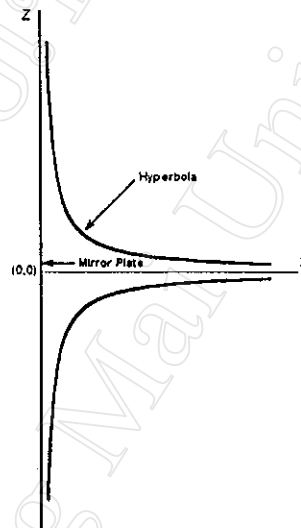


บทที่ 3

การออกแบบแม่เหล็กแบบอัลฟา

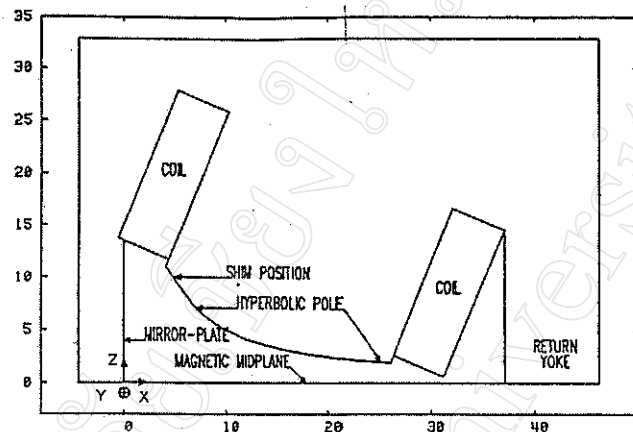
สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กแบบอัลฟามีลักษณะเหมือนกับสนามของแม่เหล็กสี่ขั้ว แตกต่างกันที่แม่เหล็กแบบอัลฟาจะมีลักษณะเป็นครึ่งหนึ่งของแม่เหล็กแบบสี่ขั้ว โดยมี mirror plate ที่ทำจากเหล็ก ตรงระนาบ $x = 0$ เป็นตัวที่ทำให้สนามแม่เหล็ก เหมือนสนามของแม่เหล็กสี่ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงภาคตัดขวางของ pole face ของแม่เหล็กแบบอัลฟาในอุดมคติ

ในทางทฤษฎีขั้วแม่เหล็กอุดมคติ (ideal pole face) จะมีรูปร่างแบบไฮเพอร์โบลา แต่เนื่องจากแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจำเป็นต้องมีขดลวดพันรอบขั้วแม่เหล็ก เพื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่แม่เหล็ก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องมีการปรับแต่งขั้วแม่เหล็กโดยการตัดบางส่วนของไฮเพอร์โบลาออกไป (truncated hyperbola) เพื่อให้ใส่ขดลวด แต่การปรับแต่งขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กแบบอัลฟาจะแตกต่างจากแม่เหล็กแบบสี่ขั้วซึ่งมีลักษณะสมมาตรกล่าวคือลักษณะของไฮเพอร์โบลาจะลึกเข้าไปในแนวนอนมากกว่าในแนวตั้ง เนื่องจากต้องการ good field region ในแนวราบดังแสดงในรูปที่ 3.2 ด้วยสาเหตุดังกล่าว เราจึงเรียกแม่เหล็กแบบอัลฟาว่า asymmetric quadrupole เมื่อมีการปรับแต่งขั้วของแม่เหล็กจะเป็นผลทำให้สนามแม่เหล็กไม่เป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มเนื้อเหล็ก (shimming) เข้าไป โดยเฉพาะบริเวณขอบด้านบนของผิว

ไฮเปอร์โบล่าที่ถูกตัดออกไป การออกแบบครั้งนี้ใช้โปรแกรม POISSON ช่วยในการออกแบบ โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบจะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 3.2 แสดงภาคตัดขวางของแม่เหล็กแบบอัลฟาอย่างง่าย (Borland, 1991)

3.1 คุณสมบัติเฉพาะของแม่เหล็กแบบอัลฟา

ในการออกแบบแม่เหล็กแบบอัลฟาครั้งนี้มีเงื่อนไขเริ่มต้นคือต้องการให้ได้ค่าเกรเดียนต์ (gradient) ของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุด 450 Gauss/cm และต้องการระยะที่เรียกว่า good field region มีค่าประมาณ 15 เซนติเมตร ลึกเข้าไปในแกน X ซึ่งเงื่อนไขเบื้องต้นที่กล่าวมาเพียงพอที่จะสามารถทำให้ bunch length ของลำอิเล็กตรอนอยู่ในเรือนของ femtosecond ได้ และนอกจากนั้นยังกำหนดให้รัศมีของไฮเปอร์โบลามีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร และความกว้างของสนามเหล็กในแนวแกน Y มีค่าประมาณ 40 เซนติเมตร

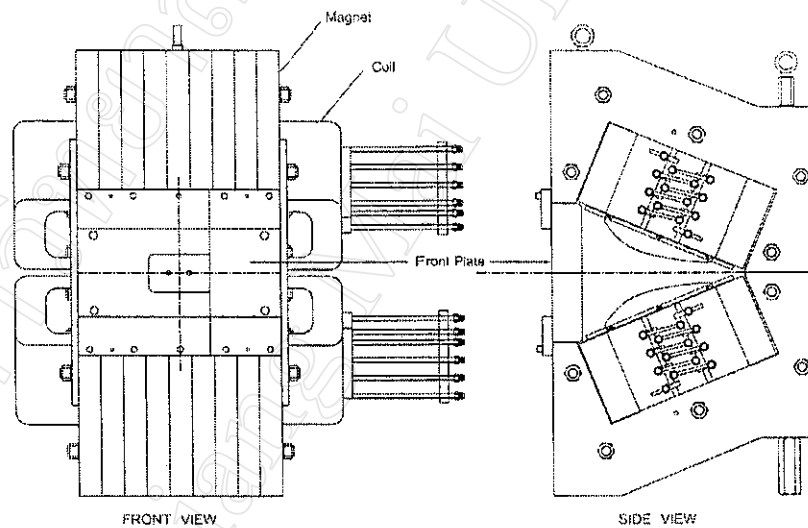
สรุปรายละเอียดของคุณสมบัติต้องใช้ในการออกแบบดังนี้

