



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมโดยการปรับ
ค่าความปั่นป่วนของการไหลของน้ำและความเข้มสนามแม่เหล็ก

A Study on Efficiency Enhancement for Industrial Water Treatment Using Turbulent
Intensity and Magnetic Field Variation

نامผู้วิจัย นายทศพล สุกตะ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์พิชัย กฤษไมตรี, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์นิตรณัย จิระเดชะ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์พิชัย กฤษไมตรี, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม
โดยการปรับค่าความปั่นป่วนของการไหลของน้ำและความเข้มสนามแม่เหล็ก

A Study on Efficiency Enhancement for Industrial Water Treatment Using
Turbulent Intensity and Magnetic Field Variation

โดย

นายทศพล สุกตะ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2550

ทศพล สุคตะ 2550: การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำใช้ในโรงงาน
อุตสาหกรรมโดยการปรับค่าความดันป้อนของการไหลของน้ำและความเข้ม
สนามแม่เหล็ก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชา
รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 88 หน้า

น้ำเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ในปัจจุบันพบว่า
ปัญหาที่เกิดขึ้นกับน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมคือน้ำมีสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อระบบและ
เครื่องจักร ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรลดลงหรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งการใช้
สารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำจะเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก และลักษณะการไหล
แบบปั่นป่วนต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ความกระด้างของน้ำและปริมาณตะกอนสนิม โดยทำการ
ทดลองให้น้ำไหลเวียนในระบบปิดผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กต่างกัน 4 ค่าคือ
128.2, 199.2, 267.8 และ 335.0 มิลลิเทสลาและทำการปรับลักษณะการไหลของน้ำให้มีความ
ปั่นป่วนเพิ่มขึ้น โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่าระยะพิชต์ต่อความกว้างของแผ่นบีด (y) ต่างกัน 4 ค่าคือ
4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 และทำการเปรียบเทียบกันในรูปแบบของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อน้ำไหลผ่านระบบที่ติดตั้งสนามแม่เหล็ก ค่าความเข้ม
สนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta\text{hardness}}$) และค่า
ประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างไม่มีการ
เปลี่ยนแปลง และเมื่อติดตั้งแผ่นบีดเข้าไปเพื่อเพิ่มระดับความปั่นป่วนให้กับการไหลของน้ำ พบว่า
การติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่าระยะพิชต์ต่อความกว้างของแผ่นบีด (y) น้อยลงจะทำให้ค่า $\eta_{\Delta\text{hardness}}$ และ
ค่า $\eta_{\text{pipe-scale}}$ เพิ่มมากขึ้น ในทุกช่วงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก นั้นแสดงว่าการเพิ่มการปั่นป่วน
ของการไหลมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็กและจากการหาสมการ
ความสัมพันธ์พบว่า ที่ความเข้มสนาม แม่เหล็กระหว่าง 128.2 ถึง 335.0 มิลลิเทสลา และค่า
ระยะพิชต์ต่อความกว้างของแผ่นบีด (y) ระหว่าง 4.0 ถึง 10.0 สามารถหาประสิทธิภาพในการลดค่า
ความกระด้างได้จากสมการ $\eta_{\Delta\text{hardness}} = 8.416B' - 6.3 \times 10^{-2}y$ และหาประสิทธิภาพในการดักจับ
ตะกอนสนิมได้จากสมการ $\eta_{\text{pipe-scale}} = 44.90 B' - 0.371y$

Thosapol Sukata 2007: A Study on Efficiency Enhancement for Industrial Water Treatment Using Turbulent Intensity and Magnetic Field Variation
Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 88 pages.

Water is one of the most important factors in industrial manufacturing process. At present, the problems found in a manufacturing process are the improper water conditions which affect the efficiency of the machines. Using chemicals in industrial water treatment results in cost increase and serious environmental effects.

This research aims to study the influence of magnetic field and flow turbulence on pH level, hardness and pipe-scale quantity by recirculating water through different intensity of magnetic field, 128.2, 199.2, 267.8 and 335.0 mT. Moreover by installing twisted plates which have different pitches per the width of plates of 4.0, 6.0, 8.0 and 10.0 given various turbulent intensity of the flow. From the results obtained, it was indicated that the efficiency in hardness reduction ($\eta_{\Delta\text{hardness}}$) and efficiency in pipe scale reduction ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) were increased with intensity of magnetic field. In contrast, the magnetic field intensity did not effect the pH level. With the twisted plate installed, it was found that the smallest pitch per the width of plates of 4 had the most effect on $\eta_{\Delta\text{hardness}}$ and $\eta_{\text{pipe-scale}}$ enhancement. Gradually increased the pitch per the width of plate resulted in the reduction in $\eta_{\Delta\text{hardness}}$ and $\eta_{\text{pipe-scale}}$. Finally, the study concisely showed that the increase in turbulent intensity and magnetic field would enhance the efficiency of industrial water treatment. Besides, at the range of magnetic field 128.2 – 335.0 mT and the pitch per the width of plate of 4.0 – 10.0, The equations used to evaluate the water treatment efficiency were $\eta_{\Delta\text{hardness}} = 8.416B' - 6.3 \times 10^{-2}$ and $\eta_{\text{pipe-scale}} = 44.90 B' - 0.371y$.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัย ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งให้ความสนใจใส่และข้อคิดที่ดีในการทำงานและการดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พิชัย กฤษไมตรี กรรมการวิชาเอก และรองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรคนัย จิระเดชะ กรรมการวิชาการ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ภูษงค์ กิจอำนาจสุข อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก และช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็ก

ขอขอบคุณ คุณพิมพ์วิ แก้วใจรักษ์ และคุณศุภราช แสงวงศ์ สำหรับความช่วยเหลือในด้านความรู้และอุปกรณ์เกี่ยวกับปฏิบัติการทางเคมี

ขอขอบคุณ คุณธีรวัฒน์ วงศ์ขมื่น ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คุณมานพ ศิริมงคล และคุณมาลัย ชูศรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ และให้ความรู้ในการใช้อุปกรณ์

ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆน้องๆ ทุกคนที่ห้องปฏิบัติการ Computational Mechanics Laboratory สำหรับคำปรึกษา คำแนะนำ และกำลังใจที่ดี ในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว และขอขอบคุณทุก ๆ ท่านที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ทศพล สุกตะ

มีนาคม 2550

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
ปัญหาที่เกิดจากน้ำ	4
อิทธิพลของสนามแม่เหล็กในการบำบัดน้ำ	8
มลทินในน้ำ	9
ลักษณะการไหล	12
สนามแม่เหล็กและกระแส	17
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	43
ผล	43
วิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	73
สรุป	73
ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	75
ภาคผนวก	77

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงสาเหตุและกลไกของการกัดกร่อนโลหะ	4
2	แสดงตะกอนต่างๆที่พบในระบบหม้อไอน้ำและระบบน้ำต่างๆ	5
3	แสดงสภาพน้ำโดย mg/L ในรูป CaCO_3	11
4	แสดงมาตรฐานน้ำเลี้ยงใน Boiler	12
5	ชนิดกรไหลในท่อกลม	13
6	แสดงสนามแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง XY โดยทำการวัดที่ค่า Z ต่างๆ	21
7	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบหมุนเวียนน้ำ	23
8	แสดงค่าตัวแปรในการสร้างสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการคำนวณ	25
9	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กชั่วคราว	26
10	แสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากการทดลอง	29
11	แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กแต่ละคู่ที่ตำแหน่งต่างๆ	31
12	แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัดด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ และผลต่างของค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด	43
13	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ	44
14	แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติดอยู่ในท่ออะคริลิก	46
15	แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ	47
16	แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัดด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 4.0$ และผลต่างของค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด	49

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิตที่มีค่า $y = 4.0$	49
18	แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจาก ผ่านการบำบัดด้วยความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิต ที่มีค่า $y = 6.0$ และผลต่างของค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้าง ของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด	50
19	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิตที่มีค่า $y = 6.0$	50
20	แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจาก ผ่านการบำบัดด้วยความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิต ที่มีค่า $y = 8.0$ และผลต่างของค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้าง ของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด	51
21	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิตที่มีค่า $y = 8.0$	51
22	แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจาก ผ่านการบำบัดด้วยความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิต ที่มีค่า $y = 10.0$ และผลต่างของค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้าง ของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด	52
23	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิตที่มีค่า $y = 10.0$	52
24	แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มข้นแม่เหล็ก ค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิตที่มีค่า $y = 4.0$ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติด อยู่ในท่ออะคริลิก	53
25	แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก ค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิตที่มีค่า $y = 4.0$	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
26	แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มข้นแม่เหล็ก ค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 6.0$ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติด อยู่ในท่ออะคริลิก	54
27	แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก ค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 6.0$	54
28	แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มข้นแม่เหล็ก ค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 8.0$ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติด อยู่ในท่ออะคริลิก	54
29	แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก ค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 8.0$	55
30	แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มข้นแม่เหล็ก ค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 10.0$ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติด อยู่ในท่ออะคริลิก	55
31	แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก ค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 10.0$	55
ตารางผนวกที่		
1	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า ความต้านทานและกระแสไฟฟ้า	74
2	แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไตเตรท เป็นค่าความกระด้าง	76
3	แสดงข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการแก้โจทย์ปัญหาเพื่อหาสมการของ $\eta_{\Delta \text{hardness}}$	83
4	แสดงข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการแก้โจทย์ปัญหาเพื่อหาสมการของ $\eta_{\text{pipe-scale}}$	85

