้ำโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

2.1.1.1 พลังงานน้ำตก

พลังงานน้ำตกเป็นพลังงานที่สามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าได้โดยอาศัยพลังงานของน้ำตกจากธรรมชาติหรือน้ำตกที่เกิดจากการตัดแปลงสภาพธรรมชาติ เช่น น้ำตกที่เกิดจากการสร้างเขื่อนกั้นน้ำ (รูปที่ 2.1) น้ำตกจากทะเลสาบบนเทือกเขาสูงหุบเขา กระแสน้ำในแม่น้ำไหลตกหน้าผา เป็น

ต้น การสร้างเขื่อนกั้นน้ำและให้น้ำตกไหลผ่านกังหันน้ำซึ่งติดอยู่บนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังงานน้ำที่ได้จะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของน้ำและอัตราการไหลของน้ำที่ปล่อยลงมา ดังนั้นการผลิตพลังงานจากพลังงานนี้จำเป็นต้องมีบริเวณที่เหมาะสมและการสร้างเขื่อนนั้นจะต้องลงทุนอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามจากการสำรวจคาดว่าทั่วโลกสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจากกำลังน้ำมากกว่าพลังงานทดแทนประเภทอื่น



รูปที่ 2.1 พลังงานน้ำตกที่เกิดจากการสร้างเขื่อนกั้นน้ำ

(Daugherty and Franzini, 1989)

2.1.1.2 พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง

พลังงานน้ำขึ้นน้ำลงเป็นพลังงานที่มีพื้นฐานมาจากพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของระบบที่ประกอบด้วยดวงอาทิตย์ โลก และดวงจันทร์ จึงจัดเป็นแหล่งพลังงานประเภทใช้แล้วไม่หมดไป สำหรับในการเปลี่ยนพลังงานน้ำขึ้นน้ำลงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า คือ เลือกแม่น้ำหรืออ่าวที่มีพื้นที่เก็บน้ำได้มากและพิสัยของน้ำขึ้นน้ำลงมีค่าสูงแล้วสร้างเขื่อนที่ปากแม่น้ำหรือปากอ่าว เพื่อให้เกิดเป็นอ่างเก็บน้ำขึ้นมา (รูปที่ 2.2) เมื่อน้ำขึ้นจะไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำ และเมื่อน้ำลงน้ำจะไหลออกจากอ่างเก็บน้ำ การไหลเข้าออกจากอ่างของน้ำต้องควบคุมให้ไหลผ่านกังหันน้ำที่ต่อเชื่อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อกังหันน้ำหมุนก็จะได้ไฟฟ้าออกมาใช้งานหลักการผลิตไฟฟ้าจากน้ำขึ้นน้ำลงมีหลักการเช่นเดียวกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำตก แต่กำลังที่ได้จากพลังงานน้ำขึ้นน้ำลงจะไม่

ค่อยสม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงไปมากในช่วงขึ้นลงของน้ำ แต่อาจจัดให้มีพื้นที่กักน้ำเป็นสองบริเวณหรือบริเวณพื้นที่เดียว โดยการจัดระบบการไหลของน้ำระหว่างบริเวณบ่อสูงและบ่อต่ำ และกักบริเวณภายนอกในช่วงที่มีการขึ้นลงของน้ำอย่างเหมาะสม จะทำให้กำลังงานพลังงานน้ำขึ้นน้ำลงสม่ำเสมอดีขึ้น



รูปที่ 2.2 พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง

2.1.1.3 พลังงานคลื่น

พลังงานคลื่นเป็นการเก็บเกี่ยวเอาพลังงานที่ลมถ่ายทอดให้กับผิวน้ำในมหาสมุทรเกิดเป็นคลื่นวิ่งเข้าสู่ชายฝั่งและเกาะแก่งต่างๆ เครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานคลื่นจะถูกออกแบบให้ลอยตัวอยู่บนผิวน้ำบริเวณหน้าอ่าวด้านหน้าที่หันเข้าหาดคลื่น การใช้คลื่นเพื่อผลิตไฟฟ้านั้นถ้าจะให้ได้ผลจะต้องอยู่ในโซนที่มียอดคลื่นเฉลี่ยอยู่ที่ 8 เมตร ซึ่งบริเวณนั้นต้องมีแรงลมด้วย แต่จากการวัดความสูงของยอดคลื่นสูงสุดในประเทศไทยที่จังหวัดระนองพบว่า ยอดคลื่นสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 4 เมตรเท่านั้น ซึ่งก็แน่นอนว่าด้วยเทคโนโลยี การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานคลื่นในปัจจุบันนั้นยังคงไม่สามารถใช้ในประเทศไทยได้อย่างจริงจัง

2.1.2 ประโยชน์ของพลังงานน้ำ

- พลังงานน้ำเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ไม่หมดสิ้น คือเมื่อใช้พลังงานของน้ำส่วนหนึ่งไปแล้วน้ำส่วนนั้นก็จะไหลลงสู่ทะเลและน้ำในทะเลเมื่อได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ก็จะระเหยกลายเป็นไอน้ำ เมื่อไอน้ำรวมตัวเป็นเมฆจะตกลงมาเป็นฝนหมุนเวียนกลับมาทำให้เราสามารถนำพลังงานน้ำได้ตลอดไปไม่หมดสิ้น

- เครื่องจักรกลพลังงานน้ำสามารถเริ่มดำเนินการผลิตพลังงานได้ในเวลาอันรวดเร็ว และควบคุมให้ผลิตกำลังงานออกมาได้ใกล้เคียงกับความต้องการ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงมาก ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลพลังงานน้ำส่วนใหญ่จะมีความคงทน และมีอายุการใช้งานนานกว่าเครื่องจักรกลอย่างอื่น

- เมื่อนำพลังงานน้ำไปใช้แล้ว น้ำยังคงมีคุณภาพเหมือนเดิมทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อีก เช่น เพื่อการชลประทาน การรักษาระดับน้ำในแม่น้ำให้ไหลลึกพอแก่การเดินเรือ เป็นต้น

- การสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บและทดน้ำให้สูงขึ้น สามารถช่วยกักน้ำเอาไว้ใช้ในช่วงที่ไม่มีฝนตก ทำให้ได้แหล่งน้ำขนาดใหญ่สามารถใช้เลี้ยงสัตว์น้ำหรือใช้เป็นสถานที่ท่องเที่ยวได้ และยังช่วยรักษาระบบนิเวศของแม่น้ำได้โดยการปล่อยน้ำจากเขื่อนเพื่อให้น้ำไหลลงสู่โครกในแม่น้ำที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังสามารถใช้ให้น้ำดื่มซึ่งขึ้นมาจากทะเลก็ได้

2.2 กังหันน้ำ

กังหันน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาจากกังหันน้ำซึ่งเดิมใช้สำหรับการทดน้ำและโมแป็งในปี ค.ศ. 1832 วิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อเบเนอยต์ ฟูเนรองซ์ (Benoit Fourneyron) ประสบความสำเร็จในการพัฒนากังหันน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนพลังงานน้ำไปเป็นพลังงานกล โดยเรียกชื่อว่า กังหันน้ำของฟูเนรองซ์ (Fourneyron's turbine) หลังจากที่วงล้อน้ำไม่เคยมีการพัฒนาหรือเปลี่ยนแปลงมากกว่า 2,000 ปีก่อนหน้านี้นี้ จุดนี้นับเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนากังหันน้ำ ในปัจจุบันกังหันน้ำได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันมากมายและมีประสิทธิภาพสูง กังหันน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเพราะจะทำหน้าที่ในการ

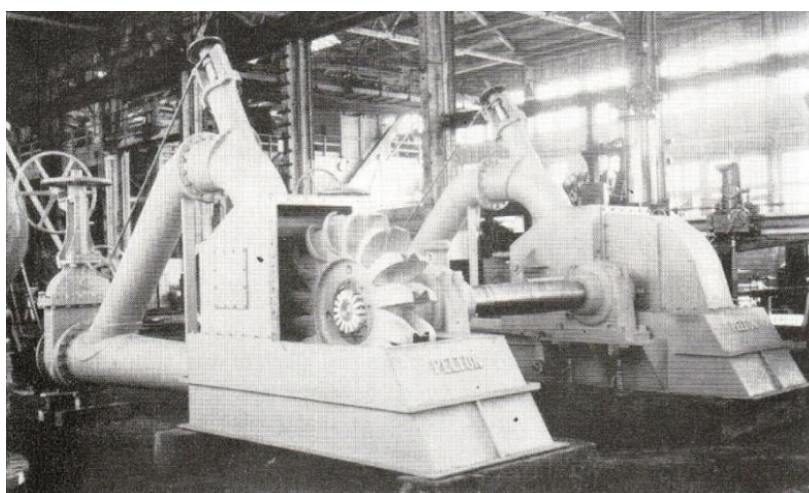
เปลี่ยนพลังงานจลน์ของน้ำไปเป็นพลังงานกล โดยการทำให้ใบพัดของกังหันน้ำเกิดการหมุนส่งผลให้แกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่หมุนตาม และสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้

2.2.1 ชนิดของกังหันน้ำ

กังหันน้ำนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดดังนี้

2.2.1.1 กังหันน้ำชนิด Impulse

กังหันน้ำชนิด Impulse หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่ากังหันน้ำชนิด Pelton (รูปที่ 2.3) ส่วนประกอบที่สำคัญของกังหันน้ำชนิด Impulse ซึ่งประกอบด้วยใบกังหันที่มีลักษณะเป็นวงล้อที่มีกลีบใบพัดลูกถ้วยติดอยู่ที่ปลายหัวฉีด ซึ่งติดอยู่ที่ปลายของท่อลำเลียงน้ำที่ทำหน้าที่เป็นตัวฉีดน้ำเข้าไปกระทบกับใบพัดลูกถ้วย และมีวาล์วปรับอัตราการไหลทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากหัวฉีดให้เป็นไปตามภาระที่ต้องการ ส่วนระบบท่อลำเลียงน้ำจะประกอบไปด้วย Pressure tunnel และท่อส่งน้ำ (Penstock) และสุดท้าย Surge tank ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดแรงที่เกิดขึ้นจากการเกิด Water hammer ที่เกิดขึ้นในระบบท่อลำเลียงน้ำ ซึ่งเป็นผลจากการปรับอัตราการไหลอย่างรวดเร็ว

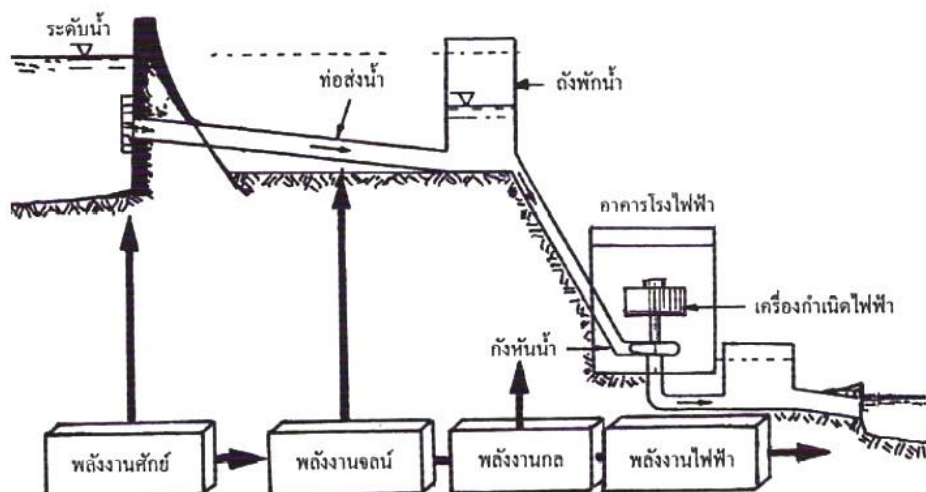


รูปที่ 2.3 กังหันน้ำชนิด Impulse

(Creager and Justin, 1963)

2.2.1.2 กังหันน้ำชนิด Reaction

กังหันน้ำชนิด Reaction เป็นกังหันที่ทำงาน โดยการเปลี่ยนแปลงของเสถรวมซึ่งประกอบด้วยเสถความดันและเสถความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าหน้าแปลนทางเข้าและไหลออกที่หน้าแปลนทางออกของกังหัน เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเสถความดัน ซึ่งหลักการทำงานของกังหันน้ำชนิด Reaction ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ยังพบว่ากังหันน้ำชนิด Reaction มีข้อดีกว่ากังหันน้ำชนิด Impulse ตรงที่มีขนาดเล็กกว่าในการให้กำลังที่เท่ากัน และโดยทั่วไปกังหันประเภทนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิดคือ กังหันน้ำชนิด Francis (แบบไหลตามแนวรัศมี) และกังหันน้ำชนิด Propeller (แบบไหลตามแนวแกน)