ค่าเกรเดียนต์สูงสุด	450	Gauss/cm
good field region (ในแนวแกน X)	15	เซนติเมตร
รัศมีไฮเปอร์โบล่า	10	เซนติเมตร
ความกว้างของสนาม (ในแนวแกน Y)	40	เซนติเมตร

3.2 การปรับแต่งขั้วแม่เหล็ก

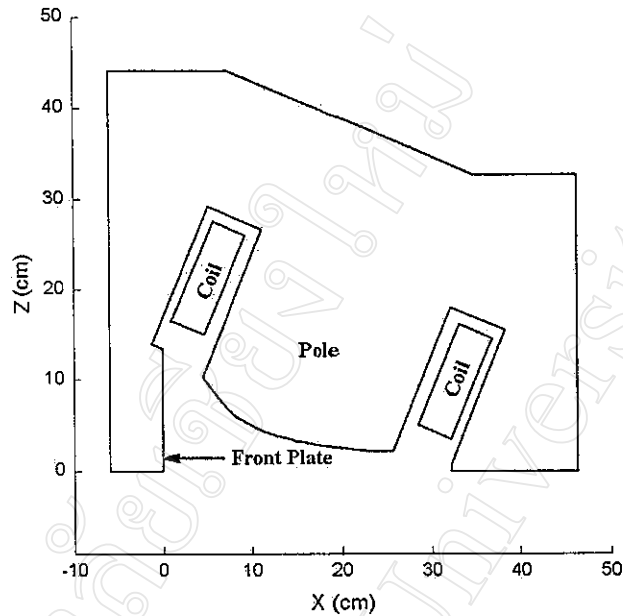
3.2.1 ลักษณะของขั้วแม่เหล็ก

ส่วนประกอบสำคัญของแม่เหล็กแบบอัลฟา คือ ขั้วแม่เหล็ก front plate (mirror plate) และคอยล์ (coil) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในทางปฏิบัติขั้วแม่เหล็กและ front plate จะสามารถแยกชิ้นส่วนกันได้ เพื่อความสะดวกในการใส่คอยล์ขนาดใหญ่เข้าไป ดังนั้นลักษณะของแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจึงมีรูปร่างแตกต่างกันไปจากรูปร่างที่ใช้ในการคำนวณเล็กน้อย เนื่องจากในบางตำแหน่งจำเป็นต้องมีการใช้นิเวศยัดชิ้นส่วนของแม่เหล็กเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 3.3 และเนื่องจากมีขนาดค่อนข้างใหญ่ การจัดหาเหล็กมาทำขั้วแม่เหล็กรวมทั้งการสร้างและขึ้นรูปขั้วแม่เหล็กจะมีความยุ่งยาก ถ้าทำขั้วแม่เหล็กเป็นชิ้นเดียวเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงทำการแบ่งขั้วแม่เหล็กออกเป็นแผ่น (lamination) แล้วนำมาประกบติดกันภายหลัง เพื่อความสะดวกในการสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างของแม่เหล็กแบบอัลฟาที่สร้างขึ้น

สำหรับการออกแบบสร้างแม่เหล็กได้อาศัยโปรแกรม POISSON ช่วยในการคำนวณ ซึ่งโปรแกรม POISSON นั้นเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในระบบ 2 มิติ โดยที่ลักษณะของ pole profile ของแม่เหล็กที่จะป้อนเข้าไปเพื่อเป็นข้อมูล (input data) ให้กับโปรแกรม นั้น จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าลักษณะของแม่เหล็กจะแตกต่างไปจากแม่เหล็กจริงบ้าง ทั้งนี้เพื่อความง่ายและสะดวกในการป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม POISSON