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สภาพท่อน้ำของหม้อไอน้ำที่อุดตัน เนื่องจากระบบการ โบลว์ดาวน์ ตะกอนหม้อไอน้ำไม่ดี	6
2	สภาพความเสียหายของท่อภายในหม้อไอน้ำอันเนื่องมาจากตะกอน ที่เกาะจับผิวท่อภายใน ทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่สามารถทำได้ ตามปกติท่อจึงเกิดระเบิดเสียหาย	6
3	ห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำที่ระเบิด พังเสียหาย อันเนื่องมาจาก ตะกอนจับจนไม่สามารถส่งผ่านความร้อนจากการเผาไหม้ไปสู่ น้ำได้ทัน จนห้องเผาไหม้ร้อนจัดและระเบิดเสียหายในที่สุด	7
4	แสดงผลการวิเคราะห์ EDS แสดงองค์ประกอบของตะกอนที่สะสม เนื่องจากสนามแม่เหล็ก	20
5	แสดงแนวการติดแม่เหล็กบนพลาสติก	21
6	แสดงการสอดใส่แผ่นบีดในท่อทดสอบ	22
7	แสดงระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในงานวิจัย	24
8	หม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง	27
9	แสดงการต่อวงจรไฟฟ้า เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก	27
10	แสดงการวัดค่าสนามแม่เหล็กชั่วคราว	28
11	การแสดงผลของเทสลามิเตอร์	28
12	แสดงตำแหน่งการวัดค่าสนามแม่เหล็ก	30
13	การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก	30
14	การแสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้	31
15	โครงพลาสติกบนท่ออะคริลิก	32
16	ชุดสนามแม่เหล็กที่ติดตั้งในระบบหมุนเวียนน้ำ	32
17	สารแคลเซียมคลอไรด์	33
18	ตะกอนสนิม (เหล็กออกไซด์)	34
19	แสดงลักษณะของแผ่นบีด	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	แผ่นเหล็กที่ใช้ทำแผ่นบีด	36
21	แสดงวิธีการทำแผ่นบีด	36
22	แผ่นบีดที่มีค่า y ต่างกัน	37
23	แสดงลักษณะแผ่นบีดที่สอดในท่ออะคริลิก	38
24	pH-Meter	39
25	แสดงโครงสร้างของ EDTA	40
26	เครื่อง Suction	41
27	เครื่องชั่งสาร	42
28	ตัวอย่างน้ำที่เก็บไปทดสอบ	44
29	แสดงสีของน้ำตัวอย่างที่เปลี่ยนไปขณะทดสอบด้วยการไตเตรท	
	(ก) เมื่อหยดสารละลาย Buffer pH 10	45
	(ข) เมื่อหยด Erichrome Black T	45
	(ค) เมื่อหยดสารละลาย EDTA จนใกล้จุดยุติ	45
	(ง) เมื่อถึงจุดยุติ	45
30	การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วย pH-Meter	46
31	ตะกรันสนิมในบริเวณที่ติดตั้งสนามแม่เหล็กทั้งสามคู่	48
32	ตะกรันสนิมในท่ออะคริลิก	48
33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ กับ	
	ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง	56
34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ กับ	
	ประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม	57
35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ กับ	
	ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นบีด	
	ที่มีค่า $y = 4.0$	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 6.0$	58
37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 8.0$	59
38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 10.0$	59
39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง เมื่อไม่ติดตั้งแผ่นบิดกับติดตั้งแผ่นบิดทุกๆค่า y	61
40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า y ของแผ่นบิด และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta\text{hardness}}$) ที่ทุกๆค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก	62
41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 4.0$	63
42	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 6.0$	63
43	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 8.0$	64
44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 10.0$	64
45	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม เมื่อไม่ติดตั้งแผ่นบิดกับติดตั้งแผ่นบิดทุกๆค่า y	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า y ของแผ่นบิด และประสิทธิภาพของการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) ที่ทุกๆค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก	67
47	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\eta_{\Delta\text{hardness}} / B'$ กับ h / DB'	69
48	แสดงเส้นสมการสำหรับหาประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง	69
49	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\eta_{\text{pipe-scale}} / B'$ กับ h / DB'	70
50	แสดงเส้นสมการสำหรับหาประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม	71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

V	=	ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ
Q	=	อัตราการไหล
A	=	พื้นที่หน้าตัดการไหล
Re	=	Reynold number
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อ
μ	=	ค่าความหนืดตามชนิดของไหล
T_u	=	Turbulence intensity
k	=	Turbulence energy
d_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก
B	=	ความเข้มข้นแม่เหล็ก
Φ	=	คือ ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมด
μ	=	ค่าความซึมซาบได้ของสสารแต่ละชนิด
μ_0	=	ค่าความซึมซาบได้ของอากาศ
N	=	จำนวนรอบของขดลวดทองแดง
I	=	กระแสไฟฟ้า
E	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้า
l	=	ระยะห่างระหว่างขดลวดขดแรกกับขดสุดท้าย
W	=	กำลังไฟฟ้า
R	=	ค่าความต้านทานไฟฟ้า
$CaCl_2$	=	แคลเซียมคลอไรด์
$CaCO_3$	=	แคลเซียมคาร์บอเนต
Ca^{2+}	=	แคลเซียมไอออน
H	=	ระยะที่แผ่นบิดหมุนครบ 180°
s	=	ระยะห่างระหว่างแผ่นบิด
Δ_{pH}	=	ผลต่างค่าความเป็นกรด-ด่าง
$\Delta_{hardness}$	=	ผลต่างค่าความกระด้าง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\eta_{\Delta\text{pH}}$	=	ประสิทธิภาพในการเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง
$\eta_{\Delta\text{hardness}}$	=	ประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง
F	=	แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า
V_{EDTA}	=	คือ ปริมาตรของสารละลาย EDTA ที่ใช้ในการไตเตรท
M	=	Molar
$\eta_{\text{pipe-scale}}$	=	ประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม
y	=	ระยะที่แผ่นบิดหมุนครบ 180° ต่อ ความกว้างของแผ่นบิด
B'	=	อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองนั้นๆ ต่อ ความเข้มข้นแม่เหล็กสูงสุดที่ใช้ คือ 335.0 มิลลิเทสลา

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมโดยการปรับ ค่าความปั่นป่วนของการไหลของน้ำและความเข้มสนามแม่เหล็ก

A Study on Efficiency Enhancement for Industrial Water Treatment Using Turbulent Intensity and Magnetic Field Variation

คำนำ

ในโลกปัจจุบันการแข่งขันทางการค้าและการผลิตสินค้าทางด้านอุตสาหกรรมมีการแข่งขันกันสูง ดังนั้นในการที่ผู้ผลิตจะสามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตได้ จำเป็นต้องคำนึงถึงการจัดการด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต เทคโนโลยีในการผลิต และการจัดการด้านของเสียจากกระบวนการผลิต ซึ่งต้องมีการใช้วัตถุดิบในการผลิตให้ได้ประโยชน์มากที่สุด โดยใช้เทคโนโลยีในการผลิตที่ทำให้สามารถได้ผลผลิตสูงสุด และสุดท้าย ในการจัดการด้านของเสียจำเป็นต้องจัดการให้มีของเสียจากกระบวนการผลิตในปริมาณที่น้อยที่สุดหรือพยายามนำกลับมาใช้ใหม่และไม่ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

น้ำเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ในปัจจุบันพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นกับน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อระบบและเครื่องจักร น้ำซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือค่า pH ที่ไม่เหมาะสม หรือมีค่าความกระด้างของน้ำสูงเกินไป เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรลดลง หรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากมีคราบตะกอนติดหรือมีการอุดตันที่อุปกรณ์และเครื่องจักร ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เกิดการชำรุดเสียหายและมีอายุการใช้งานที่สั้นลงได้ สำหรับการบำบัดน้ำหรือปรับสภาพน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตนั้น ในปัจจุบันมีการใช้สารเคมีเติมลงไปในการบำบัดเพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือค่าความกระด้างที่เหมาะสมตามต้องการ แต่การใช้สารเคมีนั้น จะส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การนำคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กซึ่งมีอิทธิพลในการปรับโครงสร้างของโมเลกุลของน้ำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง และความกระด้างที่เหมาะสมตามต้องการ

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังครอบคลุมถึงการปรับสภาพลักษณะการไหลของน้ำ ให้มีความ
ปั่นป่วนเพิ่มขึ้นโดยการติดตั้งแผ่นปิด เพื่อให้สามารถลดความกระด้างของน้ำและตะกอนได้ดีขึ้น
โดยวิธีการนี้ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการปรับสภาพน้ำ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต
รวมถึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหรือเป็นอันตรายต่อชีวิต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำใช้กับความเข้มของสนามแม่เหล็กและค่าระดับความปั่นป่วนของการไหลที่อยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างระยะพิตช์กับความกว้างของแผ่นบิด
2. ออกแบบระบบบำบัดน้ำ โดยใช้สนามแม่เหล็กและปรับค่าระดับความปั่นป่วนของการไหล
3. เพื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้แม่เหล็กถาวรกับแม่เหล็กชั่วคราวในการบำบัดน้ำ

การตรวจเอกสาร

ปัญหาที่เกิดจากน้ำ

แม้ว่าน้ำจะมีประโยชน์อย่างมหาศาล แต่อาจสร้างปัญหาให้กับผู้ใช้ได้ ปัญหาต่างๆที่เกิดจากน้ำที่ใช้เพื่อกิจการอุตสาหกรรม มีดังนี้

1. ปัญหาเรื่องการกัดกร่อนโลหะ

น้ำที่มีคุณภาพไม่เหมาะสม (แต่ไม่จำเป็นต้องสกปรก) สามารถกัดกร่อนโลหะนานาชนิดที่เป็นอุปกรณ์ของระบบหม้อไอน้ำ ระบบระบายความร้อนและระบบท่อส่งน้ำ ทำให้เกิดความเสียหายหรือทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดังกล่าวลดต่ำลง และในบางครั้งอาจทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์อีกด้วย เนื่องจากการกัดกร่อนโลหะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติโดยเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะกลับคืนไปสู่สภาวะเดิมตามธรรมชาติ เช่น เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นแร่เหล็ก เป็นต้น สาเหตุพร้อมทั้งกลไกของการกัดกร่อนโลหะอาจสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงสาเหตุและกลไกของการกัดกร่อนโลหะ