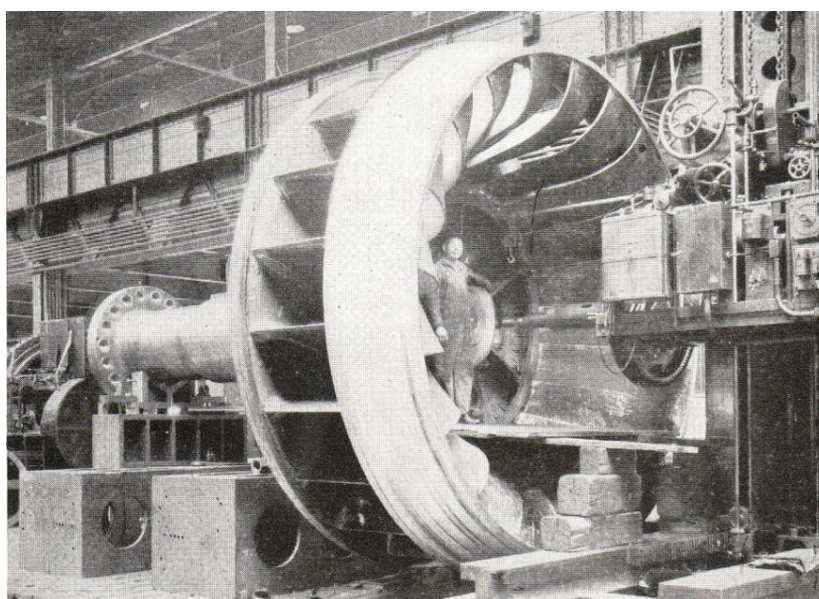


รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของกังหันน้ำชนิด Reaction

2.2.1.2.1 กังหันน้ำชนิด Francis

กังหันน้ำชนิด Francis ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1849 โดยวิศวกรชาวอเมริกันที่ชื่อว่า James B. Francis กังหันชนิดนี้อาศัยหลักการที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นกับใบพัดที่หมุน และ โครงสร้างพื้นฐานของกังหันน้ำชนิด Francis คือปล่อยน้ำให้ไหลเข้ามาจากอาคารรับน้ำ หลังจากนั้นน้ำจะไหลผ่านท่อส่งน้ำเข้ามาสู่ Spiral casing และจะไหลผ่าน Guide vane เพื่อเข้าสู่ตัวกังหันและจะขับใบกังหันให้หมุนต่อไป โดยที่ Guide vane นี้จะสามารถปรับความกว้าง

เพื่อควบคุมปริมาณน้ำที่จะไหลเข้าสู่ใบพัดได้ ซึ่งกังหันน้ำชนิดนี้จะมีทิศทางการไหลเข้าตามแนวรัศมีและมีทิศทางการไหลออกขนานกับแนวแกน และกังหันน้ำชนิดนี้นั้นเหมาะกับการใช้งานที่มีปริมาณน้ำและเสถียรภาพสูงระดับปานกลาง (แหล่งน้ำที่มีเสถียรภาพสูงระหว่าง 25 ถึง 500 เมตร) รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างของกังหันน้ำชนิด Francis ที่มีขนาดกำลัง 30,000 แรงม้า

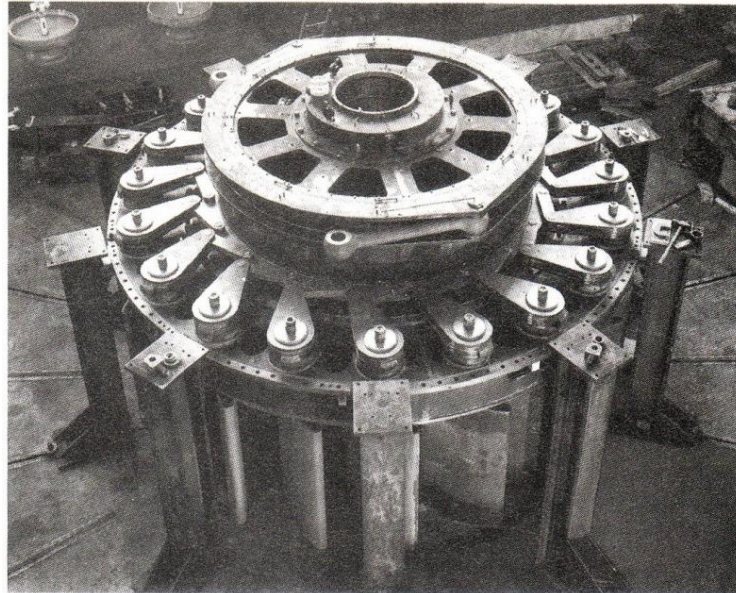


รูปที่ 2.5 กังหันน้ำชนิด Francis ขนาด 30,000 แรงม้า

(Creager and Justin, 1963)

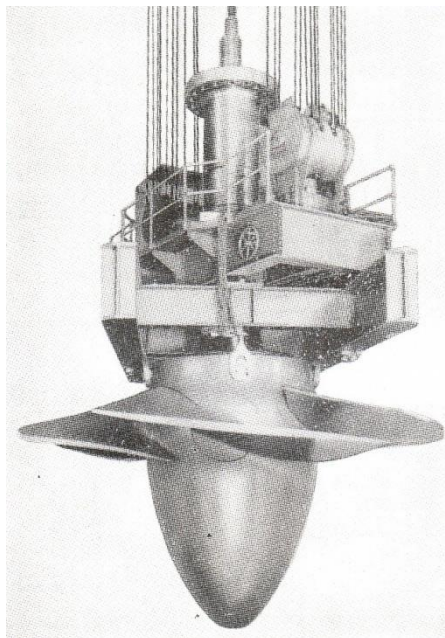
2.2.1.2.1 กังหันน้ำชนิด Propeller

กังหันน้ำชนิดนี้มีหลักการทำงานคล้ายกับกังหันน้ำชนิด Francis แต่แตกต่างกันที่โครงสร้างที่กังหันน้ำชนิดนี้ออกแบบไว้ใช้กับปริมาณน้ำที่ไหลมากและเสถียรภาพสูงกว่า กังหันน้ำชนิดนี้เหมาะกับแหล่งน้ำที่มีเสถียรภาพสูงตั้งแต่ 1 ถึง 70 เมตร และมีหลักการทำงานโดยให้น้ำไหลผ่านใบพัดในทิศทางขนานกับแกนของกังหันน้ำ และกังหันน้ำชนิดนี้จะมีอุปกรณ์ควบคุมความเร็วและทิศทางการไหลเข้าของน้ำคือ Guide vane หรือ Wicket gate (รูปที่ 2.6) ซึ่งถ้า Guide vane ไม่สามารถปรับมุมเพื่อควบคุมความเร็วและทิศทางการไหลเข้าของน้ำได้เราเรียกว่ากังหันน้ำชนิด Propeller แต่ถ้า Guide vane สามารถปรับมุมเพื่อควบคุมความเร็วและทิศทางการไหลเข้าของน้ำได้เราเรียกว่ากังหันน้ำชนิด Kaplan (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.6 Guide vanes ของกังหันน้ำชนิด Kaplan

(Creager and Justin, 1963)



รูปที่ 2.7 กังหันน้ำชนิด Kaplan ขนาด 74,000 แรงม้า

(Creager and Justin, 1963)

2.2.2 การวิเคราะห์กังหันน้ำ

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องจักรกังหันน้ำจะวิเคราะห์โดยใช้หลักการของกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมกล่าวคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุมในปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับแรงบิดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมรวมกับอัตราสุทธิของโมเมนตัมเชิงมุมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

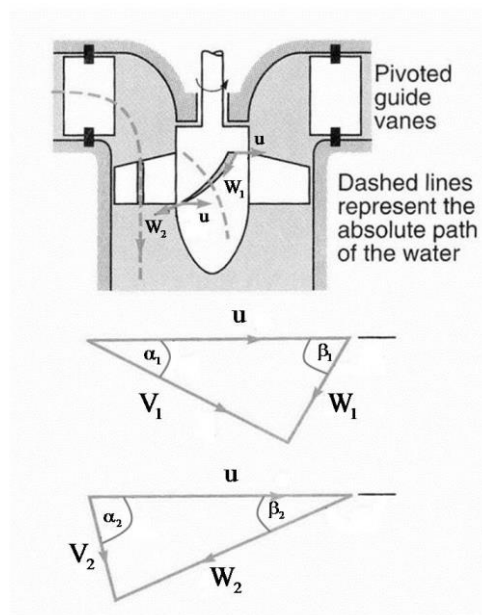
2.2.2.1 สมการเครื่องจักรกังหันของ Euler

สำหรับการวิเคราะห์เกี่ยวกับกังหันน้ำนั้น เราจะประยุกต์สมการโมเมนตัมของโมเมนตัมเพื่อจะได้สมการที่เรียกว่าสมการเครื่องจักรกังหันของ Euler ดังแสดงในสมการที่ (2.1) โดยพิจารณารูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นรูปหลายมุมของความเร็วของกังหันน้ำชนิดไหลตามแนวแกน เพื่อวิเคราะห์หาแรงบิดที่เพลลา เราจะได้ว่าแรงบิดเนื่องจากแรงบนผิวและแรงต่อวัตถุไม่มีหรือน้อยมาก

$$T = \rho Q(r_1 V_1 \cos \alpha_1 - r_2 V_2 \cos \alpha_2) \quad (2.1)$$

และสำหรับงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์กังหันน้ำชนิดไหลตามแนวแกนเท่านั้น ซึ่งกังหันน้ำชนิดนี้จะมีรัศมีที่ตำแหน่งทางเข้าเท่ากับที่ตำแหน่งทางออกเท่ากัน ดังนั้น สามารถเขียนสมการที่ (2.1) ได้ใหม่ดังนี้

$$T = \rho Q r (V_1 \cos \alpha_1 - V_2 \cos \alpha_2) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.8 รูปหลายมุมของความเร็วของกังหันน้ำชนิดไหลตามแนวแกน

(Daugherty and Franzini, 1989)

เมื่อ u คือ ความเร็วเชิงเส้นของใบพัด, (m/s)

V_a คือ ความเร็วสัมผัสของของไหล, (m/s)

V_1 คือ ความเร็วสัมผัสของของไหลที่ตำแหน่งทางเข้า, (m/s)

V_2 คือ ความเร็วสัมผัสของของไหลที่ตำแหน่งทางออก, (m/s)

W_1 คือ ความเร็วสัมผัสของของไหลที่ตำแหน่งทางเข้า, (m/s)

W_2 คือ ความเร็วสัมผัสของของไหลที่ตำแหน่งทางออก, (m/s)

α_1 คือ มุมของความเร็วสัมผัสที่ตำแหน่งทางเข้า (มุมที่ของไหลไหลเข้ากังหันน้ำ)

α_2 คือ มุมของความเร็วสัมผัสที่ตำแหน่งทางออก (มุมที่ของไหลไหลออกกังหันน้ำ)

β_1 คือ มุมของความเร็วสัมผัสที่ตำแหน่งทางเข้า (มุมของใบพัดที่ทางเข้า)

β_2 คือ มุมของความเร็วสัมผัสที่ตำแหน่งทางออก (มุมของใบพัดที่ทางออก)

สำหรับความเร็วที่ใช้ในสมการที่ (2.2) นั้น จะเป็นองค์ประกอบของความเร็วในแนวสัมผัส โดยมีเครื่องหมายบวก ถ้ามีทิศทางเดียวกันกับความเร็วเชิงเส้นของใบพัด ซึ่งสามารถหาหาความเร็วเชิงเส้นของใบพัดและกำลังทางกลของกังหันน้ำได้จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$u = \omega r \quad (2.3)$$

$$P_r = \omega T \quad (2.4)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของใบพัด, (rad/s)

r คือ รัศมีของใบพัดที่ตำแหน่งใด ๆ, (m)

ซึ่งสมการที่ (2.2) และ (2.4) เป็นสมการที่สามารถหาแรงบิดหรือกำลังงาน โดยคำนึงถึงเฉพาะการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของโมเมนต์เท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงความเสียดทาน หรือความสูญเสียเนื่องจากการไหล

และจากสมการที่ (2.2) ถึง (2.4) เราจะสามารถหาเสดเนื่องจากการไหล หรือเสดของ Euler ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$H_m = \frac{u(V_1 \cos \alpha_1 - V_2 \cos \alpha_2)}{g} \quad (2.5)$$

และความเร็วสัมบูรณ์ของของไหลตามแนวแกนสามารถหาได้จากสัดส่วนระหว่างอัตรา การไหลเชิงปริมาตรกับพื้นที่ที่ตัดฉากกับความเร็วมุมของของไหลตามแนวแกน (มีลักษณะเป็นพื้นที่รูปวงแหวน) ดังสมการที่ (2.6)

$$V_a = \frac{Q}{A_d} \quad (2.6)$$

$$A_d = \pi(r_t^2 - r_h^2) \quad (2.7)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร, (m^3/s)

A_d คือ พื้นที่ที่ตัดฉากกับความเร็วสัมผัสของของไหลตามแนวแกน, (m^2)

r_t คือ รัศมีของใบพัด, (m)

r_h คือ รัศมีของคูล, (m)