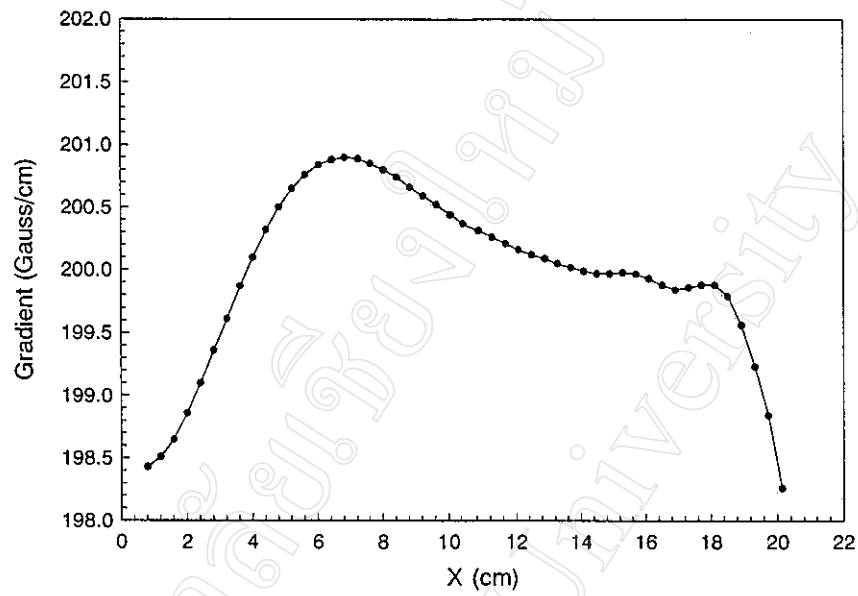


รูปที่ 3.4 แสดง pole profile ของแม่เหล็กที่ป้อนให้กับ โปรแกรม POISSON

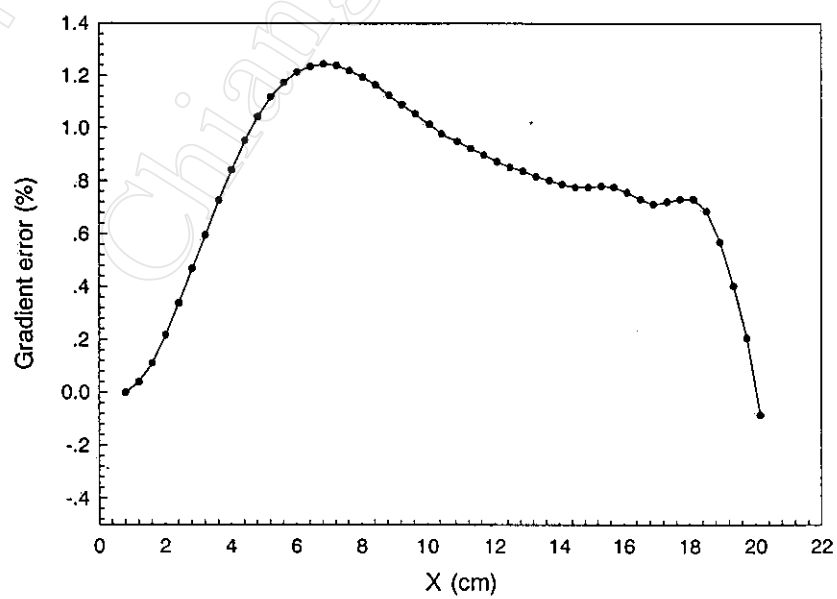
3.2.2 การปรับแต่งขั้วแม่เหล็ก

ในการออกแบบครั้งนี้จะเริ่มต้นด้วยการกำหนดให้ค่าเกรเดียนมีค่าประมาณ 200 Gauss/cm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาสนามแม่เหล็กอ้อมตัว กล่าวคือ ค่าเกรเดียนมีค่าสูงขึ้นก็หมายความว่า ต้องป้อนค่ากระแสไฟฟ้าให้กับโปรแกรม POISSON ก็มีค่าสูงขึ้นไปด้วย อาจจะทำให้เกิดปัญหาเรื่องสนามแม่เหล็กอ้อมตัวตามขึ้นมา ในส่วนของปัญหาเรื่องสนามแม่เหล็กอ้อมตัวจะทำการแก้ไขหลังจากการปรับแต่งขั้วแม่เหล็กให้ค่าเกรเดียนในบริเวณ good field region มีค่าสม่ำเสมอตามที่ต้องการ

การออกแบบเริ่มต้นโดยการแทน pole face ด้วยเส้นโค้งไฮเปอร์โบลาโดยยังไม่มีกรปรับแต่งใดๆทั้งสิ้น กราฟแสดงค่าเกรเดียนและค่า gradient error แสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ จะเห็นว่าลักษณะกราฟความสัมพันธ์ของค่าเกรเดียนกับระยะทางในแนวแกน X มีค่าไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับ mirror plate นั้นค่าเกรเดียนจะมีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่น ทำให้ต้องมีการเพิ่มเนื้อเหล็ก (shimming) เข้าไปให้กับขั้วแม่เหล็ก เพื่อให้ค่าเกรเดียนมีค่าสม่ำเสมอใน good field region

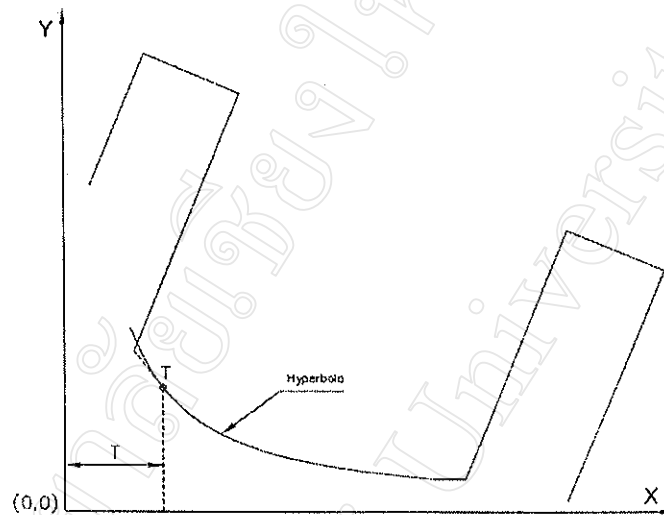


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเกรเดียนต์กับระยะทางในแนวแกน x



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง gradient error กับระยะทางในแนวแกน x

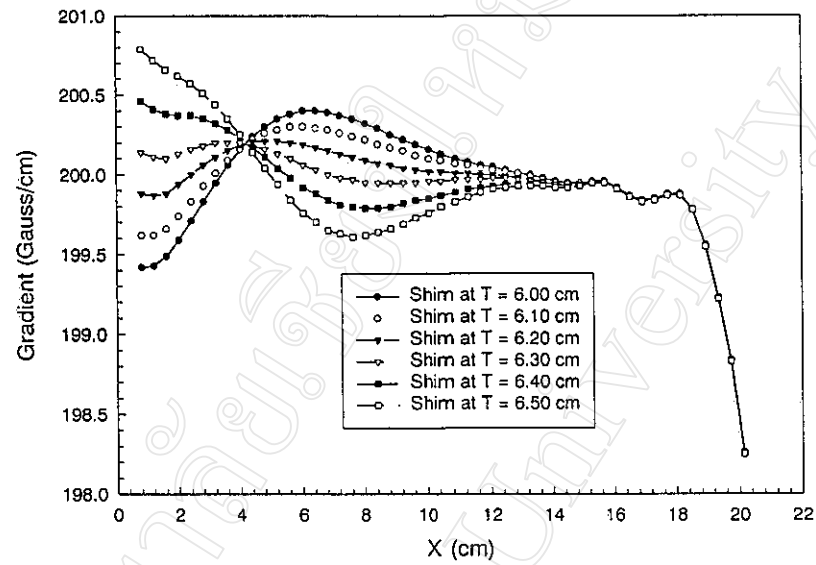
การปรับแต่ง (shimming) ขั้วแม่เหล็กให้เหมาะสม จะทำให้ค่าเกรเดียนมีค่าสม่ำเสมอ ในบริเวณ good filed region วิธีการปรับแต่งขั้วแม่เหล็กที่สะดวกในทางปฏิบัติคือ tangent shimming ดังแสดงในรูปที่ 3.7