สาเหตุการกัดกร่อน	กลไกการกัดกร่อน
1. เมื่อน้ำมีพีเอชต่ำหรือเป็นกรด	การกัดกร่อนที่เกิดจากไฮโดรเจนหนีออกจากน้ำ
2. เมื่อน้ำมีดีไอ (และพีเอชสูงกว่า 7)	เกิดเซลล์ไฟฟ้าแบบกัดกร่อน
3. โลหะต่างชนิดกันต่อกันเป็นวงจรเซลล์ไฟฟ้า	เกิดเซลล์ไฟฟ้าแบบกัดกร่อน
4. โลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	ศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้า
5. ผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีดีไอ	ศักย์บริเวณที่สัมผัสกับไม่สัมผัสดีไอต่างกัน
6. ผิวโลหะสัมผัสกับสารที่ไอออนไม่สม่ำเสมอ	คล้ายข้อ 5
7. ผิวโลหะมีรอยร้าว	บริเวณรอยร้าวเป็นศักย์ไฟฟ้าต่ำ ทำให้ผุกร่อน
8. โลหะได้รับความกดดัน	บริเวณที่แรงดันสูงเป็นขั้วบวกที่ผุกร่อน

ที่มา : การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ (2540)

2. ปัญหาเรื่องตะกรันในระบบน้ำหล่อเย็น ระบบหม้อไอน้ำและระบบท่อน้ำ

ปัญหาที่เกิดขึ้นเสมอและมักหลีกเลี่ยงได้ยากอีกประการหนึ่งคือ ตะกรัน ซึ่งตะกรันที่เกิดขึ้นจะเป็นฉนวนต่อการถ่ายเทความร้อน และทำให้ท่อน้ำ วาล์ว และข้อต่อต่างๆเกิดการอุดตันได้ ตะกรันอาจแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ ตะกรันสนิม (Pipe Scale) และตะกรันหินปูน (Mineral Scale) ตะกรันสนิมหมายถึงตะกรันที่เป็นโลหะออกไซด์ เช่น เหล็กออกไซด์ เป็นต้น ตะกรันเหล่านี้เป็นผลที่ได้จากปฏิกิริยากัดกร่อนโลหะ และมักเกิดขึ้นภายในท่อหรือส่วนอื่นๆ ของระบบน้ำ ส่วนตะกรันหินปูนมักเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 2 แสดงตะกรันต่างๆที่พบในระบบหม้อไอน้ำและระบบน้ำต่างๆ

ชื่อวิทยาศาสตร์	สูตร	ชื่อสามัญ	ผลกระทบ
แคลเซียมคาร์บอเนต	CaCO_3	ซอล์ก หินปูน	ตะกรันอ่อน
แคลเซียมไบคาร์บอเนต	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	-	ตะกรันอ่อน
แคลเซียมซัลเฟต	CaSO_4	ยิบซัม พลาสเตอร์ปารีส	ตะกรันแข็ง
แมกนีเซียมคาร์บอเนต	MgCO_3	แมกนีไซต์	ตะกรันอ่อน
แมกนีเซียมซัลเฟต	MgSO_4	Epsom Salt	การกัดกร่อน
ซิลิกอน ไดออกไซด์	SiO_2	ซิลิกา	ตะกรันแข็ง
แคลเซียมคลอไรด์	CaCl_2	-	การกัดกร่อน
แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	-	ตะกรัน การกัดกร่อน
แมกนีเซียมคลอไรด์	MgCl_2	-	การกัดกร่อน
โซเดียมคลอไรด์	NaCl	เกลือแกง	Electrolysis
โซเดียมคาร์บอเนต	Na_2CO_3	โซดาแอช โซดาซักผ้า	สภาพต่าง
โซเดียมไบคาร์บอเนต	NaHCO_3	โซดาทำขนม	น้ำปะทุ น้ำเป็นฟอง
โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	โซดาไฟ	สภาพต่าง โลหะร้าว
โซเดียมซัลเฟต	Na_2SO_4	Glauber'S Salt	สภาพกรด

ที่มา : การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ (2540)



ภาพที่ 1 สภาพท่อน้ำของหม้อไอน้ำที่อุดตัน เนื่องจากระบบการโบสตัววนตะกอนหม้อไอน้ำไม่ดี



ภาพที่ 2 สภาพความเสียหายของท่อภายในหม้อไอน้ำอันเนื่องมาจากตะกอนที่เกาะจับผิวท่อภายใน ทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่สามารถทำได้ตามปกติท่อจึงเกิดระเบิดเสียหาย



ภาพที่ 3 ห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำที่ระเบิด พังเสียหาย อันเนื่องมาจาก ตะกรันจับจนไม่สามารถส่งผ่านความร้อนจากการเผาไหม้ไปสู่ น้ำได้ทันจนห้องเผาไหม้ร้อนจัดและระเบิดเสียหายในที่สุด

3. ปัญหาที่เกิดจากสิ่งแปลกปลอมในน้ำ

นอกเหนือจากตะกรันแล้วสิ่งที่ก่อปัญหาให้กับระบบหมวนเวียนน้ำยังมีอีกหลายอย่าง เช่น ผงธุลี ฝุ่นละออง เศษดิน ตะไคร่น้ำ ฯลฯ การจับตัวของสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ดังกล่าวจะขัดขวางทางไหลของน้ำ (โดยเฉพาะบริเวณทางแคบ) รบกวนต่อการถ่ายเทความร้อนและทำลายผิวโลหะที่ใช้ถ่ายเทความร้อน ผลเสียที่เกิดขึ้นคือทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมวนเวียนน้ำลดลง

4. ปัญหาเรื่องน้ำปะทุและน้ำเป็นฟอง ในหม้อไอน้ำ

น้ำปะทุ (Priming) ในหม้อไอน้ำหมายถึงลักษณะการเดือดอย่างรุนแรงและผิดปกติของน้ำในหม้อไอน้ำ ที่ทำให้ระดับน้ำมีความแปรปรวนเป็นอย่างมาก เป็นเหตุให้การควบคุมหม้อไอน้ำเป็นไปได้ยาก และยังเป็นสาเหตุให้น้ำกระเด็นเป็นฟอย และหลุดไปปะปนกับไอน้ำ ทำให้เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไอน้ำลดลง

น้ำเป็นฟอง (Foaming) หมายถึงลักษณะการเกิดฟองขนาดเล็กมากมายขึ้นบนผิวน้ำคล้ายกับฟองผงซักฟอกในอ่างซักผ้า ปัญหานี้เกิดรุนแรงน้อยกว่าน้ำปะทุแต่ก็ก่อความยุ่งยากในลักษณะเดียวกัน คือทำให้ไอน้ำสกปรก เนื่องจากฟองที่เกิดขึ้นอาจหลุดลอยขึ้นไปปนกับไอน้ำ

สาเหตุทำให้ไอน้ำสกปรกเนื่องจากน้ำปะทุและน้ำเป็นฟองคือ หม้อไอน้ำมีสิ่งสกปรก เช่น น้ำมันหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ หรือหม้อไอน้ำมีแร่ธาตุละลายน้ำมันมากเกินไป อาจเนื่องมาจากการระบายน้ำทิ้ง (Blow down) ไม่เพียงพอ

5. ปัญหาเรื่องแครีโอเวอร์ในหม้อไอน้ำ

แครีโอเวอร์ เป็นการทำให้ไอน้ำมีมลทินด้วยสารที่อยู่ในน้ำ เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในหม้อไอน้ำได้ เนื่องจากมีการสัมผัสโดยตรงระหว่างละอองน้ำเดือดกับไอน้ำหรือไอระเหยของสารกับไอน้ำ (กรณีหลังนี้เกิดขึ้นเฉพาะกับหม้อไอน้ำที่มีความดันสูงกว่า 600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เท่านั้น) ด้วยเหตุนี้จึงอาจจำแนกแครีโอเวอร์ออกเป็นสองประเภทคือ แครีโอเวอร์ที่เกิดจากละอองน้ำ (Mechanical Carryover) ซึ่งแครีโอเวอร์ประเภทนี้เกิดขึ้นจาก มีการสัมผัสกันระหว่างละอองน้ำที่กระเด็นขึ้นมาจากผิวน้ำเดือดกับไอน้ำทำให้ละอองน้ำติดไปกับไอน้ำเข้าไปในท่อและควบแน่น ผลเสียเกิดขึ้นเนื่องจากละอองน้ำมีสารมลทินต่างๆละลายอยู่

อีกประเภทคือแครีโอเวอร์ที่เกิดจากไอระเหยของสาร (Volatile Carryover) ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะกับหม้อไอน้ำที่มีความดันสูงกว่า 600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าหม้อไอน้ำดังกล่าวทำงานที่อุณหภูมิสูงมากจนเพียงพอที่จะทำให้สารในน้ำเกิดการระเหยกลายเป็นก๊าซ สารที่เป็นปัญหาอย่างมากได้แก่ ซิลิกา

อิทธิพลของสนามแม่เหล็กในการบำบัดน้ำ

จากการศึกษาพบว่า สนามแม่เหล็กสามารถลดความกระด้าง ความเป็นกรด-เบสของน้ำ รวมทั้งสามารถลดระดับของ O_2 ทำให้ลดการกัดกร่อนได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีควอนตัม และ โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอม เนื่องจากน้ำที่มีความกระด้างส่วนใหญ่เกิดจากธาตุกลุ่ม IIA ซึ่งได้แก่พวก Alkaline Earth Metal ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะที่มีประจุ +2 เช่น Ca^{2+} Mg^{2+} Sr^{2+} Fe^{2+} Mn^{2+} และประจุอานลบบางชนิด เช่น Cl^- SO_4^{2-} NO_3^- SiO_3^{2-} ทำให้น้ำเกิดความกระด้างขึ้น

การพิจารณารายละเอียดกลศาสตร์ควอนตัม ต้องพิจารณาจากเลขควอนตัมและการจัดอิเล็กตรอนในออร์บิทัล

เลขควอนตัม เป็นตัวเลขแสดงการกระจายในออร์บิทัลอะตอม และอิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัลนั้นๆ รวมทั้งระบุพฤติกรรมของอิเล็กตรอน ซึ่งเลขควอนตัมมี 4 ชนิด คือ เลขควอนตัมหลัก (n) เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม (l) เลขควอนตัมแม่เหล็ก (m_l) เลขควอนตัมสปิน (m_s)