และสำหรับทฤษฎีการออกแบบกังหันน้ำนั้นจะทำการวิเคราะห์การออกแบบที่จุดกึ่งกลางของใบพัด ซึ่งสามารถหารัศมีเฉลี่ยได้จากสมการที่ (2.8) และสามารถหาความเร็วเชิงเส้นของใบพัดได้จากสมการที่ (2.9)

$$r_m = \frac{r_h + r_t}{2} \quad (2.8)$$

$$u = \omega r_m \quad (2.9)$$

และสำหรับการออกแบบกังหันน้ำทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจะสมมติให้มุมของความเร็วสัมผัสที่ตำแหน่งทางออก (α_2) มีค่าเท่ากับ 90 องศา ดังนั้นจึงทำให้ความเร็วสัมผัสของของไหลที่ตำแหน่งทางออกมีค่าเท่ากับความเร็วสัมผัสของของไหล

$$V_2 = V_a \quad (2.10)$$

และจากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติของรูปหลายมุมของความเร็วของกังหันน้ำชนิดไหลตามแนวแกน (รูปที่ 2.8) ทำให้เราสามารถหาค่าของความเร็วและมุมต่างๆ เพื่อนำไปออกแบบหาขนาดของกังหันน้ำได้ดังนี้ ความเร็วสัมผัสของของไหลที่ตำแหน่งทางเข้าเท่ากับ

$$V_1 = \frac{V_a}{\sin \alpha_1} \quad (2.11)$$

มุมของความเร็วสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งทางเข้าเท่ากับ

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{V_a}{u - V_1 \cos \alpha_1} \right) \quad (2.12)$$

ความเร็วสัมพัทธ์ของของไหลที่ตำแหน่งทางเข้าเท่ากับ

$$W_1 = \frac{V_a}{\sin \beta_1} \quad (2.13)$$

มุมของความเร็วสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งทางออกเท่ากับ

$$\beta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{V_2}{u} \right) \quad (2.14)$$

ความเร็วสัมพัทธ์ของของไหลที่ตำแหน่งทางออกเท่ากับ

$$W_2 = \sqrt{u^2 + V_2^2} \quad (2.15)$$

และสามารถหาค่าลึงของของไหลที่ให้งั้นน้ำได้จากสมการที่ (2.16)

$$P_i = \rho g H Q \quad (2.16)$$

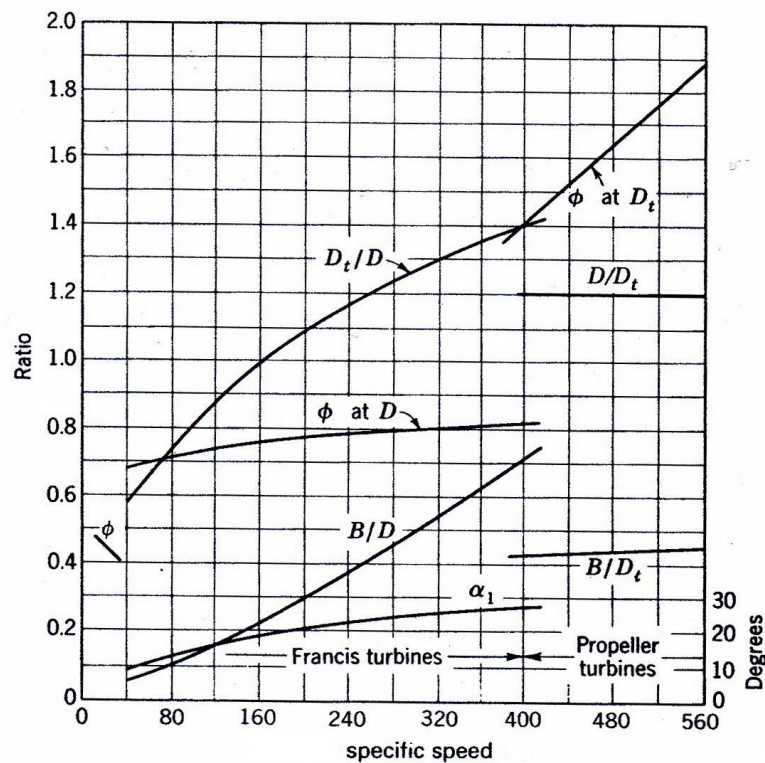
และสามารถหาประสิทธิภาพไฮดรอลิกได้จากสมการที่ (2.17)

$$\eta_h = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.17)$$

และสามารถหา Peripheral-velocity factor ได้จากสมการที่ (2.18)

$$\phi = \frac{\omega r_t}{\sqrt{2gH}} \quad (2.18)$$

ซึ่งกังหันน้ำแต่ละชนิดจะมีค่า Peripheral-velocity factor ที่เหมาะสมแตกต่างกัน รูปที่ 2.9 จะแสดงถึงช่วงของค่า Peripheral-velocity factor ที่เหมาะสมสำหรับกังหันน้ำแต่ละชนิด ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 2.9 แล้ว พบว่าค่า Peripheral-velocity factor ที่เหมาะสมกับกังหันน้ำชนิด Propeller ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1.4 – 2.0



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะกับ Peripheral-velocity factor

(Daugherty and Franzini, 1989)

2.2.2.2 ตัวแปรคุณลักษณะของกังหันน้ำ

การวิเคราะห์การทำงานของกังหันน้ำด้วยตัวแปรคุณลักษณะหรือตัวแปรไร้มิติโดยทั่วไป ได้วิเคราะห์โดยใช้ตัวแปรคุณลักษณะทั้งหมด 3 ตัว คือ สัมประสิทธิ์อัตราการใช้ (C_Q) สัมประสิทธิ์เสด (C_H) และสัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) ดังเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C_Q = \frac{Q}{d_t^3 N} \quad (2.19)$$

$$C_H = \frac{H}{d_t^2 N^2} \quad (2.20)$$

$$C_P = \frac{P_r}{\rho g d_t^5 N^3} \quad (2.21)$$

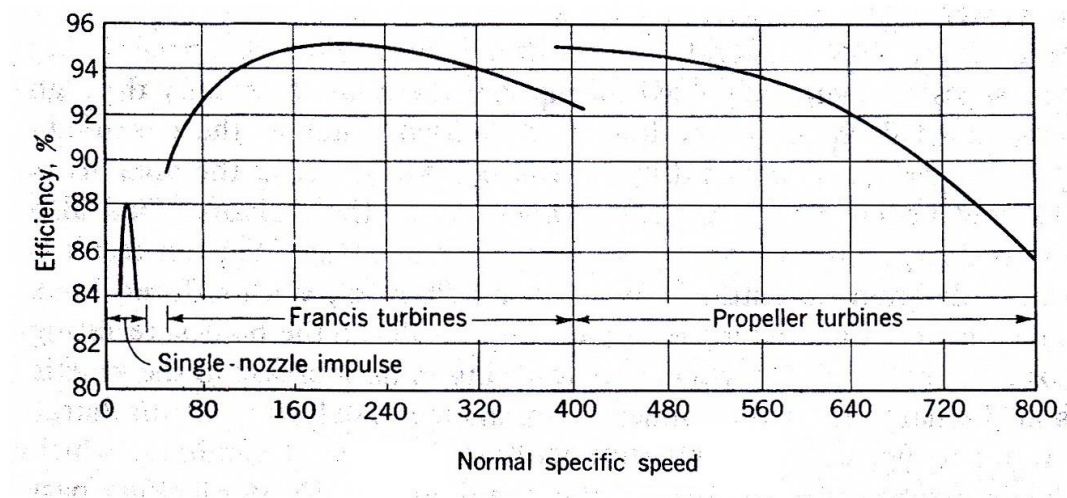
เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของกังหันน้ำ, (rpm)

และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.19) ถึง (2.21) แล้ว จะได้สมการของตัวแปรไร้มิติตัวใหม่ขึ้นมาคือ ความเร็วจำเพาะ (Specific speed) ดังเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$N_s = \frac{N(P_r)^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (2.22)$$

ความเร็วจำเพาะถือได้ว่าเป็นตัวแปรไร้มิติที่สำคัญมากสำหรับการวิเคราะห์กังหันน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นตัวแปรที่ทำให้ทราบว่ากังหันน้ำชนิดไหนเหมาะสมกับงานรูปแบบไหนด้วย

ซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.10 จะเห็นว่ากังหันน้ำชนิด Impulse นั้นเหมาะสมสำหรับงานที่มีความเร็วจำเพาะต่ำและเสดความสูงค่อนข้างสูง กังหันน้ำชนิด Francis เหมาะสมกับงานที่มีความเร็วจำเพาะปานกลางและเสดความสูงปานกลาง ส่วนกังหันชนิด Propeller เหมาะสมกับงานที่มีความเร็วจำเพาะสูงและเสดความสูงต่ำ



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะกับประสิทธิภาพ

(Daugherty and Franzini, 1989)

2.2.2.3 ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ

ประสิทธิภาพรวมของกังหันน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้านั้นจะเป็นประสิทธิภาพที่รวมการสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบซึ่งประกอบด้วย กังหันน้ำ ท่อส่งน้ำ ระบบส่งถ่ายกำลัง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพรวมของกังหันน้ำได้จากสมการที่ (2.23) หรือ (2.24)

$$\eta_o = \frac{P_E}{P_i} \quad (2.23)$$

$$\eta_o = \eta_h \eta_m \eta_g \quad (2.24)$$

เมื่อ P_E คือ กำลังไฟฟ้าที่กังหันน้ำผลิตได้, (W)

η_m คือ ประสิทธิภาพของระบบส่งถ่ายกำลัง

η_g คือ ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

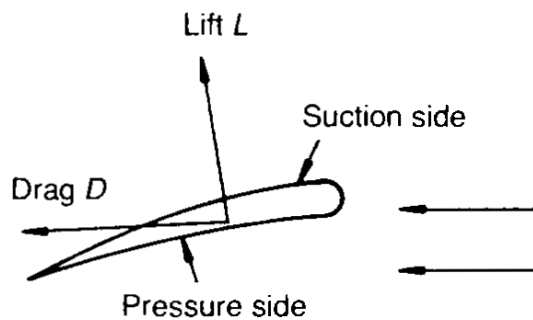
2.2.2.4 ทฤษฎีปีก (Wing Theory)

ทฤษฎีปีกนั้นมีสมมติฐาน คือ สมมติให้แรงที่กระทำบนส่วนย่อยของใบพัดมีเฉพาะแรงยก (Lift) และแรงต้าน (Drag) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และสามารถแตกแรงยกและแรงต้านในแนวสัมผัสและแนวแกนตามรูปที่ 2.12 ได้ดังสมการที่ (2.25) และ (2.26) ตามลำดับ

$$F_t = L \sin \beta_m + D \cos \beta_m \quad (2.25)$$

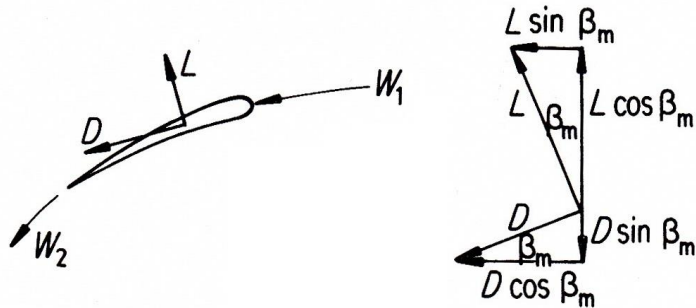
$$F_a = L \cos \beta_m - D \sin \beta_m \quad (2.26)$$

$$\beta_m = \cot^{-1} \frac{1}{2} (\cot \beta_1 + \cot \beta_2) \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.11 แรงยกและแรงต้านที่กระทำกับใบพัด

(Turton, 1995)



รูปที่ 2.12 การแตกแรงยกและแรงต้านที่กระทำกับใบพัดในแนวสัมผัสและแนวแกน

(Turton, 1995)

และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (Lift coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) คือ

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{\text{Pro}}} \quad (2.28)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{\text{Pro}}} \quad (2.29)$$

เมื่อ L คือ แรงยก

D คือ แรงต้าน

A_{Pro} คือ พื้นที่ที่โปรเจกชันของใบพัด

β_m คือ มุมของความเร็วสัมพัทธ์เฉลี่ย (รูปที่ 2.13)

ดังนั้น จากสมการที่ (2.25) ถึง (2.29) จะสามารถหาแรงลัพธ์ที่กระทำกับใบพัดได้ดังสมการที่ (2.30) และ (2.31)

$$F_T = \rho \frac{V_a^2}{2} c \left(\frac{C_L \sin \beta_m + C_D \cos \beta_m}{\sin^2 \beta_m} \right) \quad (2.30)$$

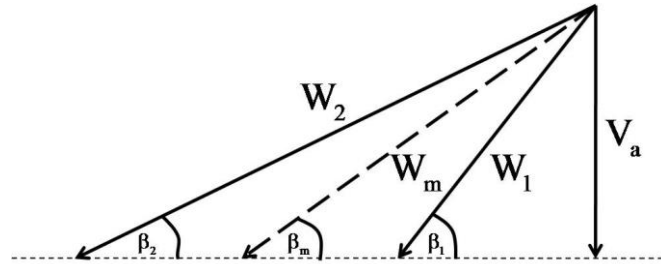
$$F_T = \rho V_a^2 s (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) \quad (2.31)$$

และจากสมการที่ (2.30) และ (2.31) จะได้

$$C_L = 2 \frac{s}{c} (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) \sin \beta_m - C_D \cot \beta_m \quad (2.32)$$

และเนื่องจากค่า $\frac{C_D}{C_L}$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (2.32) ได้ใหม่คือ

$$C_L = 2 \frac{s}{c} (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) \sin \beta_m \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.13 ความเร็วสัมพัทธ์เฉลี่ยและมุมของความเร็วสัมพัทธ์เฉลี่ย