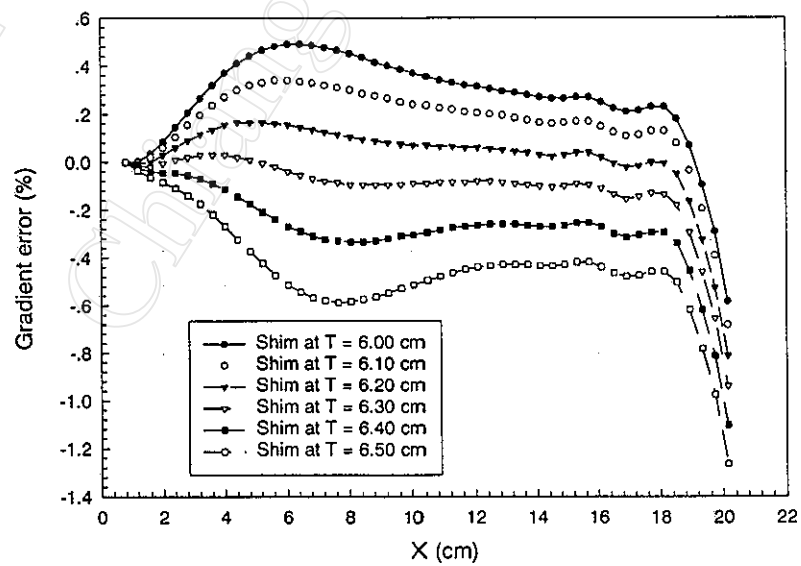
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของการ shimming ณ จุดสัมผัส

กล่าวคือ ให้ T เป็นจุดใดๆบนขั้วแม่เหล็กเป็นจุดเริ่มที่แนวของขั้วแม่เหล็กที่ถูกเปลี่ยนจากรูปไฮเพอร์โบลาเป็นแนวเส้นตรงด้วยค่าความชันของเส้นสัมผัส ณ จุด T ไปจนถึงขอบของขั้วแม่เหล็ก

ผลจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม POISSON โดยเปลี่ยนตำแหน่งจุดเริ่มต้นของแนวเส้นสัมผัส T ต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่าเกรเดียน ซึ่งทำการ shimming ที่จุดสัมผัส T ต่างๆกัน

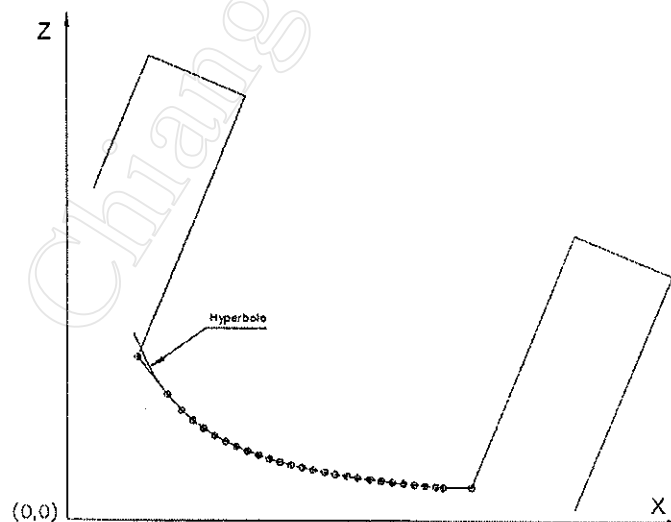


รูปที่ 3.9 กราฟแสดง gradient error ซึ่งทำการ shim ที่จุดสัมผัส T ต่างๆกัน

จะเห็นว่าการ shim ช่วยทำให้ค่าเกรเดียนเพิ่มขึ้น ตรงบริเวณที่มีการ shim โดยที่จุดสัมผัส (T) ที่จะทำให้การเลื่อกนั้นจะต้องมีค่า gradient error ไม่เกิน $\pm 0.1 \%$ และลักษณะกราฟของค่าเกรเดียนมีความสม่ำเสมอมากที่สุด ซึ่งก็คือที่ตำแหน่ง $T = 6.30$ เซนติเมตร

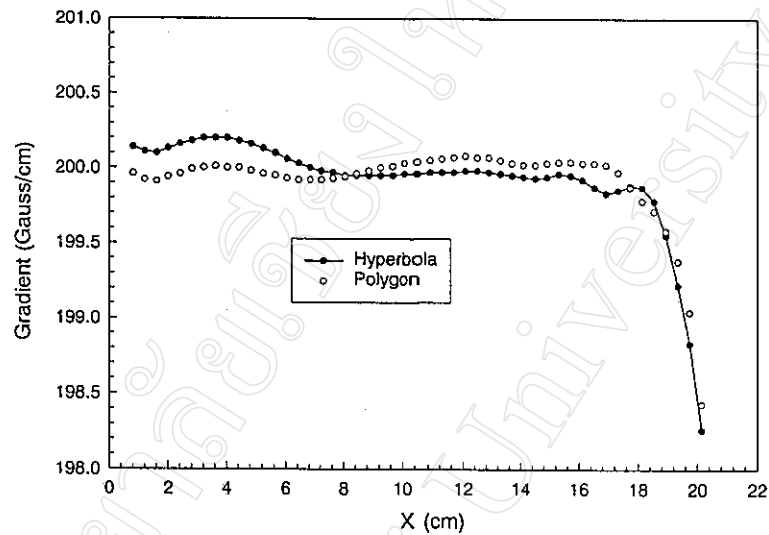
3.2.3 การใช้รูปหลายเหลี่ยมแทนเส้นโค้งไฮเปอร์โบลา