การจัดอิเล็กตรอนในออร์บิทัลอะตอม สามารถแสดงในรูปของเลขควอนตัมทั้ง 4 ชนิด ซึ่งจะระบุได้ว่าอิเล็กตรอนแต่ละอิเล็กตรอนอยู่ในออร์บิทัลใดในอะตอม ส่วนค่าของ m_s ไม่มีผลต่อพลังงาน ขนาด รูปร่าง หรือแนวหลักของอิเล็กตรอน แต่มีบทบาทในการกำหนดว่าอิเล็กตรอนจัดตัวอย่างใดในออร์บิทัลหนึ่งๆ ซึ่งนิยมเขียนสัญลักษณ์ง่ายๆ เป็น (n, l, m_l, m_s) แทน เช่น เลขควอนตัมของอิเล็กตรอน คือ ($2, 0, 0, +1/2$) หรือ ($2, 0, 0, -1/2$)

จากสมบัติไดอะแมกเนติกและพาราแมกเนติก และหลักการกีดกันของเพาลีนับเป็นพื้นฐานของกลศาสตร์ควอนตัมและสามารถทดสอบได้โดยง่าย ถ้าสองอิเล็กตรอนใน 1S ออร์บิทัลของฮีเลียมอะตอม มีสปินเหมือนกันหรือขนานกัน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเสริมกัน การจัดเรียงในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ฮีเลียมอะตอมเป็นพาราแมกเนติก (paramagnetic) ซึ่งเป็นสารที่แม่เหล็กดูด แต่ถ้าสปินของอิเล็กตรอนเข้าคู่กันหรือสวนทิศทางการเคลื่อนที่ ผลในเชิงแม่เหล็กจะหักล้างกันและอะตอม n เป็นไดอะแมกเนติก (diamagnetic) ซึ่งจากคุณสมบัติของพาราแมกเนติก และอะตอมหรือโมเลกุลจึงสามารถอธิบายได้ว่า เพราะเหตุใดสนามแม่เหล็กจึงสามารถลดไอออนต่างๆ ที่ทำให้เกิดน้ำกระด้างได้

มลทินในน้ำ

ในปัจจุบันพบว่าสาเหตุของการเกิดตะกอน คือ การเปลี่ยนรูปของสารละลายซึ่งเกิดในการละลายอิมัลชัน โดยปัจจัยหลักในการเกิดสารละลายอิมัลชัน คือ ความเข้มข้น อุณหภูมิ ค่า pH โดยการศึกษพบว่าสนามแม่เหล็กสามารถเปลี่ยนขนาดอนุภาค และชนิดของผลึกได้ ซึ่งการป้องกันตะกอนสามารถทำได้โดยควบคุมลักษณะการละลาย nucleation ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถทำได้โดยวิธีการทางเคมี และฟิสิกส์

Aragonite เป็น meta-stable crystalline ซึ่งเปลี่ยนรูปมาจาก CaCO_3 โดยมี half – life ประมาณ 24 ชั่วโมง เมื่อ ค่า pH > 9 จะเกิดการเปลี่ยนรูปผลึกอย่างรวดเร็ว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ในหม้อไอน้ำจะมีความดันมากกว่า 200 psi อุณหภูมิมากกว่า 382°F ซึ่งไม่สามารถใช้ สนามแม่เหล็กได้เพราะจะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปภายใต้สภาวะนี้ สำหรับ CaSO_4 จะมีรูปร่างผลึก คล้าย CaSO_3 โดยสนามแม่เหล็กจะเพิ่มความสามารถในการละลายของแร่ธาตุต่างๆ โดยเฉพาะพวก ฟอสเฟตเมื่อมีเหล็กอยู่ด้วยจะเข้าขัดขวางการเกิดผลึกของ calcite และการเปลี่ยนรูปของ aragonite

การบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็กที่ดีต้องปราศจากสารเคมีในขั้นตอนต่างๆ การบำบัดน้ำ ด้วยสนามแม่เหล็กสามารถใช้ในระบบของหอผึ่งลมเย็นและหม้อไอน้ำได้ ในการออกแบบขั้นแรก ผู้ออกแบบจะคำนึงถึงสิ่งต่างๆ เหล่านี้

1. Water system flow schematic
2. การวิเคราะห์แหล่งน้ำที่นำมาใช้
 - 2.1 ปริมาณ CaCO_3 (ppm)
 - 2.2 ค่า pH
 - 2.3 ปริมาณเหล็ก
 - 2.4 ปริมาณ silica
 - 2.5 TDS
3. ออกแบบให้การไหลเป็นระบบ Recirculation หรือ Straight – through และหา อัตราการไหลสูงสุด
4. ในระบบหล่อเย็น
 - 4.1 ปริมาณน้ำในระบบ
 - 4.2 อัตราของ circulating ของน้ำในระบบ
 - 4.3 อัตราของน้ำหล่อเย็น
 - 4.4 ระบบอยู่ในสภาวะแบบ existing algae หรือ micro – organism
5. ในระบบของ Boiler
 - 5.1 ปริมาณมากที่สุดของ boiler feed water
 - 5.2 ความดันมากที่สุดขณะทำงาน
 - 5.3 อัตรากำลัง
 - 5.4 เป็นแบบ fire – tube หรือ water – tube boiler

การใช้สนามแม่เหล็กต้องออกแบบให้การไหลผ่านใช้เวลาที่ดีที่สุด และปั่นป่วนมากที่สุดและจะต้องทำให้น้ำรับอิทธิพลสนามแม่เหล็กมากที่สุด ระบบหล่อเย็นมีแบบ re – circulating หรือ straight – through โดยแบบ straight – through 100% ของอัตราการไหลจะได้รับการบำบัดแต่แบบ re – circulating น้ำจะมีโอกาสรับอิทธิพลสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจึงแนะนำให้ใช้แบบนี้ เพราะมีความประหยัดกว่า โดยอุปกรณ์ใน boiler สามารถใช้ได้ทั้ง 2 ระบบ The American Manufacture Association กล่าวว่า การบำบัดน้ำต้องปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 8-11 แต่การใช้สนามแม่เหล็กจะทำการปรับค่า pH ให้โดยอัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้จึงใช้สนามแม่เหล็กมาบำบัดใน boiler

ตารางที่ 3 แสดงสภาพน้ำโดย mg/L ในรูป CaCO_3

mg/L ในรูป CaCO_3	สภาพน้ำ
0 - 50	น้ำอ่อน
80 - 100	ค่อนข้างอ่อน
100 - 150	กระด้างเล็กน้อย
150 - 250	ค่อนข้างกระด้าง
250 - 350	กระด้าง
มากกว่า 350	กระด้างมาก

ที่มา : การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ (2540)

มาตรฐานของน้ำในอุตสาหกรรม

1. น้ำหล่อเย็น

ความกระด้างทั้งหมด	ไม่มากกว่า	50	mg/L	ในรูป CaCO_3
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	น้อยกว่า	5	mg/L	
เหล็ก	น้อยกว่า	0.5	mg/L	
แมงกานีส	น้อยกว่า	0.5	mg/L	

2. น้ำเลี้ยงให้หม้อไอน้ำตามมาตรฐาน ASME

ตารางที่ 4 แสดงมาตรฐานน้ำเลี้ยงใน Boiler

แรงดันในครัม	เหล็ก	ทองแดง	ความกระด้างทั้งหมด
(psig)	(ppm Fe)	(ppm Cu)	(ppm CaCO ₃)
0 - 300	0.100	0.050	0.300
301 - 450	0.050	0.025	0.300
451 - 600	0.030	0.020	0.200
601 - 750	0.025	0.020	0.200
751 - 900	0.020	0.015	0.100
901 - 1000	0.020	0.015	0.050
1001 - 1500	0.010	0.010	0
1501 - 2000	0.010	0.010	0

ที่มา : การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ (2540)

ลักษณะการไหล

การไหลของของไหลจริงซับซ้อนยุ่งยาก เนื่องจากมีความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้อง ความหนืดก่อให้เกิดแรงต่อการเคลื่อนที่ในรูปของแรงเฉือนหรือแรงเนื่องจากความฝืด อันเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคของของไหลและระหว่างของไหลกับขอบเขต ในของไหลจริงการไหลจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแรงกระทำมีแรงไม่น้อยกว่าแรงต้านที่เกิดเนื่องจากความหนืด ในกรณีนี้พลังงานส่วนหนึ่งจะแปรสภาพเป็นความร้อน สมการการเคลื่อนที่ทั่วไปของของไหลจริงมีชื่อว่าสมการ Navier Stokes

เนื่องจากความหนืดทำให้เกิดสภาพการไหลขึ้นอีก 2 ชนิด คือ การไหลราบเรียบ(laminar flow) และการไหลปั่นป่วน (turbulent flow) ในการไหลราบเรียบอนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบเสมือนเป็นชั้น (layer) โดยที่ชั้นของของไหลจะเลื่อนไปบนชั้นของไหลที่ติดกันอย่างมีระเบียบ การเคลื่อนที่แบบราบเรียบนี้ ความเค้นเฉือน(shear stress)ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกฎความหนืดของนิวตัน ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วนของของไหล มักจะไม่ได้

เคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบเป็นชั้นเหมือนการไหลแบบราบเรียบ การเคลื่อนที่มักจะปนกัน โดยที่เลื่อนผ่านกันไปบ้าง ชนกันบ้าง อันทำให้เกิดการผสมของของไหลตลอดการไหล ดังนั้นความเร็วชั่วขณะที่จุดใดๆ ในการไหลแบบปั่นป่วนจึงขึ้นๆลงๆไม่แน่นอน การแบ่งสภาพการไหลนี้ทำได้โดยพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold's Number) ความหนืดในของไหลจริงก่อให้เกิดสภาพการไหลขึ้น ซึ่งลักษณะเฉพาะของการไหลนี้ Osborne Reynold ได้สาธิตขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1883 ได้แบ่งชนิดของการไหลจากการสังเกต เส้นสีที่ปรากฏแสดงถึงแนวการไหลได้ 3 ชนิด คือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) การไหลเปลี่ยนแปลง (transition flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)