และสามารถเขียนเป็นสมการสำหรับงานของเครื่องจักรกังหันที่ได้ (Work done equation) คือ

$$\psi = \frac{V_a}{2u} C_L \frac{c}{s} \operatorname{cosec} \beta_m \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \cot \beta_m \right) \quad (2.34)$$

และเนื่องจากค่า $\frac{C_D}{C_L}$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (2.34) ได้ใหม่คือ

$$\psi = \frac{V_a}{2u} C_L \frac{c}{s} \operatorname{cosec} \beta_m \quad (2.35)$$

นอกจากนี้งานที่ได้จากเครื่องจักรกังหันยังสามารถหาได้จากสมการที่ (2.36) และค่า Solidity ซึ่งคือสัดส่วนระหว่างความยาวคอร์ดกับระยะช่องว่างระหว่างใบพัดสามารถหาได้จากสมการที่ (2.37)

$$\psi = \frac{g\eta_h H}{u^2} \quad (2.36)$$

$$\sigma = \frac{c}{s} \quad (2.37)$$

$$s = \frac{2\pi r}{z} \quad (2.38)$$

เมื่อ c คือ ความยาวคอร์ด, (m) (รูปที่ 2.16)

s คือ ระยะช่องว่างระหว่างใบพัด, (m) (รูปที่ 2.16)

z คือ จำนวนใบพัด

2.2.2.5 ทฤษฎี Blade element

การพิจารณาโดยใช้วิธี Blade element นั้นจะพิจารณาโดยการแบ่งภาคตัดขวางของใบพัดออกเป็นส่วนเล็กๆ หลายๆ ส่วนตามแนวรัศมิดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยที่แต่ละส่วนมีความกว้างเท่าๆ กันคือกว้างเท่ากับ Δr และมีความยาวคอร์ดที่เปลี่ยนแปลงตามรัศมีที่เปลี่ยนไป ซึ่งในการพิจารณาหาแรงบิดรวมของใบพัดได้จากผลรวมของแรงบิดที่ส่วนเล็กๆ ทั้งหมด n ส่วน ดังแสดงในสมการที่ (2.39)

$$T = \sum_{i=1}^n dT_i \quad (2.39)$$

และแรงบิดที่แต่ละส่วนเล็กๆ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.40)

$$dT = \frac{1}{2} \rho W_m^2 c z r dr (C_L \sin \beta_m + C_D \cos \beta_m) \quad (2.40)$$

และสามารถจัดรูปสมการที่ (2.40) ได้ใหม่คือ

$$dT = \frac{1}{2} \rho W_m^2 c z r dr C_L \left(\sin \beta_m + \frac{C_D}{C_L} \cos \beta_m \right) \quad (2.41)$$

และเนื่องจากเทอม $\frac{C_D}{C_L}$ มีค่าน้อยมาก จึงสามารถเขียนสมการที่ (2.41) ได้ใหม่คือ

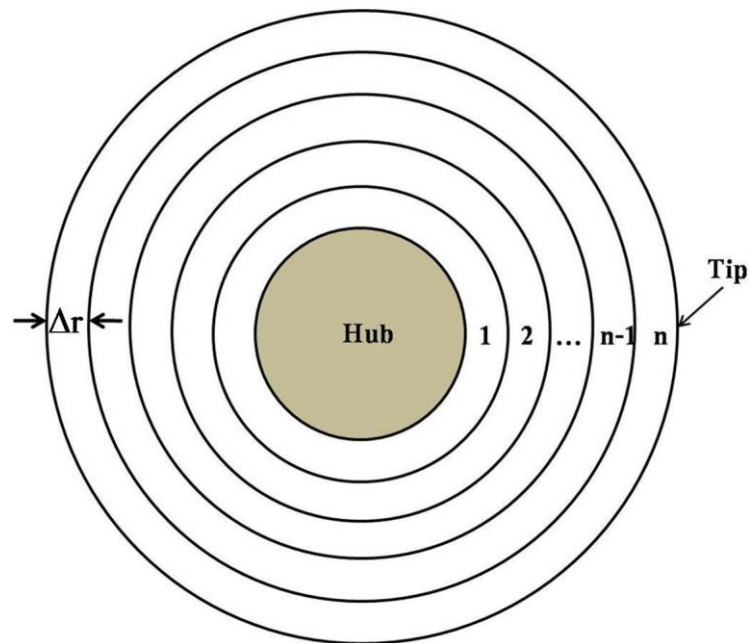
$$dT = \frac{1}{2} \rho W_m^2 c z r dr C_L \sin \beta_m \quad (2.42)$$

และจากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติในรูปที่ 2.13 จะได้

$$W_m = \frac{V_a}{\sin \beta_m} \quad (2.43)$$

แทนสมการที่ (2.43) ลงในสมการที่ (2.42) จะได้

$$dT = \frac{1}{2} \frac{\rho V_a^2 c z r dr C_L}{\sin \beta_m} \quad (2.44)$$

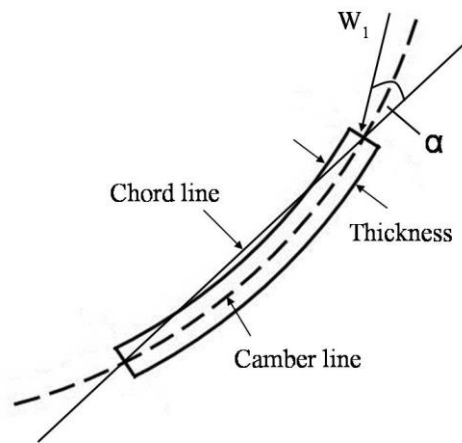


รูปที่ 2.14 การแบ่งภาคตัดขวางของใบพัดตามแนวรัศมี

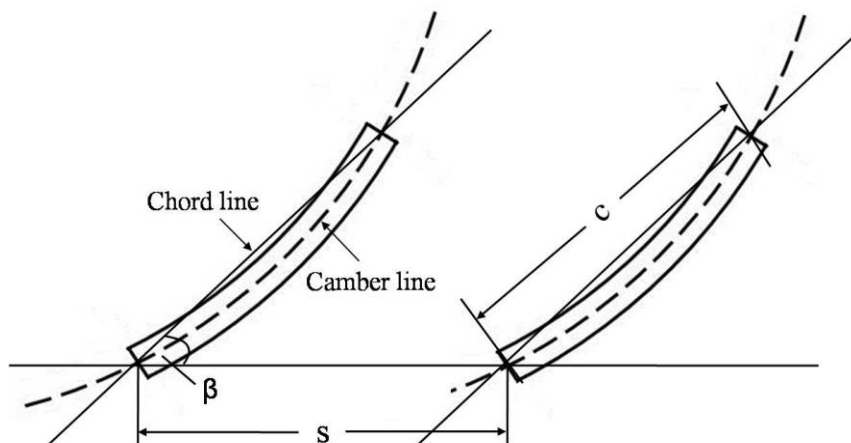
และสำหรับทฤษฎี Blade element นี้มีมุมอีก 2 มุมที่มีความสำคัญ คือ มุมปะทะ (Angle of attack) และมุมตั้งใบพัด (Pitch angle) ซึ่งมุมปะทะ คือ มุมระหว่างความเร็วสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งทางเข้ากับความยาวคอร์ด ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และมุมตั้งใบพัด (Pitch angle) คือ มุมระหว่างระนาบการหมุนของใบพัดกับคอร์ดดังแสดงในรูปที่ 2.16 และมุมปะทะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.45)

$$\alpha = \beta - \beta_m \quad (2.45)$$

เมื่อ β คือ มุมตั้งใบพัด



รูปที่ 2.15 มุมปะทะ

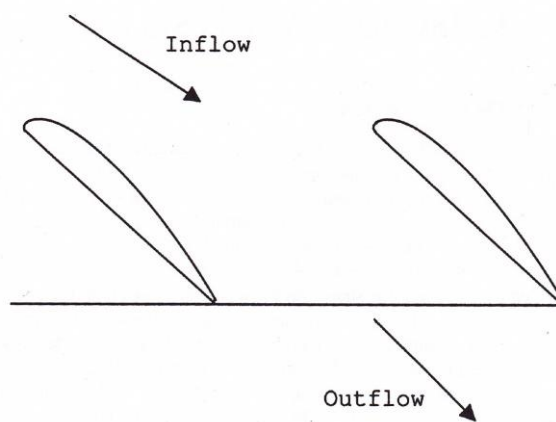


รูปที่ 2.16 มุมตั้งใบพัด ความยาวคอร์ด และระยะช่องว่างระหว่างใบพัด

2.2.2.6 การวิเคราะห์กังหันน้ำแบบ Cascade Analysis

ในการวิเคราะห์กังหันน้ำในหัวข้อที่ 2.2.2.1 นั้นได้ถูกวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของใบกังหันน้ำจะบังคับทิศทางของความเร็วให้มีทิศทางเดียวกันทั้งหมดตลอดช่องการไหล (รูปที่ 2.17 แสดงถึงช่องการไหลของน้ำภายในกังหันน้ำ) แต่ในความเป็นจริงแล้วพื้นผิวของใบกังหันน้ำนั้นสามารถบังคับทิศทางของความเร็วให้ได้ตามที่ออกไว้ได้เพียงแค่บริเวณที่อยู่ติดกับพื้นผิวของใบกังหันน้ำเท่านั้น ส่วนที่ตำแหน่งที่ห่างออกมาจากพื้นผิวของใบกังหันน้ำนั้น ทิศทางของความเร็วจะมีทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปจากที่ออกแบบไว้ จึงส่งผลทำให้ทิศทางของความเร็วที่เกิดขึ้นจริงนั้น

จะมีค่าคลาดเคลื่อนออกไปจากที่ออกแบบไว้ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวิเคราะห์กังหันน้ำ จะพิจารณาถึงผลความคลาดเคลื่อนนี้ด้วย โดยจะพิจารณามุมของความคลาดเคลื่อนนี้ที่ 2 ตำแหน่ง คือ ที่ตำแหน่งทางเข้า และตำแหน่งทางออก ซึ่งจะเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางของความเร็วเหล่านี้ว่ามุม Incidence สำหรับที่ตำแหน่งทางเข้าและมุม Deviation สำหรับที่ตำแหน่งทางออก



รูปที่ 2.17 ช่องการไหลของน้ำภายในกังหันน้ำ

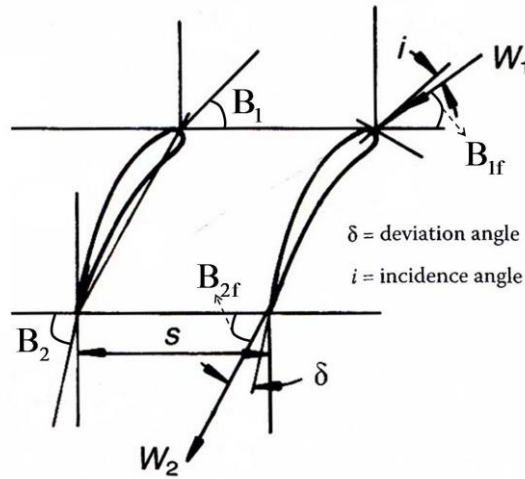
(Wright and Gerhart, 2010)

2.2.2.6.1 ผลของมุม Incidence

มุม Incidence คือ ผลต่างของมุมใบกังหันที่ออกแบบไว้กับมุมของใบกังหันที่เกิดขึ้นจริงที่ตำแหน่งทางเข้าดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งมุม Incidence นี้จะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า Incidence loss หรือ Shock loss ขึ้นที่บริเวณตำแหน่งทางเข้า เนื่องจากค่าของมุม β_1 ที่เปลี่ยนไปตลอดช่องการไหลนั้นทำให้เกิดการไหลแบบไม่ราบเรียบ น้ำที่ไหลเข้าตัวกังหันน้ำจะเกิดการกระทบกับพื้นผิวของใบกังหันทั้งข้างหน้าและข้างหลังใบ ส่งผลทำให้เกิดการหมุนวนและการสูญเสียพลังงานขึ้นในส่วนนี้ ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 2.15 และ 2.18 จะสามารถหาค่ามุม Incidence ได้จากสมการที่ (2.46) และจะสามารถหามุมของใบกังหันที่เกิดขึ้นจริงที่ตำแหน่งทางเข้าได้จากสมการที่ (2.47)

$$i = \alpha - \beta_1 + \beta \quad (2.46)$$

$$\beta_{1f} = \beta_1 + i \quad (2.47)$$



รูปที่ 2.18 มุม Incidence และมุม Deviation

(Turton, 1995)

และสามารถหาค่าการสูญเสียเนื่องจาก Incidence loss ได้จากสมการที่ (2.48)

$$P_{\text{Linc}} = T_{\text{Linc}} \omega \quad (2.48)$$

และสามารถหาแรงบิดเนื่องจาก Incidence loss ได้จากสมการที่ (2.49)

$$T_{\text{Linc}} = \int_{r_h}^{r_i} \frac{1}{W_1} Y_{\text{Linc}} \frac{Qp}{A_d} 2\pi r \cos \beta_{1f} r dr \quad (2.49)$$