ปัญหาสำหรับการสร้าง pole profile อีกอย่างหนึ่งก็คือ ความยุ่งยากในการสร้างขั้วแม่เหล็กที่แต่ละตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กมีความละเอียดมากเกินไป ดังนั้นในการสร้าง pole face ที่มีลักษณะเป็นแบบไฮเปอร์โบลาที่มีความละเอียดของแต่ละจุดสูงมาก จะทำได้ค่อนข้างยากมากและใช้เงินค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกจุดบางจุดของแนวเส้นโค้งไฮเปอร์โบลาออกมาใช้ในการสร้าง pole face แทนเส้นโค้งไฮเปอร์โบลา เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า เป็น polygon ของไฮเปอร์โบลา ในการเลือกจุดแต่ละจุดออกมานั้นจะต้องทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากไฮเปอร์โบลาน้อยที่สุด และสอดคล้องกับความสามารถของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างด้วย โดยการเลือกจุดนั้นจะใช้วิธีการลองผิดลองถูกอย่างมีระบบ (systematic trial-and-error) โดยยังคงยึดเงื่อนไขไว้ที่ว่าค่า gradient error มีค่าไม่เกิน $\pm 0.1 \%$ และลักษณะกราฟของค่าเกรเดียนมีค่าสม่ำเสมอมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ลักษณะของ pole face แบบไฮเปอร์โบลาและ polygon แสดงในรูปที่ 3.10



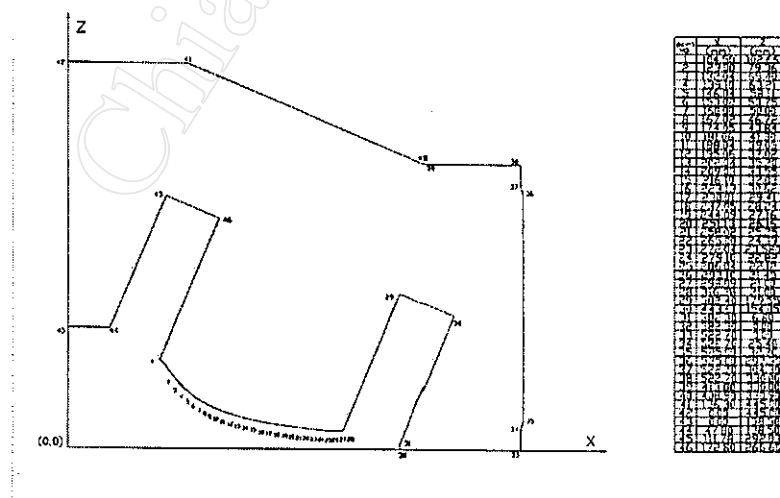
รูปที่ 3.10 ลักษณะของ pole profile แบบไฮเปอร์โบลาและpolygon

การคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON จะได้ผลการเปรียบเทียบค่าเกรเดียนในแนวแกน x ระหว่าง pole face ที่เป็นแบบเส้นโค้งไฮเพอร์โบลาและแบบpolygon ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าเกรเดียนระหว่างกรณีของไฮเพอร์โบลากับ polygon

ส่วนจุดพิกัดของหัวแม่เหล็กในระบบพิกัด XY ที่ใช้ในการคำนวณและใช้ในการสร้างจริง แสดงในรูปที่ 3.12



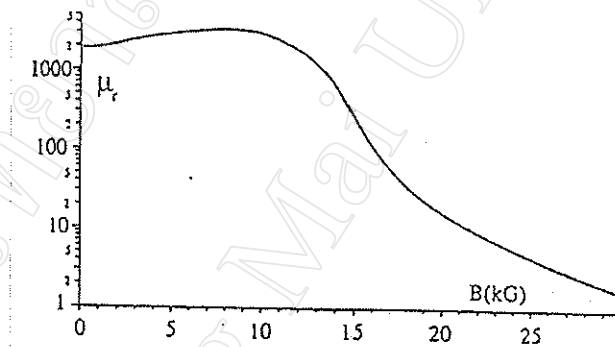
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งของจุดต่างๆของ pole face ที่ใช้ในการสร้างแม่เหล็ก

3.3 การแก้ไขสนามแม่เหล็กอิ่มตัว

จากความสัมพันธ์

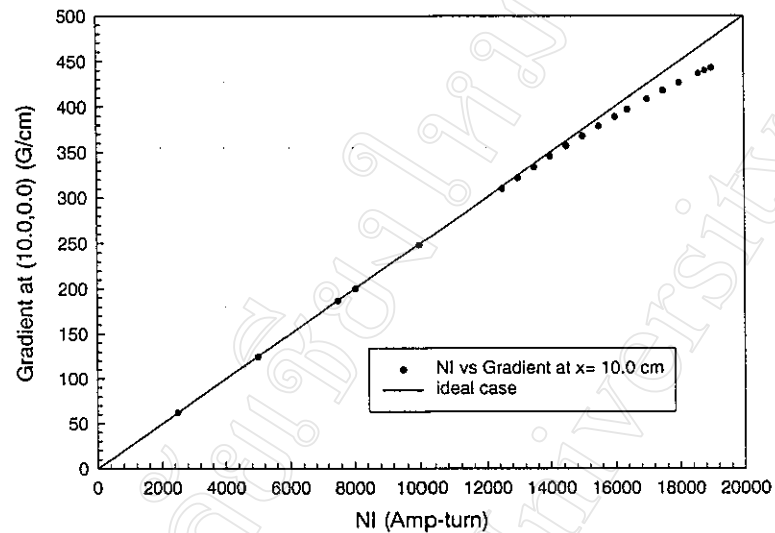
$$B = \mu H \quad \text{โดยที่} \quad H \propto NI$$