Osborne Reynolds ได้ศึกษาและตรวจวัดจากการทดลองปล่อยสีผ่านท่อกลมใสที่มองเห็นเส้นสีชัดเจน ซึ่งเมื่อกำหนดให้ท่อกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ D แล้ว วัดอัตราการไหลที่ปลายท่อได้ Q จะสามารถคำนวณความเร็วเฉลี่ย V ได้จากสมการการไหลต่อเนื่องคือ

$$V = Q/A \quad (1)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหลมีค่าเท่ากับ $\pi D^2/4$ และเมื่อรู้ความหนืดจลน์ของของไหล สามารถหาอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืดของการไหลในท่อได้จาก

$$\text{Reynold Number (Re)} = \rho V D / \mu \quad (2)$$

จากการทดลองพบว่า สามารถแบ่งชนิดของการไหลในท่อกลมได้ตามตัวเลขเรย์โนลด์

ตารางที่ 5 ชนิดการไหลในท่อกลม

ชนิดของการไหลในท่อกลม	Reynold Number (Re)
การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)	$Re \leq 2000$
การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (transition flow)	$2000 < Re < 4000$
การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)	$Re \geq 4000$

ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์วิกฤต

ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์วิกฤต (N_R) ตัวค่ามากนั้นมีค่าไม่แน่นอน แต่จะมีค่าเป็นเท่าไรนั้นก็ขึ้นกับความระมัดระวังในการป้องกันสิ่งที่จะมากระทบการไหล ปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 4,000 แต่ก็มีผู้ที่สามารถทำค่า N_R นี้ได้สูงถึง 50,000 อย่างไรก็ตามการไหลแบบ steady flow ในสภาพดังกล่าวนี้เป็นการไหลที่ขาดเสถียรภาพ นั่นก็คือถ้ามีอะไรมากระทบการไหลเพียงเล็กน้อยมันก็จะเปลี่ยนลักษณะการไหลเป็นเทอร์บิวเลนต์ทันที ในทางตรงกันข้ามทางด้านปฏิบัติก็ไม่สามารถที่จะทำให้การไหลในท่อตรงมีการไหลเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์โดยที่มีค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ำกว่า 2,000 มากๆ ดังนั้นค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์วิกฤตตัวค่าน้อยจึงมีความแน่นอนกว่า และเป็นจุดที่สามารถแบ่งการไหลทั้งสองลักษณะออกจากกันได้จริงๆ เรย์โนลด์์นัมเบอร์วิกฤตตัวค่าน้อยนี้จะถูกเรียกว่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์วิกฤตค่าจริง อย่างไรก็ตามเรย์โนลด์์นัมเบอร์ตัวค่าน้อยนี้จะแปรค่าได้บ้างนั่นคือจะมีค่ามากขึ้นเมื่อไหลในท่อที่เร็วเล็กน้อยลงและเมื่อไหลในท่อที่เร็วใหญ่ขึ้น และถ้าหากไหลในท่อโค้งก็จะให้ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ำกว่าเมื่อไหลในท่อตรง แต่ถึงแม้ว่าจะเป็นการไหลในท่อตรงที่มีขนาดสม่ำเสมอก็ตาม แต่ถ้าหากผิวท่อมืดหรือหยาบจนเกินไปแล้วค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ก็อาจจะลดลงจนถึง 1,000 อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้ว การไหลในท่อตรงที่มีขนาดสม่ำเสมอและผิวของท่อไม่หยาบจนผิดปกติแล้วเรย์โนลด์์นัมเบอร์ก็จะมีค่าเท่ากับ 2,000

สมการของพลังงาน

สมการของพลังงาน (Energy Equation) ในการไหลของของไหลจริงผ่านพื้นที่หน้าตัดคงรูป ผลเนื่องจากความหนืดพลังงานส่วนหนึ่งของการไหลของของไหลจริงจะสูญเสียไป ดังนั้นการคำนวณพลังงานระหว่าง 2 จุด ของการไหลจึงต้องนำพลังงานส่วนนี้เข้ามาด้วย เพื่อให้เป็นไปตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน ดังนั้นสมการของเบอร์นูลี ในการไหลจริงจึงอาจเขียนได้ดังสมการที่ (3)

$$(P_1/\gamma) + \alpha_1(V_1^2/2g) + Z_1 = (P_2/\gamma) + \alpha_2(V_2^2/2g) + Z_2 + h_L \quad (3)$$

ซึ่งค่า h_L เรียกว่าพลังงานที่สูญเสีย (head losses) ซึ่งคำนวณได้จากสมการการไหล จะเห็นได้ว่าเนื่องจากการสูญเสียพลังงานระหว่าง 2 จุดของการไหล เส้นพลังงานที่มีอยู่ของการไหลจึงมีความลาดและในกรณีนี้จะเป็นเส้นซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงาน จึงเปลี่ยนมาเรียกเป็นเส้นความลาด

ของพลังงาน ซึ่งผลต่างระหว่างระดับของจุด 2 จุดในการไหลคือ ความสูงสมมูลของพลังงานที่สูญเสียระหว่าง 2 จุดนั้น

ระดับความปั่นป่วนของการไหล

ระดับความปั่นป่วนของการไหล (Turbulence Intensity) ถูกนิยามโดยสมการ

$$I \equiv \frac{u'}{U} \quad (4)$$

โดยที่ u' คือค่ารากที่สองเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงระดับความปั่นป่วน U คือค่าความเร็วเฉลี่ย (Reynolds averaged)

ค่า u' สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าพลังงานความปั่นป่วน (Turbulent Energy, k) เป็น

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (5)$$

ส่วน U สามารถคำนวณได้จากความเร็วในแนวแกนทั้งสาม คือ U_x , U_y และ U_z จากสมการ

$$U \equiv \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (6)$$

การประมาณค่าระดับความปั่นป่วน

เมื่อทำการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบสำหรับการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง CFD นั้นเราจำเป็นต้องทำการประมาณค่าระดับความปั่นป่วนบริเวณทางเข้า เพื่อความแม่นยำจำเป็นต้องมีอุปกรณ์การวัดค่าที่ดีหรือต้องมีข้อมูลจากการทดลองก่อนๆ ในการประมาณ ตัวอย่างในการประมาณค่าระดับความปั่นป่วนบริเวณทางเข้าที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ

1. High-turbulence case: การไหลด้วยความเร็วสูงภายในท่อรูปทรงซับซ้อน เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และการไหลในจักรกลที่มีการหมุน (เครื่องยนต์ใบพัดและเครื่องอัดอากาศ) โดยทั่วไปจะมีค่าระดับความปั่นป่วนอยู่ระหว่าง 5% และ 20%

2. Medium-turbulence case: การไหลในอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนไม่มาก เช่น ท่อขนาดใหญ่มาก, การไหลในระบบระบาย เป็นต้น หรือการไหลด้วยความเร็วต่ำ โดยทั่วไปมีค่าระดับความปั่นป่วนอยู่ระหว่าง 1% และ 5%

3. Low-turbulence case: การไหลที่เริ่มต้นจากของไหลที่อยู่นิ่ง เช่น การไหลข้ามตัวถังรถเรือดำน้ำ หรืออากาศยาน โดยทั่วไปมีค่าระดับความปั่นป่วนน้อยกว่า 1%

การไหลแบบพัฒนาเต็มท่อ

สำหรับการไหลแบบพัฒนาเต็มท่อนั้น สามารถคำนวณหาค่าระดับความปั่นป่วนที่บริเวณแกนของท่อได้โดยประมาณจากสมการ

$$I = 0.16 \operatorname{Re}_{d_h}^{-\frac{1}{8}} \quad (7)$$

โดยที่ Re_{d_h} คือค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ d_h

การไหลหมุนแบบบังคับ

เราสามารถทำให้ก้อนของเหลวหมุนตัวในลักษณะเดียวกับการหมุนของก้อนของแข็งได้ โดยไม่เกิดความเร็วสัมผัสในระหว่างอนุภาคของเหลวนั้นเลย อาจจะโดยการหมุนภาชนะที่บรรจุของเหลวนั้นหรือจะโดยการกวนของไหลที่อยู่ภาชนะนั้นก็ได้ ดังนั้นก็จะต้องมีแรงบิดมาให้แก่ของไหลนั้น ตัวอย่างของ Force Vortex ที่เห็นได้ง่ายๆนั้น ได้แก่การหมุนของของเหลวที่อยู่ในช่องว่างระหว่างครีบของใบพัดของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หรือการหมุนของแก๊สในเครื่องอัดลม

การไหลหมุนแบบอิสระ

ในกรณีของการไหลหมุนอิสระนั้น จะไม่ต้องใช้พลังงานใดๆ จากแหล่งภายนอกมาทำให้ของไหลกื่อนั้นหมุนเลย แต่ของไหลนั้นสามารถหมุนได้โดยอาศัยการหมุนตัวที่มีมาแต่ดั้งเดิม หรือจากพฤติกรรมภายในของกื่อนของไหลเอง ตัวอย่างของการไหลหมุนอย่างอิสระนั้นได้แก่น้ำวน (Whirl pool) ในแม่น้ำ การไหลหมุนแบบนี้มักจะเกิดขึ้นในภาชนะตื้นๆ เมื่อของไหลภายในภาชนะนั้นไหลออกจากรูที่ก้นภาชนะ นอกจากนี้ก็มีการไหลในเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เฉพาะส่วนที่ถุดออกมาจากใบพัด หรือการไหลภายในตัวกังหันในขณะที่น้ำจะไหลเข้าสู่ครีบน้ำทาง (guide vane)

สนามแม่เหล็กและกระแส

ถ้ากระแสไหลผ่านแท่งตัวนำ บริเวณรอบๆ แท่งตัวนำจะมีสภาพคล้ายบริเวณรอบๆ แม่เหล็กถาวร นั่นคือ จะมีแรงกระทำต่อแม่เหล็ก เหล็ก หรือแท่งตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านในบริเวณนั้น และถ้าขนาดของกระแสที่ไหลผ่านแท่งตัวนำเปลี่ยนไป จะก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนวงจร ซึ่งอยู่ใกล้เคียง