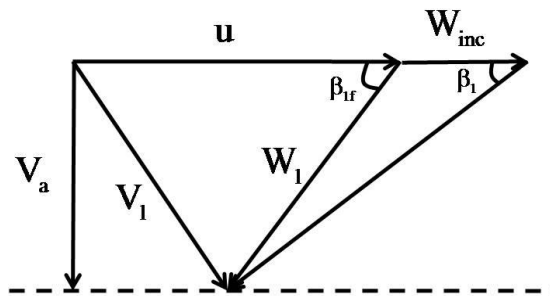
ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติจากรูปที่ 2.19 แล้วพบว่าสามารถเขียน W_1 เป็นฟังก์ชันของ Q กับ β_{1f} ได้ดังสมการที่ (2.50) และสามารถหาค่า Y_{Lprof} ได้จากสมการที่ (2.51)

$$W_1 = \frac{V_a}{\sin \beta_{1f}} \quad (2.50)$$

$$Y_{Linc} = \frac{1}{2} \lambda (W_{inc})^2 \quad (2.51)$$

ซึ่งค่าของ λ มีช่วงการใช้งานที่แนะนำอยู่ระหว่าง 0.5 – 0.7 (Albuquerque et al., 2000) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติจากรูปที่ 2.19 แล้ว จะสามารถหา W_{inc} ได้จากสมการที่ (2.52)

$$W_{inc} = V_a \cot \beta_1 - u + V_a \cot \alpha_1 \quad (2.52)$$



รูปที่ 2.19 ความเร็วที่ตำแหน่งทางเข้ากังหันน้ำ

2.2.2.6.2 ผลของมุม Deviation

มุม Deviation คือ ผลต่างของมุมใบกังหันที่ออกแบบไว้กับมุมของใบกังหันที่เกิดขึ้นจริงที่ตำแหน่งทางออกดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งมุม Deviation จะส่งผลทำให้เกิดการแยกการไหลที่บริเวณทางออก จึงทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นที่บริเวณนี้ โดยเรียกการสูญเสียนี้ว่า Profile loss และสามารถหาค่ามุม Deviation ได้จากสมการที่ (2.53)

$$\delta = C_{op} M_0 \left(\frac{S}{C} \right)^{0.5} (C_i i + (\beta_2 - \beta_1)) \quad (2.53)$$

เมื่อ C_{op} คือ Over-prediction factor of deviation

C_i คือ Incidence factor of deviation

และสามารถหาค่า M_0 ได้จากสมการที่ (2.54)

$$M_0 = 0.041\theta^2 - 0.0716\theta + 0.22 \quad (2.54)$$

และสามารถหาค่า θ ได้จากสมการที่ (2.55)

$$\theta = \frac{1}{2}(180 - \beta_2 - \beta_1) \quad (2.55)$$

และจะสามารถหามุมของใบกังหันที่เกิดขึ้นจริงที่ตำแหน่งทางออกได้จากสมการที่ (2.56)

และจะสามารถหาค่าการสูญเสียเนื่องจาก Profile loss ได้จากสมการที่ (2.57)

$$\beta_{2f} = \beta_2 + \delta \quad (2.56)$$

$$P_{Lprof} = T_{Lprof} \omega \quad (2.57)$$

และสามารถหาแรงบิดเนื่องจาก Profile loss ได้จากสมการที่ (2.58)

$$T_{Lprof} = \int_{r_h}^{r_t} \frac{1}{W_2} Y_{Lprof} \frac{Qp}{A_d} 2\pi r \cos \beta_{2f} r dr \quad (2.58)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติจากรูปที่ 2.20 แล้วพบว่าสามารถเขียน W_2 เป็นฟังก์ชันของ Q กับ β_{2f} ได้ดังสมการที่ (2.59) และสามารถหาค่า Y_{Lprof} ได้จากสมการที่ (2.60)

$$W_2 = \frac{V_a}{\sin \beta_{2f}} \quad (2.59)$$

$$Y_{Lprof} = \frac{1}{2} \xi (W_2)^2 \quad (2.60)$$

และสามารถหาค่า ξ ได้จากสมการที่ (2.61)

$$\xi = \left(\frac{10^5}{Re_h} \right)^{0.25} [(1 + \xi_1) (0.975 + 0.075 \frac{b}{B}) - 1] \quad (2.61)$$

$$b = c \sin \beta \quad (2.62)$$

เมื่อ b คือ ความยาวคอรัคตามแนวแกน, (m)

และสามารถหาค่า Re_h ได้จากสมการที่ (2.63)

$$Re_h = \frac{\rho W_2 D_h}{\mu} \quad (2.63)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, (Pa.s)

และสามารถหาค่า D_h ได้จากสมการที่ (2.64)

$$D_h = \frac{2Bs \sin \beta_{2f}}{s \sin \beta_{2f} + B} \quad (2.64)$$

และสามารถหาความกว้างของใบกังหันได้จากสมการที่ (2.65)

$$B = r_t - r_h \quad (2.65)$$

และสามารถหาค่า ξ_1 ได้จากสมการที่ (2.66)

$$\xi_1 = \xi_0 + 0.0024\varepsilon_0 + 0.0215(\varepsilon_0)^2 \quad (2.66)$$

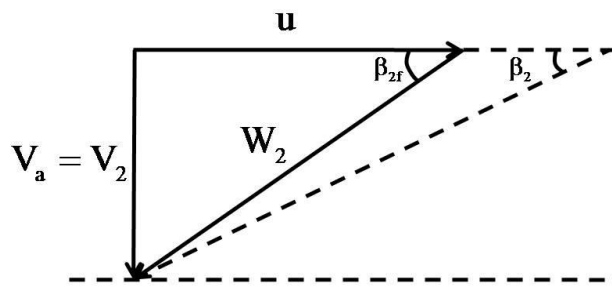
และสามารถหาค่า ξ_0 ได้จากสมการที่ (2.67)

$$\xi_0 = 0.071 - 0.19 \frac{t}{c} + 0.27 \left(\frac{t}{c}\right)^2 \quad (2.67)$$

เมื่อ t คือ ความหนาของใบกังหัน, (m)

และสามารถหาค่ามุม Turning angle ได้จากสมการที่ (2.68)

$$\varepsilon_0 = i + (\beta_1 - \beta_2) - \delta \quad (2.68)$$



รูปที่ 2.20 ความเร็วที่ตำแหน่งทางออกกังหันน้ำ

2.2.2.6.3 การหาค่ากำลังทางกลของกังหันน้ำและประสิทธิภาพไฮดรอลิก

หลังจากที่สามารถหาค่ากำลังการสูญเสียเนื่องจาก Incidence loss และ Profile loss ได้แล้ว จะนำการสูญเสียเหล่านี้ไปหาค่ากำลังทางกลของกังหันน้ำ โดยใช้กฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งกำลังที่ใส่เข้าระบบจะเท่ากับผลรวมของกำลังของ Euler กับกำลังการสูญเสียรวมทั้งหมดดังแสดงในสมการที่ (2.69)

$$P_i = P_{Eu} + (P_{Linc} + P_{Lprof} + P_{Wout}) \quad (2.69)$$

เมื่อ P_i คือ กำลังของน้ำที่ใส่กังหัน

P_{Eu} คือ กำลังของ Euler

P_{Wout} คือ กำลังการสูญเสียเนื่องจากน้ำที่ไหลออกจากกังหัน

และสามารถหาค่ากำลังของ Euler ได้จากสมการที่ (2.70)

$$P_{Eu} = T_{Eu} \omega \quad (2.70)$$

และสามารถหาแรงบิดของ Euler ได้จากสมการที่ (2.71)

$$T_{Eu} = \int_{r_h}^{r_l} V_1 \cos \alpha_1 2\pi\rho \frac{Q}{A_d} r^2 dr \quad (2.71)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติจากรูปที่ 2.19 แล้วจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.72) ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการแรงบิดของ Euler ได้ใหม่ดังสมการที่ (2.73)

$$V_1 \cos \alpha_1 = u - V_a \cot \beta_{1f} \quad (2.72)$$

$$T_{Eu} = \int_{r_h}^{r_l} \left(\omega r - \frac{Q}{A_d} \cot \beta_{1f} \right) 2\pi\rho \frac{Q}{A_d} r^2 dr \quad (2.73)$$

และสามารถหาคำลังการสูญเสียเนื่องจากน้ำที่ไหลออกจากกังหันได้จากสมการที่ (2.74)

$$P_{Wout} = \frac{1}{2} \rho \frac{Q^3}{A_{Out}^2} \quad (2.74)$$

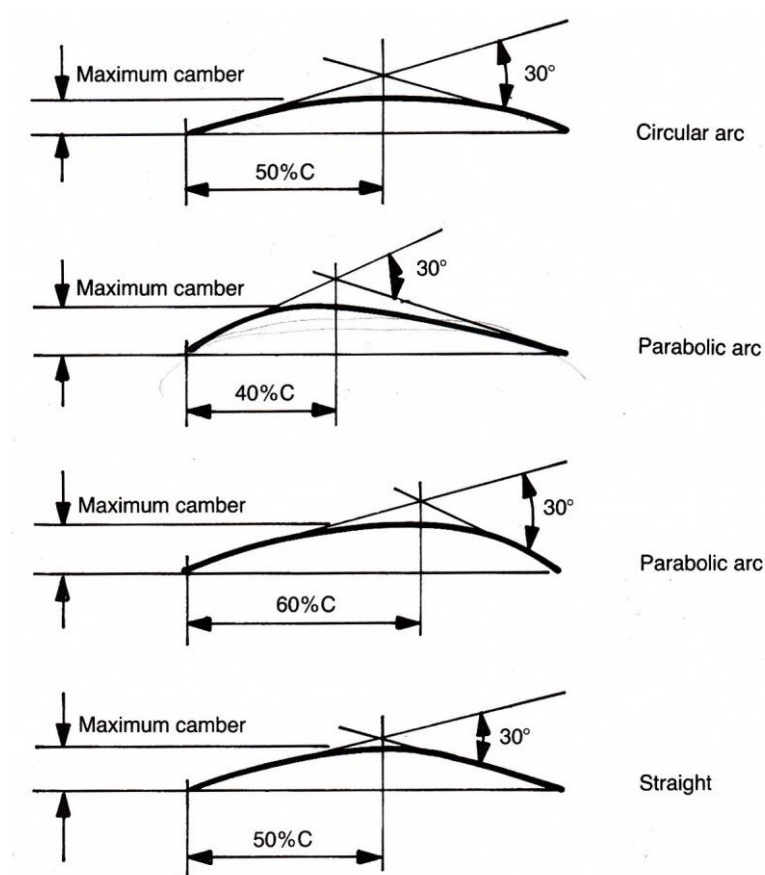
เมื่อ A_{Out} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อน้ำที่ไหลออกจากกังหันน้ำ, (m^2)

ดังนั้น สามารถหาแรงบิดที่กังหันน้ำผลิตได้จากสมการที่ (2.75) และสามารถหาคำลังทางกลของกังหันน้ำและประสิทธิภาพไฮดรอลิกได้จากสมการที่ (2.4) และ (2.17) ตามลำดับ

$$T_r = T_{Eu} - T_{Linc} - T_{Lprof} \quad (2.75)$$

2.2.3 ชนิดของใบกังหันน้ำ

สำหรับชนิดของใบกังหันน้ำโดยทั่วไปนั้น สามารถแบ่งออกตามลักษณะของเส้น Camber line (เส้น Camber line คือ เส้นที่แบ่งครึ่งความหนาของใบกังหันตั้งแต่ตำแหน่งทางเข้าจนถึงตำแหน่งทางออก ดังแสดงในรูปที่ 2.15) ได้เป็น 3 แบบ คือ แบบส่วนโค้งของวงกลม (Circular arc) แบบส่วนโค้งพาราโบลา (Parabolic arc) และแบบเส้นตรง (Straight) ดังแสดงในรูปที่ 2.21



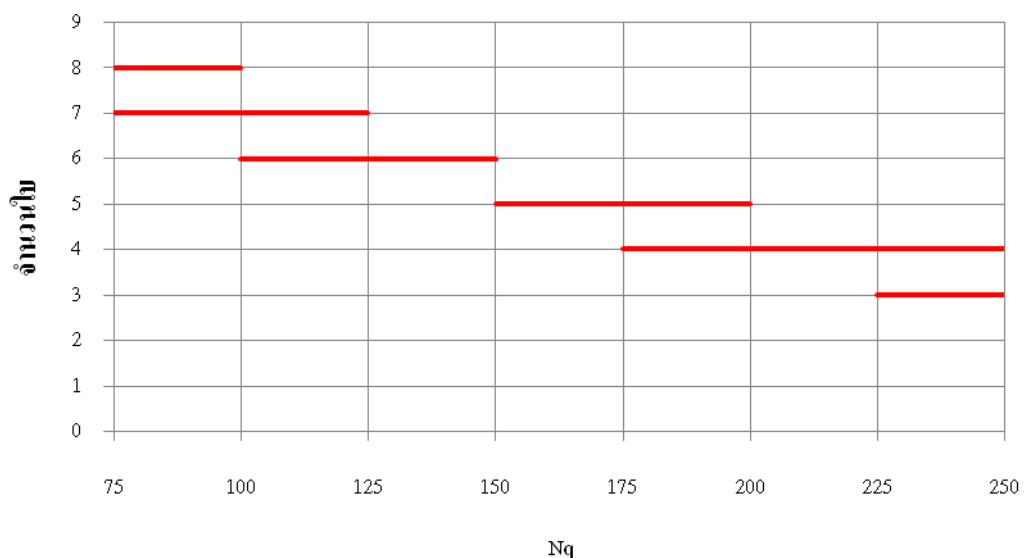
รูปที่ 2.21 ชนิดของใบกังหันน้ำ

(Turton, 1995)