โดยปกติค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) จะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น ก็จะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย แต่ในทางปฏิบัติพบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงมากๆ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) จะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของกระแสไฟฟ้าอีกต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากค่า permeability (μ) ของเหล็กนั้นมีค่าไม่คงที่ (ลดลงที่กระแสไฟฟ้าสูงๆ) ดังแสดงรูปที่ 3.13 ซึ่งลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า saturation effect ดังนั้น ในการออกแบบแม่เหล็ก จึงจำเป็นต้องป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาสนามแม่เหล็กอิ่มตัวในขอบเขตของค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการ

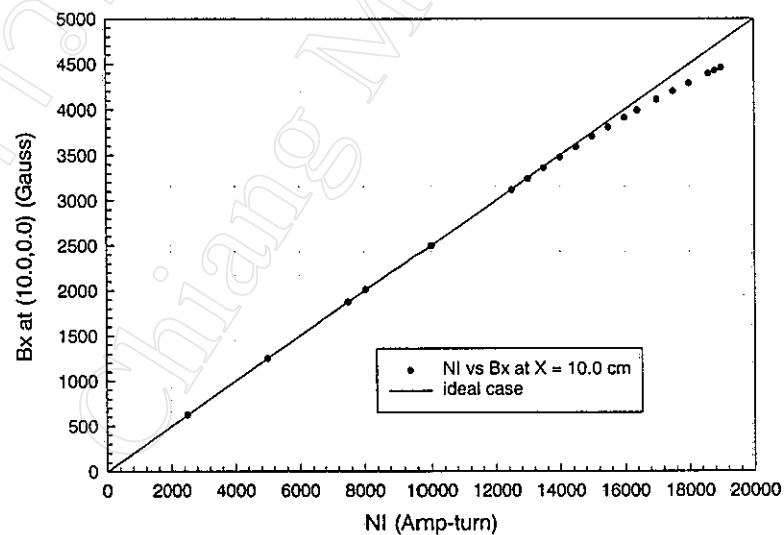


รูปที่ 3.13 กราฟของ Permeability ของเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำและค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Wiedemann, 1993)

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON สามารถสังเกตปัญหาสนามแม่เหล็กอิ่มตัวได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกรเดียนต์ ณ จุดใดจุดหนึ่ง กับค่ากระแสไฟฟ้า (NI) หรือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็ก ณ จุดใดจุดหนึ่งกับค่ากระแสไฟฟ้า (NI) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับ



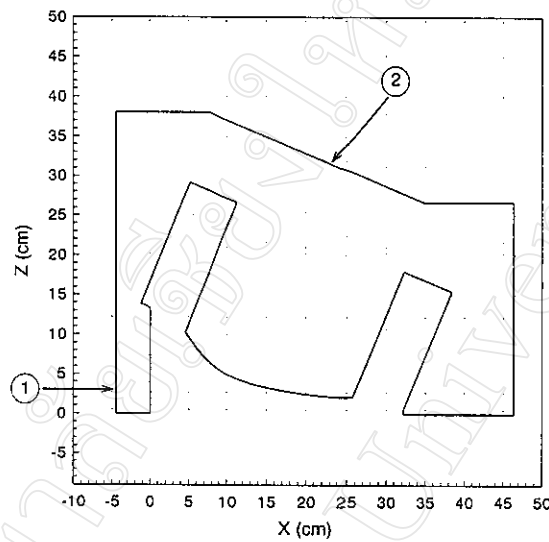
รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกรเดียนต์กับกระแสไฟฟ้า (NI)



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า (NI)

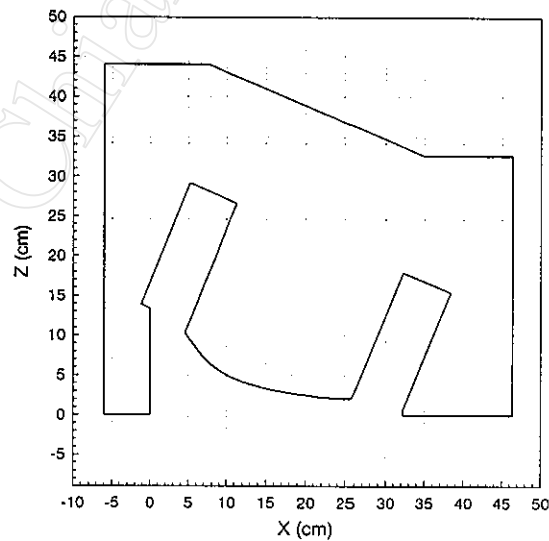
จากกราฟรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15 จะเห็นว่า ที่ค่ากระแส (NI) เท่ากับ 16,000 ampere-turn จะเริ่มมีปัญหาสนามแม่เหล็กอิ่มตัวเกิดขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้จากจุดของกราฟจะไม่เป็นไปตามกรณีของ ideal case การแก้ไขปัญหามาตรแม่เหล็กอิ่มตัวของเหล็กสามารถทำได้โดยการเพิ่มเนื้อ

เหล็กเข้าไปตรงบริเวณที่เนื้อเหล็กบางกว่าบริเวณอื่น สำหรับการออกแบบครั้งนี้จะมีอยู่ 2 ตำแหน่ง ที่ทำการเพิ่มเหล็กเข้าไป คือ บริเวณด้านหน้าและด้านบนของแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.16