เนื่องจากมีแรงเกิดขึ้นบริเวณรอบๆ แท่งตัวนำซึ่งมีกระแสไหลผ่าน บริเวณเหล่านี้จึงเป็นสนามของแรง (force field) สนามของแรงจะเก็บสะสมพลังงานซึ่งก่อให้เกิดแรงและทำงานได้ สนามของแรงนี้เรียกว่า สนามแม่เหล็ก (magnetic field) และสำหรับเส้นแรงที่ใช้แทนสนามแม่เหล็กนี้เรียกว่า เส้นแรงฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux line)

เพื่อให้ทราบจำนวนที่แน่นอนของฟลักซ์แม่เหล็ก จะต้องกำหนดพื้นที่ที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่าน ปริมาณของฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลผ่านต่อหน่วยพื้นที่เรียกว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) สำหรับสนามแม่เหล็กที่มีค่าสม่ำเสมอ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (3)

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (8)$$

เมื่อ B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (wb/m^2 หรือ T)

Φ คือ ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมด (wb)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของสนามแม่เหล็ก (m^2)

หลักการของวงจรแม่เหล็ก

ความสามารถในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดซึ่งพันอยู่รอบวงแหวนทอรอยด์ หรือของวงจรแม่เหล็กอื่นๆ จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบที่พัน(N) และกระแส (I) ที่ไหลผ่านขดลวดนั้น ความสามารถนี้กำหนดโดย แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force: F) แรงเคลื่อนแม่เหล็กคือความต่างศักย์ทางแม่เหล็กซึ่งจะพยายามก่อให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก

$$F = NI \text{ แอมแปร์-รอบ} \quad (9)$$

ฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก นอกจากขึ้นกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กแล้ว ยังขึ้นกับความต้านทานต่อฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งนำมาทำวงจรแม่เหล็กด้วย ความต้านทานต่อฟลักซ์แม่เหล็กเหล่านี้เรียกว่า ความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance: R) และมีความสัมพันธ์

$$\Phi = \frac{F}{R} \text{ เวเบอร์} \quad (10)$$

ความต้านทานแม่เหล็กขึ้นกับความยาวพื้นที่หน้าตัด และสารซึ่งนำมาทำวงจรแม่เหล็กดังสมการ

$$R = \frac{l}{\mu A} \text{ แอมแปร์-รอบ/เวเบอร์} \quad (11)$$

เมื่อ μ คือ ความซึมซับได้ (permeability) ซึ่งเป็นตัวกำหนดว่า สารหนึ่งจะยอมให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านได้ง่ายหรือยากเพียงไร สำหรับอากาศมีค่าความซึมซับได้ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ เวเบอร์/แอมแปร์-รอบ-เมตร สารแม่เหล็กจะมีค่าความซึมซับได้มากกว่าอากาศ 600 – 2,000 เท่า

เส้นทางการเกิดอำนาจแม่เหล็ก

จากสมการ

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{F}{AR} = \frac{F}{A(l/\mu A)} = \frac{\mu F}{l} = \mu H \quad (12)$$

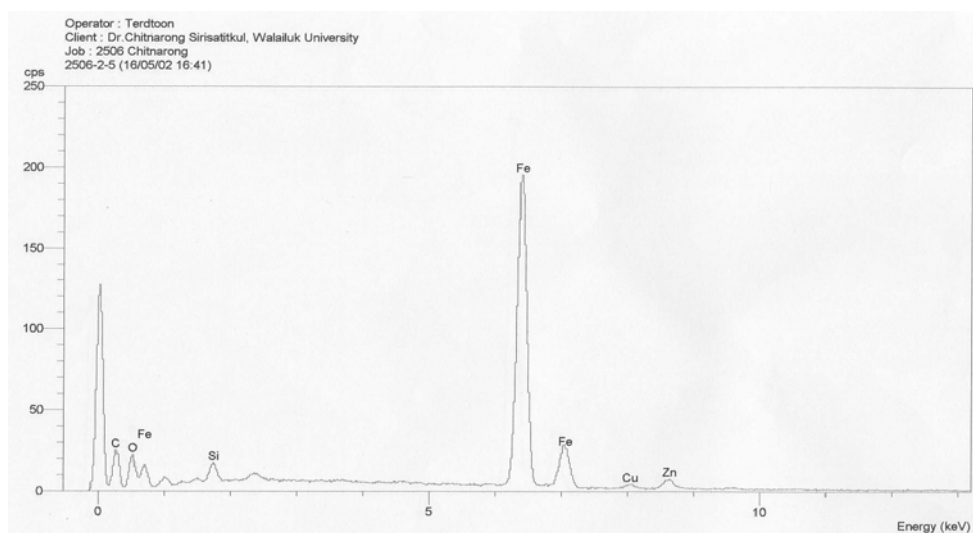
ปริมาณ H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) หรือแรงสร้างอำนาจแม่เหล็ก (magnetizing force) ซึ่งก็คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็ก จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กในรูปของความซึมซาบได้ คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กหาจากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กที่เรียกว่า เส้นโค้ง B-H (B-H curve) หรือเส้นโค้งการเกิดอำนาจแม่เหล็ก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติและคณะ (2545) ได้ทำการทดลองโดยนำทองแดงมาพันโดยรอบ ท่อเหล็ก บริเวณที่จะสร้างสนามแม่เหล็ก และต่อกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบ เพื่อเป็นการสร้างสนามแม่เหล็กแบบชั่วคราวให้แก่วัสดุ และได้ทำการทดลองที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ตามสมการที่ (8) โดยที่ในระบบนี้มีการไหลเวียนของน้ำอยู่ตลอดเวลา จากนั้นนำน้ำที่ไหลเวียนในระบบ ในช่วงเวลาต่างๆ มาตรวจสอบ ค่า pH และความกระด้าง พบว่าน้ำจะอยู่ในสภาพที่เหมาะสมมากขึ้น เมื่อใช้เวลาในการไหลเวียนน้ำผ่านระบบมากขึ้น โดยน้ำที่ผ่านสนามแม่เหล็กประมาณ 30 นาที จะมีปริมาณ Fe ลดลงถึง 50% ในขณะที่ค่า pH สูงขึ้น 10% ซึ่งเป็นผลดีต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในอุตสาหกรรม โดยสรุปคือ ความเข้มสนามแม่เหล็กและเวลาที่ใช้ในการไหลเวียนน้ำในระบบ มีผลทำให้น้ำมีสภาพที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

ไพโรจน์และคณะ (2546) ได้ทำการทดลองในท่อส่งน้ำระบบปิดซึ่งทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 5 เมตรและมีการติดตั้งระบบที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กถาวร ปริมาณน้ำขนาด 0.5 กำลังม้าถูกนำมาใช้ทำให้น้ำในระบบมีอัตราการไหล 554 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ตะกอนซึ่งทำจากลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างกันได้ถูกนำมาติดตั้งเพื่อทำให้น้ำมีระดับความปั่นป่วนที่แตกต่างกัน จากผลการศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ความเข้ม 150 mT โดยใช้เวลาในการหมุนเวียนน้ำในระบบ 90 นาที พบว่าปริมาณไอออนเหล็กลดลง 45 % ขณะที่ค่า pH สูงขึ้น 10 % และความกระด้างลดลง 3.33 %

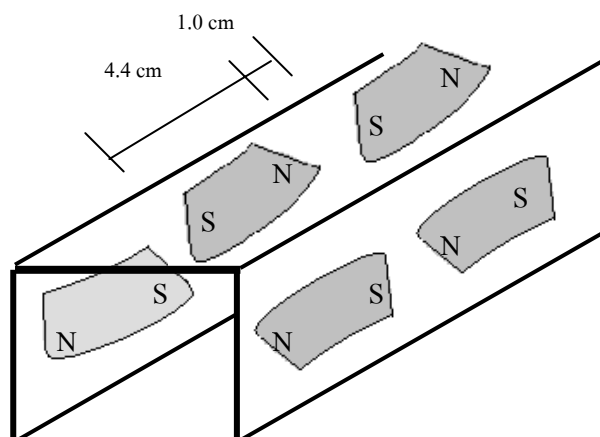
ชิตณรงค์และคณะ (2545) ได้ทำการทดลองผลของสนามแม่เหล็กในการจับตะกอนภายในท่อ นำจากการใช้แม่เหล็กถาวรติดให้มีค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดประมาณ 1,000 เกาส์บริเวณที่ขอบท่อ ผลวิเคราะห์ EDS (ดังแสดงในภาพที่ 4) ทำให้ทราบว่า ตะกอนประกอบด้วยธาตุหลักเป็นส่วนใหญ่ และพบคาร์บอน, ออกซิเจน, ซิลิกอน, สังกะสี และทองแดง เป็นองค์ประกอบร่วมด้วย



ภาพที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ EDS แสดงองค์ประกอบของตะกอนที่สะสมเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

ที่มา: ชิตณรงค์ (2545)

นอกจากนั้นชิตณรงค์และคณะ (2545) ยังได้ทำการทดลองติดแม่เหล็กถาวร เข้ากับทั้งสามด้านของชิ้นพลาสติก เพื่อหารูปแบบการเรียงตัวที่ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าโดยเฉลี่ยสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งพบว่าการติดแม่เหล็กแบบตามยาว ให้ขอบแม่เหล็กแต่ละชิ้นห่างกันประมาณ 1 cm และจัดให้ขั้วตรงข้ามอยู่ใกล้กัน จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในพลาสติกได้สูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงแนวการติดแม่เหล็กบนพลาสติก

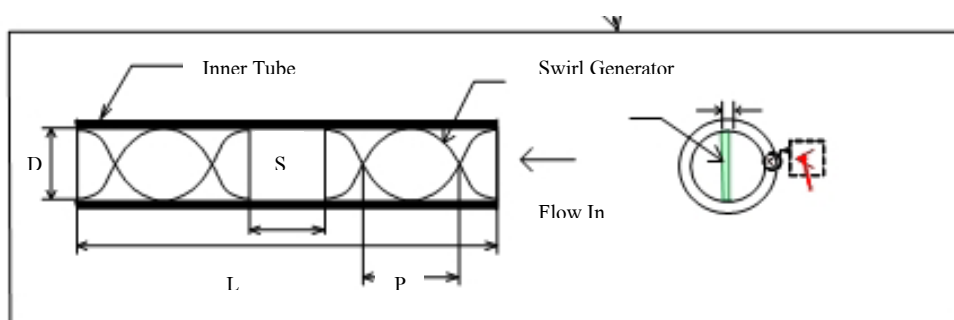
ที่มา: ชิตณรงค์ (2545)