2.2.4 จำนวนใบกังหันน้ำ

สำหรับจำนวนใบกังหันน้ำที่เหมาะสมสำหรับการสร้างนั้น Simpson and Williams (2011) ได้นำเสนอให้หาจำนวนใบกังหันน้ำจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะเชิงปริมาตรการไหลกับจำนวนใบกังหัน ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และความเร็วจำเพาะเชิงปริมาตรการไหลสามารถหาได้จากสมการที่ (2.76)

$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{0.75}} \quad (2.76)$$



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะเชิงปริมาตรการไหลกับจำนวนใบกังหันน้ำ

(Simpson and Williams, 2011)

2.2.5 การออกแบบรูปร่างของใบกังหันน้ำ

การออกแบบรูปร่างของใบกังหันน้ำ หมายถึง การหารูปร่างที่บิดโค้งของใบกังหันน้ำตั้งแต่ตำแหน่งทางเข้าไปจนถึงตำแหน่งทางออก โดยอาศัยทฤษฎี Blade element เข้าช่วย ซึ่งจะทำการแบ่งความกว้างของใบกังหันน้ำออกเป็น n ส่วน โดยที่แต่ละส่วนจะมีความกว้างเท่ากับ Δr ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และรูปร่างของใบกังหันน้ำที่แต่ละส่วนจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งใน

งานวิจัยนี้จะเลือกออกแบบรูปร่างของใบกังหันน้ำชนิดที่เป็นแบบส่วนโค้งของวงกลม (รูปที่ 2.21) และใบกังหันน้ำเป็นแบบบางที่มีความหนาคงที่ โดยจะมีขั้นตอนการหารูปร่างของใบกังหันน้ำดังนี้

2.2.5.1 การหาความยาวคอร์ดของใบกังหันน้ำ

ความยาวคอร์ด คือ ความยาวของเส้นตรงที่ลากจากตำแหน่งทางเข้าไปจนถึงตำแหน่งทางออกของใบกังหันน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งหลักการออกแบบความยาวคอร์ดของใบกังหันน้ำ Simpson and Williams (2011) ได้แนะนำไว้ว่าให้หาจากค่าของสัดส่วนระหว่างระยะช่องว่างระหว่างใบพัดกับความยาวคอร์ด (Space-Chord ratio) โดยที่ค่าของสัดส่วนนี้ที่แต่ละส่วนของใบกังหันน้ำจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากที่ตำแหน่งคูล (Hub) ไปยังที่ตำแหน่งปลายใบกังหันน้ำ (Tip) และสามารถหาสัดส่วนระหว่างระยะช่องว่างระหว่างใบพัดกับความยาวคอร์ดได้จากสมการที่ (2.77)

$$SCR = \frac{s}{c} \quad (2.77)$$

ซึ่งเมื่อเราแทนค่าสัดส่วนระหว่างระยะช่องว่างระหว่างใบพัดกับความยาวคอร์ดและค่าระยะช่องว่างระหว่างใบพัดลงในสมการที่ (2.77) แล้ว จะสามารถหาความยาวคอร์ดที่แต่ละส่วนออกมาได้ ซึ่งความยาวคอร์ดคอร์ดนี้จะบอกถึงความยาวของใบกังหันน้ำที่แต่ละส่วน

2.2.5.2 การหามุมปะทะ ระยะแคมเบอร์สูงสุด และมุมตั้งใบ

มุมปะทะ ระยะแคมเบอร์สูงสุด และมุมตั้งใบเป็นตัวแปรที่จะทำให้ทราบถึงขนาดของส่วนโค้งและมุมการติดตั้งของใบกังหันน้ำที่แต่ละส่วน ซึ่งนิยามของมุมปะทะ ระยะแคมเบอร์สูงสุด และมุมตั้งใบ มีดังต่อไปนี้

- **มุมปะทะ (Angle of attack)** คือ มุมระหว่างความเร็วสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งทางเข้ากับความยาวคอร์ด ดังแสดงในรูปที่ 2.15

- **ระยะแคมเบอร์สูงสุด (Maximum camber)** คือ ความกว้างที่มากที่สุดระหว่างใบกังหันน้ำกับความยาวคอร์ด ดังแสดงในรูปที่ 2.21

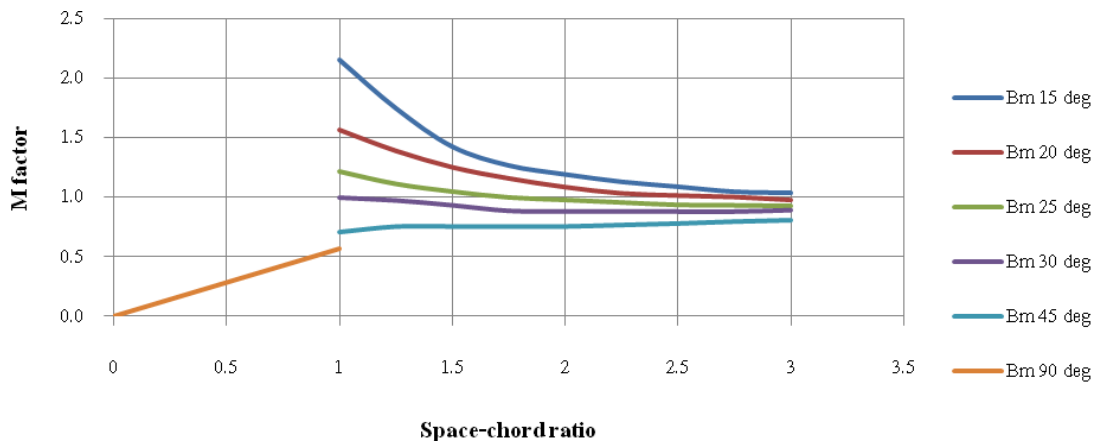
- **มุมตั้งใบ (Pitch angle)** คือ มุมระหว่างความยาวคอร์ดกับแนวเส้นสัมผัสใบกังหันน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.16

และสำหรับขั้นตอนการหามุมปะทะ ระยะแคมเบอร์สูงสุด และมุมตั้งใบ ของกังหันน้ำชนิดที่เป็นแบบส่วนโค้งของวงกลม และเป็นกังหันน้ำแบบบางที่มีความหนาคงที่มีดังต่อไปนี้

- การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันน้ำจะถูกคำนวณ เพื่อนำไปหาค่าของ มุมปะทะ ระยะแคมเบอร์สูงสุด และมุมตั้งใบ ต่อไป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันน้ำนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.33) แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่คำนวณได้นี้ยังไม่เหมาะสมสำหรับกังหันน้ำแบบหลายใบ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่คำนวณได้นี้ไปหารด้วยค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์แรงยกสำหรับกังหันน้ำแบบหลายใบ (Factor to modify lift coefficients due to multiple blades) ดังสมการที่ (2.78) และสำหรับค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์แรงยกสำหรับกังหันน้ำแบบหลายใบสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนระหว่างระยะช่องว่างระหว่างใบพัดกับความยาวคอร์ดกับค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์แรงยกสำหรับกังหันน้ำแบบหลายใบ ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งเมื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันน้ำแบบหลายใบได้แล้ว จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

$$C_{L,new} = \frac{C_L}{M} \quad (2.78)$$

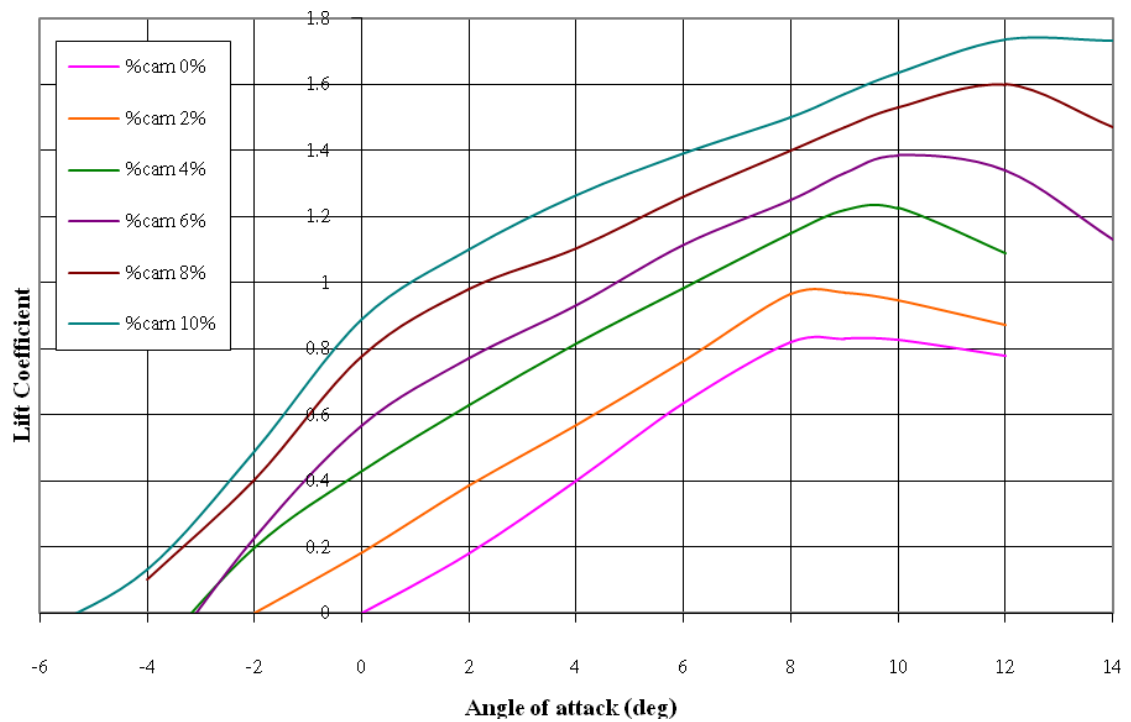


รูปที่ 2.23 ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์แรงยกสำหรับกังหันน้ำแบบหลายใบ

(Simpson and Williams, 2011)

- การหามุมปะทะ ระยะแคมเบอร์สูงสุด และมุมตั้งใบ

หลังจากคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันน้ำแบบหลายใบได้แล้ว จะนำค่าสัมประสิทธิ์แรงยกนี้ไปหามุมปะทะและระยะแคมเบอร์สูงสุด ซึ่งจะหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันน้ำ ดังรูปที่ 2.24 โดยจะทำการเลือกค่าของมุมปะทะและเปอร์เซ็นต์แคมเบอร์ (เปอร์เซ็นต์แคมเบอร์ คือ ระยะแคมเบอร์สูงสุด โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของคอร์ด) และเมื่อเลือกค่าทั้งสองนี้จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.24 แล้ว จะต้องให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันน้ำเท่ากับที่คำนวณได้ในสมการที่ (2.78) และค่าของมุมปะทะและเปอร์เซ็นต์แคมเบอร์ที่เหมาะสมควรมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งดุมและค่อๆ มีค่าลดลงจากที่ตำแหน่งดุมไปยังที่ตำแหน่งปลายใบ และมุมปะทะควรมีค่ามากกว่าศูนย์ด้วย



รูปที่ 2.24 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันน้ำแบบบางที่มีความหนาคงที่

(Simpson and Williams, 2011)

หลังจากหาค่าของมุมปะทะและเปอร์เซ็นต์แคมเบอร์ได้แล้ว จะนำค่าเหล่านี้ไปหาค่าของระยะแคมเบอร์สูงสุด และมุมตั้งใบ ได้จากสมการที่ (2.79) และ (2.80) ตามลำดับ

$$cam_{max} = c \times \%cam \quad (2.79)$$

$$\beta = \beta_m - \alpha \quad (2.80)$$

เมื่อ cam_{max} คือ ระยะแคมเบอร์สูงสุด, (m)

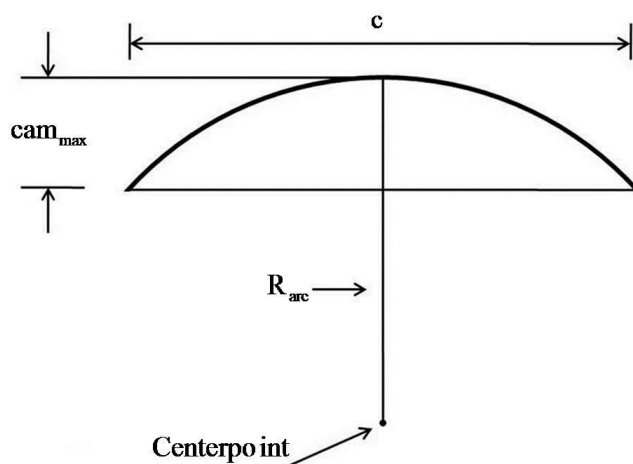
$\%cam$ คือ เปอร์เซ็นต์แคมเบอร์

- การหารัศมีส่วนโค้งและมุมของส่วนโค้งของใบกังหันน้ำ

หลังจากหาความยาวคอร์ดและระยะแคมเบอร์สูงสุดได้แล้ว และพิจารณาความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติของรูปที่ 2.25 จะสามารถหารัศมีส่วนโค้งของใบกังหันน้ำ (Arc radius) และมุมของส่วนโค้งของใบกังหันน้ำ (Arc angle) ได้จากสมการที่ (2.81) และ (2.82) ตามลำดับ

$$R_{\text{arc}} = \frac{\text{cam}_{\text{max}}}{2} + \frac{c^2}{8\text{cam}_{\text{max}}} \quad (2.81)$$

$$\theta_{\text{arc}} = 2 \sin^{-1} \left(\frac{0.5c}{R_{\text{arc}}} \right) \quad (2.82)$$