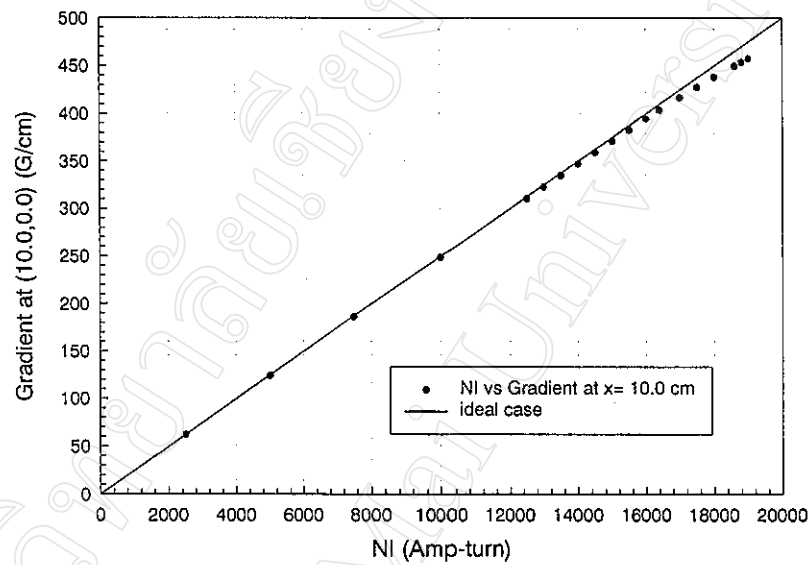
รูปที่ 3.16 แสดงบริเวณที่เพิ่มเนื้อเหล็กเข้าไปให้กับแม่เหล็ก

หลังจากทำการเพิ่มเนื้อเหล็กเข้าไปแล้วลักษณะของ pole profile จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.17

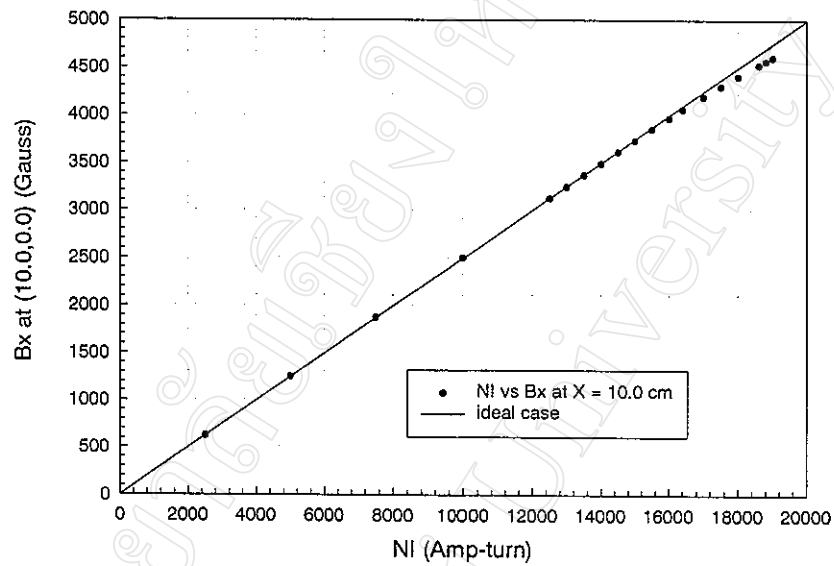


รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะของ pole profile หลังจากเพิ่มเนื้อเหล็กเข้าไป

สำหรับกรณีของการเพิ่มเนื้อเหล็กเข้าไปแล้วทำการคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON อีกครั้ง กราฟความสัมพันธ์ของค่าเกรเดียนต์กับกระแสไฟฟ้า (NI) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า (NI) แสดงดังรูปที่ 3.18 และ รูปที่ 3.19 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกรเดียนต์กับกระแสไฟฟ้า (NI) หลังจากเพิ่มเนื้อเหล็ก



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า (NI) หลังจากเพิ่มเนื้อเหล็ก

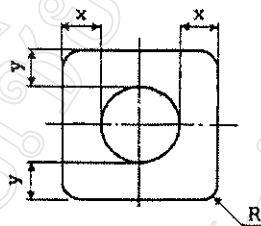
จากกราฟรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 จะสังเกตเห็นว่าค่าของเกรเดียนต์และค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่กระแสไฟฟ้า (NI) มากกว่า 16,000 ampere-turn จะมีค่ามากกว่ากรณีที่ยังไม่ได้เพิ่มเนื้อเหล็กเข้าไป และค่าที่ได้ยังเข้าใกล้กรณีของ ideal case มากกว่าอีกด้วย

3.4 การออกแบบขดลวด

ในการออกแบบขดลวดสำหรับแม่เหล็กแบบอัลฟามีรายละเอียดที่จะต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

3.4.1 ลักษณะของขดลวดที่ใช้

ขดลวดที่ใช้จะมีลักษณะเป็นลวดทองแดงที่มีรูตรงกลาง (hollow conductor) ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งรูตรงกลางมีไว้สำหรับระบายความร้อนด้วยน้ำ และคุณสมบัติของลวดที่ถูกเลือกนำมาใช้แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.20 แสดงภาคตัดขวางของลวดทองแดง