ตารางที่ 6 แสดงสนามแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง XY โดยทำการวัดที่ค่า Z ต่างๆ

X	Y	สนามแม่เหล็ก (เกาส์)									
		Z=0	Z=1	Z=2	Z=3	Z=4	Z=5	Z=6	Z=7	Z=8	Z=9
0	0	-22	-86	144	188	12	-208	-76	-66	212	276
0	1.95	-621	214	883	551	-416	-504	-299	487	517	126
0.9	0.975	-32	-501	417	500	127	-336	-149	-81	349	881
0.9	-0.975	31	70	-159	-218	27	158	139	-183	-213	-91
1.8	1.95	-499	1310	566	1303	336	-123	-1090	-1090	1493	761
1.8	0	-245	-45	82	124	102	-79	-162	43	53	111
1.8	-1.95	336	87	-162	-323	-128	550	263	23	-328	-235
-0.9	0.975	-8	-364	344	735	676	-76	-628	-481	305	461
-0.9	-0.975	12	80	-61	-325	-57	149	237	-52	262	-208

วิชาญและคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนสองชั้นที่มีการไหลสวนทางกัน โดยการติดตั้งแผ่นปิดตลอดความยาวท่อที่ใช้ทดสอบ ซึ่งเป็นชุดสร้างการไหลหมุนวนแบบต่อเนื่อง โดยแผ่นปิดนี้ทำมาจากแผ่นเหล็กบาง 0.8

มิลลิเมตร และนำมาบิดในมุม 180 องศาต่อหนึ่งระยะบิด ซึ่งมีทั้งหมดสองช่วงคือ $y = 6.0$ และ 8.0 ตามลำดับ เพื่อสร้างระดับความแตกต่างของการไหลวนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้ วิชาญและคณะ (2545) ยังได้ทำการปรับระยะช่องระหว่างแผ่นบิดเพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยทำการปรับด้วยกัน 3 ค่า คือ $s = 1.0, 2.0$ และ 3.0 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าระยะช่วงบิดสั้นกว่าจะก่อให้เกิดการหมุนวนที่แรงกว่าและการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น



ภาพที่ 6 แสดงการสอดใส่แผ่นบิดในท่อทดสอบ

ที่มา: วิชาญ (2545)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ระบบหมุนเวียนน้ำ
2. ชุดสนามแม่เหล็กปรับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กได้
3. แผ่นปิด
4. ชุดทดสอบค่าความกระด้างของน้ำ
5. ชุดทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ

วิธีการ

1. การสร้างระบบหมุนเวียนน้ำ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบหมุนเวียนน้ำแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบหมุนเวียนน้ำ

อุปกรณ์	จำนวน
ขี้ออง 90 องศา	5
ข้อตรง	5
ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว (ยาว 5 เมตร)	1
ปั้มน้ำขนาด 0.5 hp.	1
ถังเก็บน้ำความจุ 50 ลิตร	1
ข้อต่อสามทาง	1
วาล์วชนิดหัวปิด	2
ท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว (ยาว 0.5 เมตร)	1

ระบบหมุนเวียนน้ำ ประกอบด้วยถังเก็บน้ำขนาด 50 ลิตร ซึ่งได้ทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ที่ระยะสูงจากพื้น 25 เซนติเมตร เนื่องจากได้ออกแบบให้ถังเก็บน้ำตั้งอยู่บนพื้น จึง

ต้องทำการเจาะรูที่ถังเก็บน้ำ แล้วทำการเดินท่อส่งน้ำจากถังเก็บน้ำไปสู่ปั้มน้ำ โดยน้ำในถังเก็บน้ำนั้นจะต้องมีปริมาณสูงกว่ารูที่ได้เจาะไว้ เพื่อเป็นการลดภาระการทำงานของปั้มน้ำ

เนื่องจากระบบจะต้องมีการหมุนเวียนน้ำในระบบตลอดเวลา ดังนั้นจึงใช้ปั้มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า ทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำในระบบโดยมีปริมาตรการไหล (Volume flow rate; Q) อยู่ที่ $5.5358 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$



ภาพที่ 7 แสดงระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในงานวิจัย

2. การสร้างชุดสนามแม่เหล็กปรับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กได้

แนวทางในการสร้างชุดสนามแม่เหล็กปรับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กได้ แบ่งออกได้เป็นสองแนวทาง คือการใช้วงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กชั่วคราว และการใช้แม่เหล็กถาวรหลายๆค่ามาสร้างสนามแม่เหล็ก

2.1 แม่เหล็กชั่วคราว (เหนี่ยวนำ)

หลักการในการสร้างสนามแม่เหล็กชั่วคราว คือการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านขดลวดนั้นจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r NI}{l} \quad (13)$$

การสร้างสนามแม่เหล็กชั่วคราวนั้น ต้องพิจารณาค่าตัวแปรที่มีผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก ในที่นี้คือ จำนวนรอบของขดลวดทองแดง (N), กระแส (I) และระยะห่างระหว่างขดลวดแรกกับขดลวดสุดท้าย (l) โดยหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ 5 แอมแปร์ จากนั้นคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 1 ซึ่งพบว่าได้ค่าจำนวนรอบของขดลวดทองแดงต่อความยาวของท่อที่มีการให้สนามแม่เหล็กชั่วคราว (N/l) คือ 200 รอบ/เมตร โดยที่ระยะห่างระหว่างขดลวดแรกและขดลวดสุดท้าย (l) คือ 0.15 เมตร จะได้จำนวนรอบของขดลวดทองแดง 30 รอบ (แสดงการคำนวณในภาคผนวก)

จากนั้นเปลี่ยนค่ากระแสเป็น 4, 3, 2 และ 1 แอมแปร์ตามลำดับ ได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กดังแสดงไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงค่าตัวแปรในการสร้างสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการคำนวณ

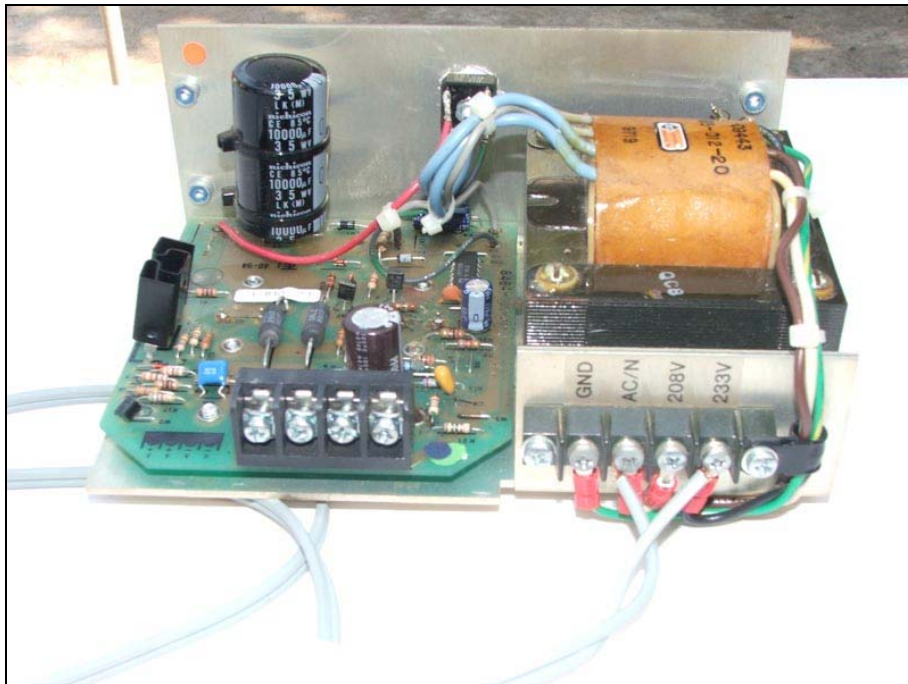
B (เวเบอร์/ตารางเมตร หรือ เทสลา)	N (รอบ)	l (เมตร)	I (แอมแปร์)
0.25	30	0.15	5.0
0.20	30	0.15	4.0
0.15	30	0.15	3.0
0.10	30	0.15	2.0
0.05	30	0.15	1.0

จากนั้นต่อวงจรเพื่อวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้จริง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กชั่วคราวแสดงไว้ดังตารางที่ 9

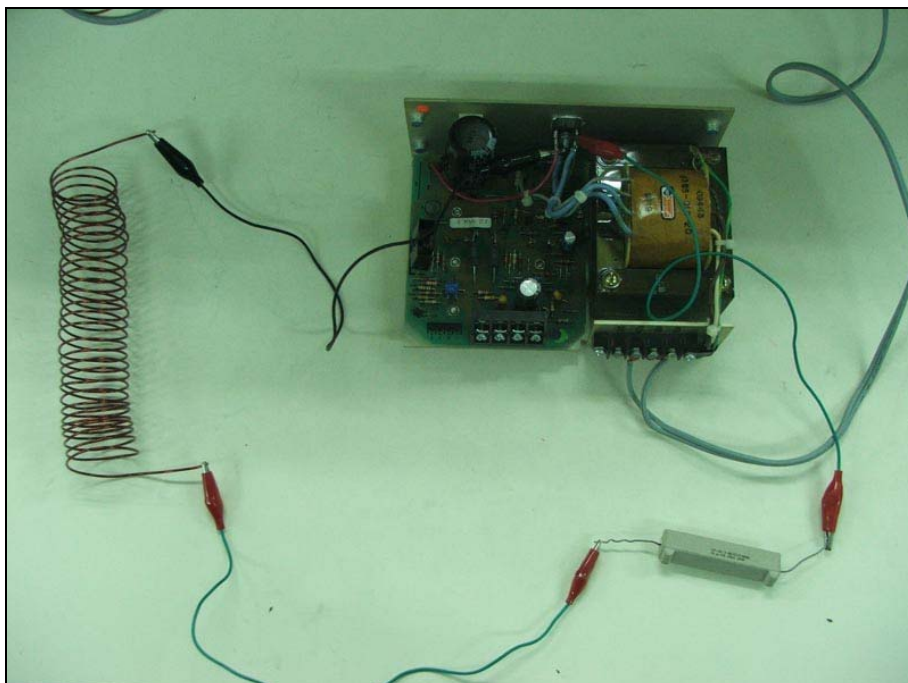
ตารางที่ 9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กชั่วคราว