รูปที่ 2.25 ส่วนโค้งของใบกังหันน้ำ

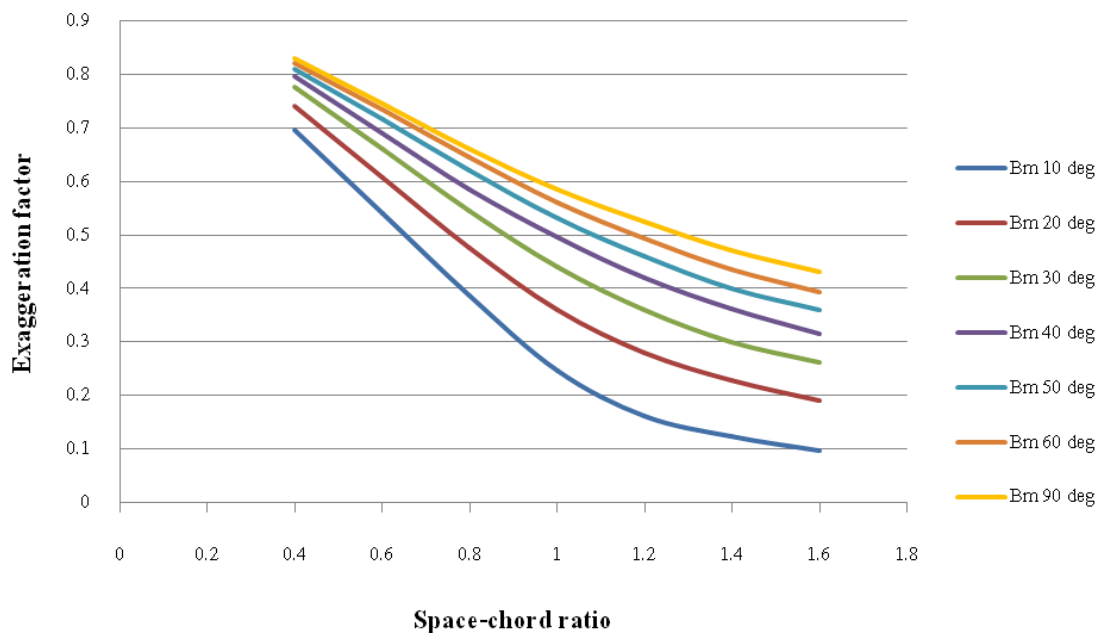
- การตรวจสอบการออกแบบ

หลังจากทำการหาความยาวคอร์ด มุมปะทะ ระยะแคมเบอร์สูงสุด มุมตั้งใบ รัศมีส่วนโค้งของใบกังหันน้ำ และมุมของส่วนโค้งของใบกังหันน้ำได้แล้ว จะต้องทำการตรวจสอบว่าค่าของ

ตัวแปรที่หาได้เหล่านี้มีความเหมาะสมหรือไม่ ซึ่งจะตรวจสอบจากค่า Theta ratio และ Exaggeation factor ถ้าผลต่างของทั้งสองค่านี้ไม่เกิน 0.1 จะถือว่าค่าของตัวแปรเหล่านี้มีความเหมาะสม

สำหรับค่า Theta ratio นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.83) และค่า Exaggeation factor สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนระหว่างระยะช่องว่างระหว่างใบพัดกับ Exaggeation factor ดังรูปที่ 2.26

$$\gamma_{\text{the}} = \frac{\beta_1 - \beta_2}{\theta_{\text{arc}}} \quad (2.83)$$



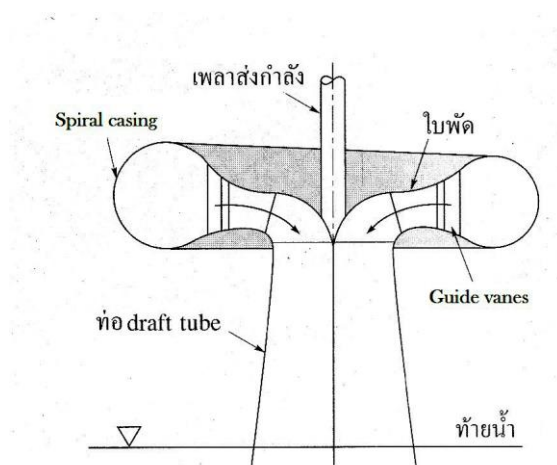
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนระหว่างระยะช่องว่าง

ระหว่างใบพัดกับ Exaggeation factor

(Simpson and Williams, 2011)

2.2.6 หลักการออกแบบอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบกังหันน้ำ

ในระบบกังหันน้ำนั้นใบกังหันน้ำจะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานน้ำให้เป็นพลังงานทางกล แต่นอกจากใบกังหันน้ำแล้วยังมีอุปกรณ์อื่นๆ อีกที่สำคัญในระบบกังหันน้ำชนิด Propeller ซึ่งประกอบไปด้วย Guide vanes, Spiral casing, ท่อ Draft tube และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 อุปกรณ์ในระบบกังหันน้ำชนิด Propeller

(สุธรรม, 2549)

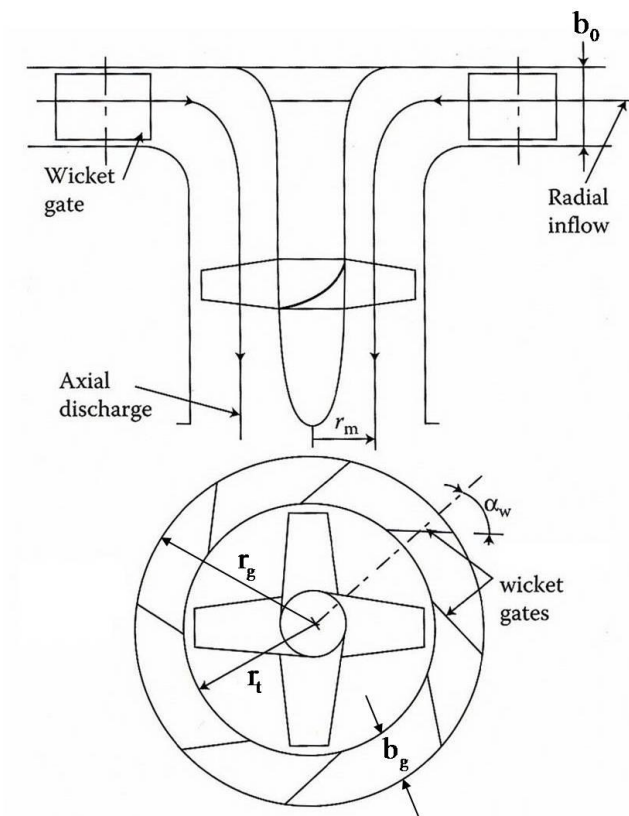
2.2.6.1 Guide vanes

Guide vanes หรือเรียกอีกชื่อว่า Wicket gates เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญกับระบบกังหันน้ำชนิด Reaction อย่างมาก ซึ่ง Guide vanes นี้จะทำหน้าที่ควบคุมความเร็วและทิศทางการไหลเข้าของน้ำให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำที่ได้ออกแบบไว้ อุปกรณ์ Guide vanes นี้จะมีลักษณะคล้ายๆ ครีบบักที่คอยบังคับทิศทางการไหลเข้าของน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งสามารถหามุมของการติดตั้ง Guide vanes ได้จากสมการที่ (2.84) และสามารถหาความกว้างของ Guide vanes ได้จากสมการที่ (2.85)

$$\alpha_w = \tan^{-1} \left(\frac{(r_m / r_t) V_1 \cos \alpha_1}{Q / (2\pi r_t b_0)} \right) \quad (2.84)$$

$$b_g = r_g - r_t \quad (2.85)$$

เมื่อ b_0 คือ ความสูงของ Guide vanes, (m)



รูปที่ 2.28 Guide vanes หรือ Wicket gates

(Wright and Gerhart, 2010)

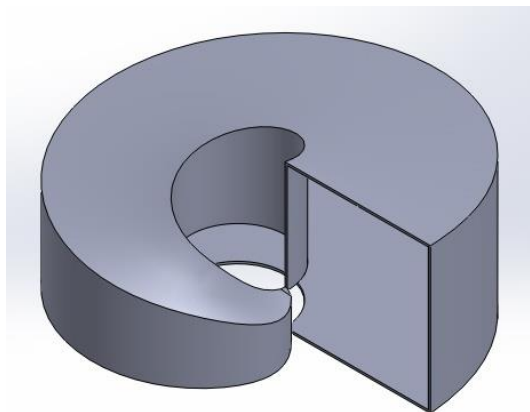
2.2.6.2 Spiral casing

Spiral casing นั้นเป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างท่อส่งน้ำเข้ากับ Guide vanes ทำหน้าที่ช่วยให้การไหลของน้ำไหลเข้าสู่ตัวกังหันน้ำอย่างสม่ำเสมอในทิศทางทั้ง 360 องศา ซึ่งลักษณะของ Spiral casing จะมีลักษณะคล้ายกับก้นหอย คือ พื้นที่หน้าตัดของ Spiral casing จะมีขนาดลดลงจากขนาดใหญ่ไปหาขนาดเล็กตามแนวเส้นรอบวง และ Spiral casing นั้นสามารถแบ่ง

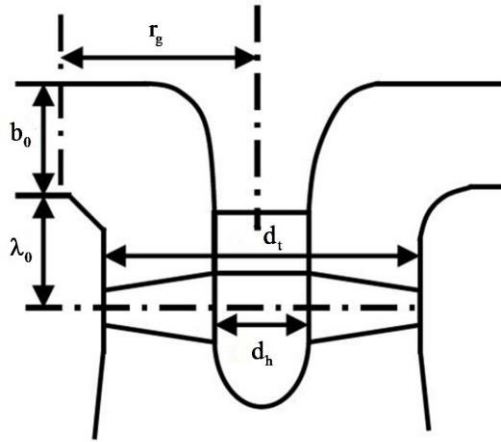
ออกตามลักษณะของพื้นที่หน้าตัดได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม และชนิดพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ชนิดพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.29

จากรูปที่ 2.30 จะแสดงถึงตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ Spiral casing ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยทั้งหมด 6 ตัวแปร คือ

- เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกังหัน (d_t)
- เส้นผ่านศูนย์กลางของดุม (d_h)
- รัศมีของตำแหน่งที่ติดตั้ง Guide vanes (r_g)
- ความสูงของ Guide vanes (b_0)
- ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ตำแหน่ง i องศา (B_i)
- ระยะความสูงของการติดตั้งกังหันน้ำ (λ_0)



รูปที่ 2.29 Spiral casing ชนิดพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 2.30 ภาพตัดขวางของกังหันน้ำและ Spiral casing

(Simpson and Williams, 2011)

สำหรับรัศมีของตำแหน่งที่ติดตั้ง Guide vanes นั้นควรจะมีค่ามากกว่ารัศมีของคุ่มอย่างน้อย 5% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกังหัน กล่าวคือ

$$r_g \geq r_t + 0.05d_t \quad (2.86)$$

สำหรับความสูงของ Guide vanes หรือความสูงของช่องว่างที่น้ำไหลออกจาก Spiral casing มีช่วงที่แนะนำดังนี้

$$0.35 \leq \frac{b_0}{d_t} \leq 0.5 \quad (2.87)$$

ซึ่ง $\frac{b_0}{d_t}$ ควรจะมีค่ามากเมื่อค่าความเร็วจำเพาะเชิงปริมาตรการไหลมีค่ามาก และควรจะมีค่าน้อยเมื่อค่าความเร็วจำเพาะเชิงปริมาตรการไหลมีค่าน้อย

สำหรับระยะความสูงของการติดตั้งกังหันน้ำนั้นควรจะมีค่าเท่ากับหนึ่งในสี่ของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกังหัน กล่าวคือ

$$\lambda_0 = \frac{d_t}{4} \quad (2.88)$$

สำหรับการหาความกว้างของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 13 ตำแหน่งตามแนวเส้นรอบวง โดยที่แต่ละตำแหน่งจะห่างกัน 30 deg ดังแสดงในรูปที่ 2.31 และจะเริ่มหาความกว้างของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ตำแหน่งที่มีพื้นที่หน้าขนาดใหญ่สุดก่อน ซึ่งก็คือ ตำแหน่ง 360 deg โดยจะทำการสุ่มค่า B_{360} ลงไปในสมการที่ (2.88) จากนั้นจะทำการปรับค่า B_{360} ไปเรื่อยๆ จนกว่าทั้งสองข้างของสมการที่ (2.88) จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งความกว้างของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ตำแหน่ง 360 deg ก็คือค่า B_{360} ที่ทำให้ทั้งสองข้างของสมการที่ (2.88) มีค่าเท่ากัน

$$\frac{Q}{(V_{t1} \cos \alpha_{t1})r_t} = B_{360} \ln\left(1 + \frac{B_{360}}{r_g}\right) \quad (2.88)$$