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของลวดทองแดงที่เลือกมาใช้

No.	OD	ID	X=Y	R	Kg/m
8237	10 มม.	4 มม.	3 มม.	1 มม.	0.77

3.4.2 กระแสสูงสุดที่ป้อนให้กับขดลวด

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON สำหรับค่าเกรเดียนต์สูงสุดประมาณ 450 Gauss/cm จะใช้ค่ากระแสสูงสุด (NI) คือ 18,600 ampere-turn และเมื่อพิจารณาจากขนาดของขดลวดและพื้นที่ที่จะใส่ขดลวดเข้าไปในแม่เหล็กแล้วจึงทำการตัดสินใจให้คอยล์มีจำนวนขดลวดทองแดง 70 รอบ ดังนั้นทำให้สามารถคำนวณค่ากระแสสูงสุดที่ใช้ได้ดังนี้

$$NI_{\max} = 18,600 \text{ Ampere-turn}$$

$$I_{\max} = \frac{18,600}{70} \text{ Ampere}$$

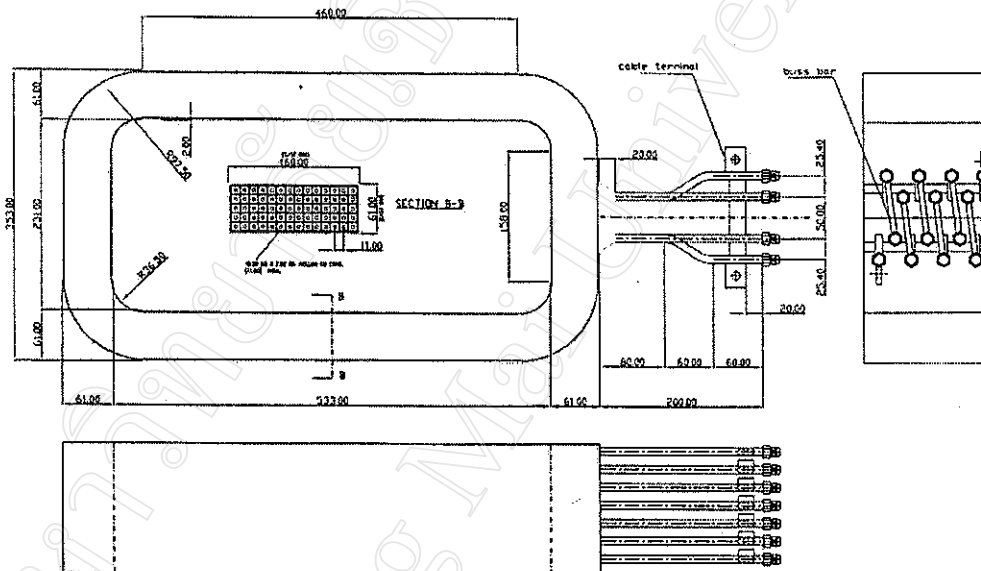
$$I_{\max} = 265 \text{ Ampere}$$

3.4.3 ความยาวของขดลวด

สำหรับจำนวนขดลวดทั้งหมด 70 รอบ จะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 14 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีจำนวนขดลวดทั้งหมด 5 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยความยาวของขดลวดเป็นดังนี้

ความยาวของขดลวด 1 ชั้น (l) คือ 8.212 เมตร

ความยาวของขดลวด 14 ชั้น (L) คือ $8.212 \times 14 = 114.968$ เมตร



รูปที่ 3.21 แสดงภาพวาดของคอยล์ที่ทำการออกแบบสำหรับแม่เหล็กแบบอัลฟา

3.4.4 ความต้านทานของขดลวด

ความต้านทานของขดลวดทองแดงสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

เมื่อ ρ คือสภาพความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของขดลวดทองแดงมีค่าอยู่ในช่วง

$$1.8-2.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm$$

L คือความยาวของขดลวดทองแดง 1 ขด

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดง

ให้ ρ มีค่าประมาณ $2.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$

L เท่ากับ 11496.8 cm

A เท่ากับ $1 - (0.4)^2 = 0.874 \text{ cm}^2$

$$\therefore R = \frac{2.0 \times 10^{-6} * 11496.8}{0.874}$$

$$= 26.3 \text{ m}\Omega$$

power loss สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$P = I_{\max}^2 R$$

$$I_{\max} = 265 \text{ Ampere}$$

$$R = 26.31 * 2 \text{ m}\Omega \quad (\text{สำหรับ 2 คอยล์})$$

$$\therefore P = (265)^2 * 26.31 * 2 * 10^{-3}$$

$$= 3695 \text{ watts}$$

ส่วนความต่างศักย์หาได้จากจาก

$$V = IR$$

$$= 265 * 26.31 * 10^{-3}$$

$$= 13.9 \text{ volt}$$

3.4.5 อัตราการไหลของน้ำที่ต้องใช้ในการระบายความร้อน

เนื่องจากแม่เหล็กแบบอัลฟาเป็นแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่ และใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง จึงทำให้ผลิตพลังงานความร้อนออกมามาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีที่จะต้องอาศัยระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (cooling system) การคำนวณอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อน โดยที่ยังไม่รวมการระบายความร้อนให้แก่ทองแดงและเหล็ก สามารถคำนวณได้ดังนี้ คือ

จากสูตร

$$Q = mc\Delta T$$

แต่เนื่องจาก

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dQ}{dt}$$

ดังนั้น

$$P = c\Delta T \frac{dm}{dt} = c\Delta T \rho \frac{dV}{dt}$$

$$= c\Delta T\rho \frac{dV}{dt}$$

เมื่อ

P = power loss ของคอยล์ (watts)

c = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($\cong 4190 \text{ J / kg}^{\circ}\text{C}$)

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออก ($^{\circ}\text{C}$)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (10^3 kg / m^3)

$\frac{dV}{dt}$ = อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านท่อภายใน (m^3 / s)

เริ่มต้นโดยให้

$$\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$$

$$\therefore 3695 = 4190 * 2 * 10^3 \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dV}{dt} = 4.4093 * 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} = 440.93 \text{ cm}^3 / \text{s} = 26.4 \text{ liter} / \text{min}$$