เมื่อ V_{t1} คือ ความเร็วสัมบูรณ์ที่น้ำไหลเข้าที่ตำแหน่งปลายใบพัด

α_{t1} คือ มุมที่น้ำไหลเข้าที่ตำแหน่งปลายใบพัด

ส่วนตำแหน่งที่เหลือจะให้พื้นที่หน้าตัดลดลงทีละ ΔA ไปเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่ง 0 deg ดังนั้น จะสามารถหาพื้นที่หน้าตัดและความกว้างที่ตำแหน่งใดๆ ได้จากสมการที่ (2.89) และ (2.91) ตามลำดับ

$$A_i = A_{i+30} - \Delta A \quad (2.89)$$

$$\Delta A = \frac{B_{360}^2}{12} \quad (2.90)$$

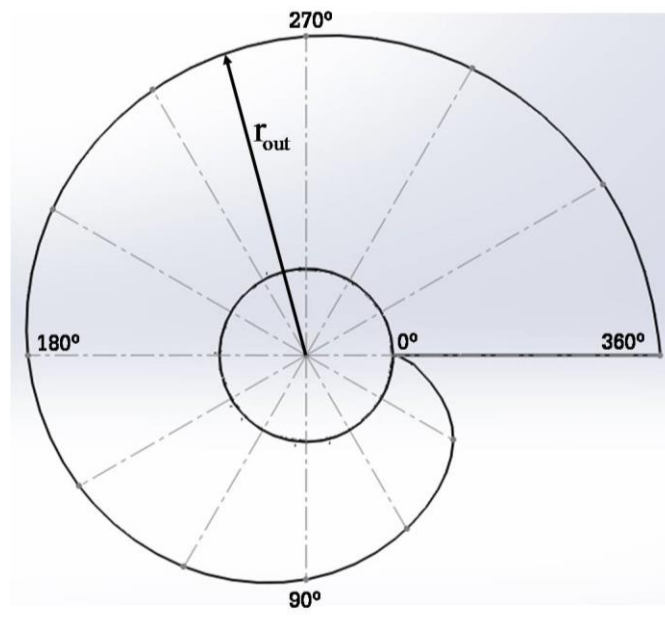
$$B_i = \sqrt{A_i} \quad (2.91)$$

$$r_{out} = r_g + B_i \quad (2.92)$$

เมื่อ A_i คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่ง i deg

B_i คือ ความกว้างของหน้าตัดที่ตำแหน่ง i deg

r_{out} คือ รัศมีภายนอก หรือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงขอบนอกสุดของ Spiral casing



รูปที่ 2.31 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของ Spiral casing

2.2.6.3 ท่อ Draft tube

ท่อ Draft tube เป็นช่องทางปิดที่มีพื้นที่หน้าตัดค่อยๆ ขยายออก เพื่อลดพลังงานจลน์ของน้ำที่ไหลออกจากกังหันน้ำ เพราะเมื่อพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นความเร็วของน้ำก็จะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้พลังงานจลน์มีค่าลดลง โดยพลังงานจลน์ของการไหลที่ลดลงจะเปลี่ยนเป็นการเพิ่มขึ้นของพลังงานในรูปความดันก่อนที่น้ำจะไหลออกสู่ท้ายน้ำ

2.2.6.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับหรือเครื่องที่เรียกว่าอัลเทอร์เนเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต่างก็ทำหน้าที่เหมือนกัน คือ ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับขึ้นมา ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับที่ผลิตขึ้นมาจะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยชุดเรียงกระแส ซึ่งประกอบด้วยคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน แล้วจึงป้อนพลังงานไฟฟ้าที่แปลงแล้วนี้ให้โหลด ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะไม่มีชุดเรียงกระแส เมื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ก็สามารถที่จะป้อนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดได้เลย โดยอาศัย Slip Rings และแปรงถ่าน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตขึ้นในเชิงพาณิชย์นั้นจะออกแบบให้ อาร์มาเจอร์หรือชุดขดลวดผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่กับที่ และให้ชุดขดลวดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ ในการผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของตัวนำหรือขดลวดอาร์มาเจอร์กับสนามแม่เหล็ก ดังนั้น อาจจะทำให้ขดลวดอาร์มาเจอร์หรือสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ก็ได้ ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนั้น คอมมิวเตเตอร์เป็นส่วนที่ช่วยทำให้ขดลวดอาร์มาเจอร์หมุนได้อย่างอิสระ แต่ในกรณีของอัลเทอร์เนเตอร์จะไม่มีคอมมิวเตเตอร์ ดังนั้น อาร์มาเจอร์อาจจะเป็นส่วนที่หมุนได้ หรือหมุนไม่ได้ก็ได้ทั้งนั้น

อาร์มาเจอร์ของอัลเทอร์เนเตอร์ที่เป็นส่วนที่หมุนได้นั้น จะต้องมีย Slip Rings 2 หรือ 3 อันเป็นตัวนำกระแสออกจากอาร์มาเจอร์ไปยังวงจรภายนอกหรือโหลด ในการติดตั้ง Slip Rings ก็ทำได้ลำบากมากถ้าเป็นอัลเทอร์เนเตอร์ที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงๆ เพราะพื้นที่จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกั้นฉนวนระหว่าง Slip Rings กับ Slip Rings ด้วยกัน เช่น เครื่องกำเนิดที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด 6,600 โวลต์หรือ 13,200 โวลต์ เป็นต้น ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการกระโดดข้ามของกระแสไฟระหว่าง Slip Rings หรือเกิดวงจรลัดได้ นั่นก็คือ Slip Rings ที่ใช้ประกอบกับอาร์มาเจอร์ที่หมุนได้นี้จะเป็นตัวสร้างปัญหาขึ้น ดังนั้น ถ้าออกแบบให้อาร์มาเจอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่ Slip Rings ที่ใช้ในการนำเอากระแสไฟจากอาร์มาเจอร์ก็ไม่จำเป็น โดยสามารถต่อสายไฟให้นำกระแสไฟจากอาร์มาเจอร์ไปสู่วงจรภายนอกโดยตรงได้เลย

2.2.6.3.1 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

- ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator)

ในกรณีที่เป็นเครื่องกำเนิดขนาดเล็ก แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นต่ำ ส่วนที่อยู่กับที่จะเป็นขดลวดขั้วแม่เหล็กที่ยึดติดกับ โครงเหล็ก เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แต่ถ้าเป็นกรณีของเครื่องกำเนิดขนาดใหญ่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงๆ ส่วนที่อยู่กับที่จะเป็นขดลวดที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เรียกว่าขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งจะพันอยู่ในสล๊อทของสเตเตอร์ที่ยึดติดแน่นอยู่กับ โครงเหล็ก

- ส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor)

ในกรณีที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกำลังเข้าพุทต่ำ โรเตอร์หรือส่วนที่หมุนได้นั้น จะเป็นขดลวดอาร์มาเจอร์ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมามีป้อนให้กับโหลดจะถูกนำออกไปโดยผ่าน Slip Rings แต่ถ้าเป็นเครื่องกำเนิดขนาดกำลังเข้าพุทสูงๆ แล้ว โรเตอร์จะเป็นขดลวดสนามแม่เหล็ก

2.2.6.3.2 ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

ถ้าแบ่งชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับตามลักษณะการจ่ายแรงดันไฟฟ้า จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะมีขนาดกำลังเข้าพุทต่ำและเป็นแบบ Self Excited หมายความว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นนั้น ส่วนหนึ่ง (ปริมาณมาก) จะจ่ายให้กับโหลด และอีกส่วนหนึ่ง (ปริมาณน้อย) จะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และป้อนกลับเข้าไปเลี้ยงขดลวดสนามแม่เหล็กตลอดเวลาที่เครื่องกำเนิดนี้ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ กำลังเข้าพุทอาจจะสูงถึง 25 กิโลวัตต์ สำหรับแรงดันไฟฟ้าอาจจะเป็นระบบ 110 โวลต์ 220 โวลต์ หรือเป็นระบบ 110/220 โวลต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโหลดที่ต้องการ

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส

เครื่องกำเนิดชนิดนี้จะมีขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ และมีขดลวดอาร์มาเจอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่ และมี 3 ชุดด้วยกันเรียกแต่ละชุดว่า ขั้วหรือเฟส (Phase) ดังนั้น จึงมี

ปลายขดลวดอยู่ 3 คู่หรือ 6 เส้น ซึ่งปลายสายทั้ง 3 คู่นี้สามารถนำมาต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้วงจรขดลวดอาร์มาเจอร์เป็นแบบสตาร์ (Star หรือ Wye) หรือแบบเดลต้า (Delta) อย่างหนึ่งอย่างใดก็ได้ ถ้าต่อขดลวดอาร์มาเจอร์เป็นแบบสตาร์ จะมีสายไฟที่ต่อไปหาโหลด 4 เส้นด้วยกัน สายไฟที่ต่อออกจากแต่ละเฟสอาจจะเรียกว่า Phase หรือ Line 1, Line 2 และ Line 3 ส่วนสายไฟที่ต่อออกจากจุดต่อร่วมของทั้ง 3 เฟส เรียกว่าสายกลางหรือสาย Neutral และระบบแรงดันไฟฟ้าจะเป็น 220/380 โวลต์ แรงดัน 220 โวลต์ เป็นแรงดันระหว่าง Line กับ Neutral แรงดัน 380 โวลต์ จะเป็นแรงดันระหว่าง Line กับ Line แต่ถ้าต่อขดลวดอาร์มาเจอร์เป็นแบบเดลต้า สายไฟที่ต่อไปหาโหลดจะมีเพียง 3 เส้น และสายไฟแต่ละเส้นจะเรียกว่า Phase หรือ Line ก็ได้ แรงดันระหว่างสายไฟแต่ละคู่ (Line) จะมีค่าเท่ากันหมด เช่น 220 โวลต์

2.2.6.3.3 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เมื่อให้ต้นกำเนิดหมุนขั้วส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิด ถ้าส่วนที่เคลื่อนที่ได้เป็นขดลวดสนามแม่เหล็ก ขดลวดสนามแม่เหล็กนี้จะหมุนตัดกับขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมาที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ตั้น และถ้าส่วนที่เคลื่อนที่เป็นขดลวดอาร์มาเจอร์จะถูกต้นกำเนิดหมุนขั้วให้ตัดกับขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมาที่ขดลวดอาร์มาเจอร์เหมือนกัน ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นทั้งสองกรณีนี้ จะเป็นไปตามหลักของเฟลมมิง (Fleming's rule) และปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยนั้นก็จะเป็นไปตามหลักของฟาราเดย์ (Faraday's law)

2.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

2.3.1 อัตราผลตอบแทน (Rate of return computations)

การคำนวณหาอัตราผลตอบแทนที่เป็นโครงการเดียวจะอาศัยวิธีการลองผิดลองถูก เพื่อหาอัตราดอกเบี้ยที่เหมาะสม อัตราดอกเบี้ยที่นำมาใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบบางครั้งเรียกว่า อัตราผลตอบแทนที่พอใจต่ำสุด (Minimum Attractive Rate of Return; MARR) ถูกกำหนดโดยเจ้าของเงินหรือผู้ลงทุน (ใช้ข้อมูลจากดอกเบี้ยเงินกู้ ดอกเบี้ยเงินฝาก และความต้องการของผู้ลงทุน เป็น

ตัวกำหนด) โดยวิธีการหาอัตราผลตอบแทนนี้จะกำหนดให้มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่าย (Disbursements; PW_D) มีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของรายรับ (Receipts; PW_R) ดังสมการที่ (2.93)

$$PW_R - PW_D = 0 \quad (2.93)$$

จากนั้นจะใช้วิธีลองผิดลองถูก เพื่อหาอัตราดอกเบี้ย (i) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของรายรับ และนำค่าอัตราดอกเบี้ยที่คำนวณได้นี้มาเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนที่พอใจต่ำสุด

2.3.1 จุดคุ้มทุน (Breakeven Point)

จุดคุ้มทุน คือ จุดที่รายได้อาจมีค่าเท่ากับรายจ่าย หรือจุดที่มีกำไรเท่ากับศูนย์

$$N^* = \frac{F}{p - v} \quad (2.94)$$

เมื่อ N^* คือ ปริมาณที่จุดคุ้มทุนพอดี

F คือ ต้นทุนคงที่

v คือ ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

p คือ ราคาขายต่อหน่วย

2.3.2 วิธีระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับสุทธิจากการลงทุนมีจำนวนเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิตอนเริ่มโครงการ การคำนวณระยะเวลาคืนทุน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.95)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = (\text{เงินลงทุนสุทธิ}) / (\text{รายได้รับสุทธิรายปี}) \quad (2.95)$$

2.4 การหาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด

การหาค่าความผิดพลาดต่างๆ ของเครื่องมือวัดที่ได้จากคู่มือใช้งานจากบริษัทที่ผลิตเครื่องมือวัดดังกล่าว ในการประมาณค่าความไม่แน่นอนรวมที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดหลายๆ ตัวสามารถหาได้จากสมการ (2.96)

$$\text{Error} = \pm \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_k^2} \quad (2.96)$$

เมื่อ Error คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวม

e_k คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือแต่ละตัว