อุปกรณ์	จำนวน
หม้อแปลงไฟฟ้า Output: 12V DC, 16V AC	1
สายไฟ (หัวหนีบ)	3
ขดลวดทองแดง	1
ตัวต้านทาน 2 Ω , 20 W	1
ตัวต้านทาน 3 Ω , 20 W	1
ตัวต้านทาน 5 Ω , 20 W	1
ตัวต้านทาน 10 Ω , 20 W	1
มัลติมิเตอร์	1
เทสลามิเตอร์	1

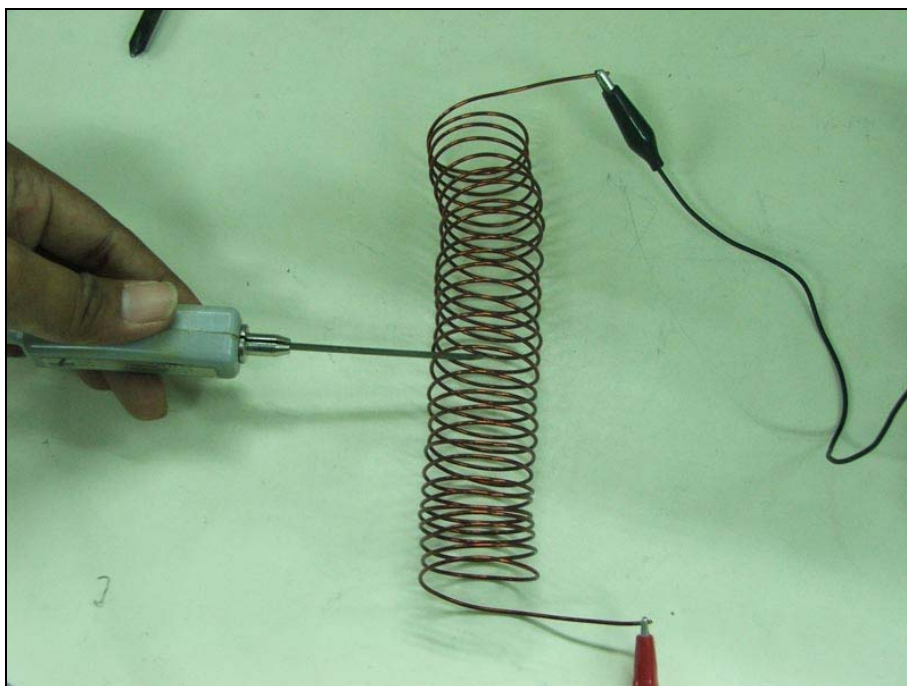
ภาพที่ 8 เป็นภาพหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กดังแสดงในภาพที่ 9 และวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยใช้เทสลามิเตอร์ อ่านค่าและบันทึกผล ดังแสดงในภาพที่ 10 และ 11 โดยผลจากวัดแสดงไว้ในตารางที่ 10



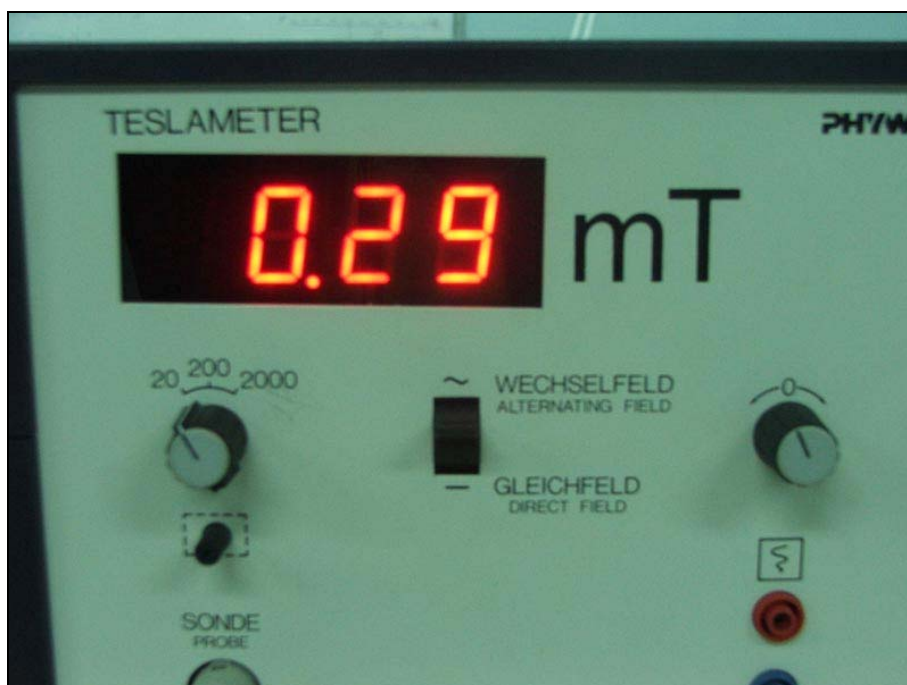
ภาพที่ 8 หม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 9 แสดงการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 10 แสดงการวัดค่าสนามแม่เหล็กชั่วคราว



ภาพที่ 11 การแสดงผลของเทสลามิเตอร์

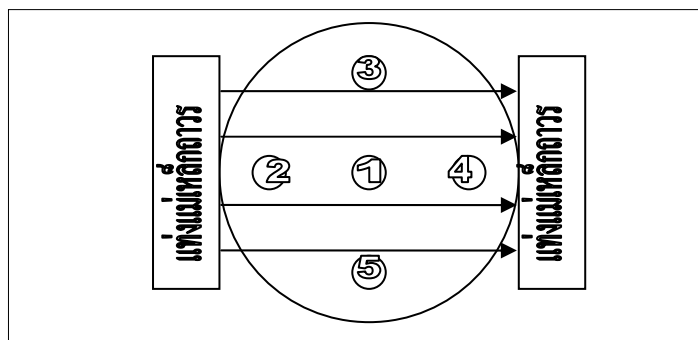
ตารางที่ 10 แสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากการทดลอง

I (แอมแปร์)	B (มิลลิเทสลา)
5.0	1.51
2.0	0.60
1.0	0.29

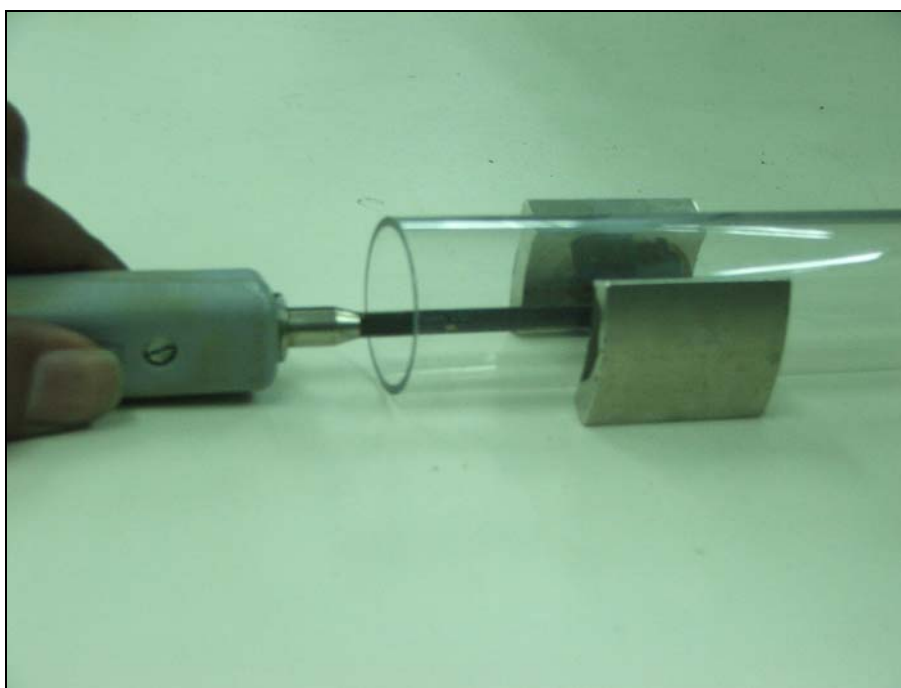
จากตารางที่ 10 สามารถนำไปคำนวณหาค่า μ_r ที่แท้จริงได้ (แสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก) ซึ่งได้ค่า $\mu_r = 1.2$ นั้นหมายความว่า การเหนี่ยวนำให้เกิดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 0.25 เทสลา จำเป็นต้องพันขดลวดทองแดงซ้อนกันเป็นจำนวนรอบถึง 4974 รอบ ที่กระแส 5 แอมแปร์ หรือต้องให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มเติม ซึ่งอันตรายและทำให้เสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก ดังนั้นหากต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง ควรจะใช้แม่เหล็กถาวรแทน

2.2 แม่เหล็กถาวร

สนามแม่เหล็กถาวรมีให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูง มีทิศทางของสนามแม่เหล็กเหมือนกับขดลวดเหนี่ยวนำกระแสตรง ดังนั้นจึงเลือกใช้แม่เหล็กถาวรในการทดลอง เนื่องจากแม่เหล็กถาวรไม่ต้องมีการคำนวณค่าตัวแปรอื่นๆ จึงสามารถวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ส่งผ่านเข้าไปในท่ออะคริลิกจากเตสลามิเตอร์ได้เลย โดยทำการวัดทั้งหมด 5 ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 12 อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการใช้สนามแม่เหล็กถาวรคือ ไม่สามารถปรับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ ส่งผลให้ต้องใช้สนามแม่เหล็กหลายชุด โดยการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กถาวรได้แสดงไว้ดังภาพที่ 13 และ 14



ภาพที่ 12 แสดงตำแหน่งการวัดค่าสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 13 การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก



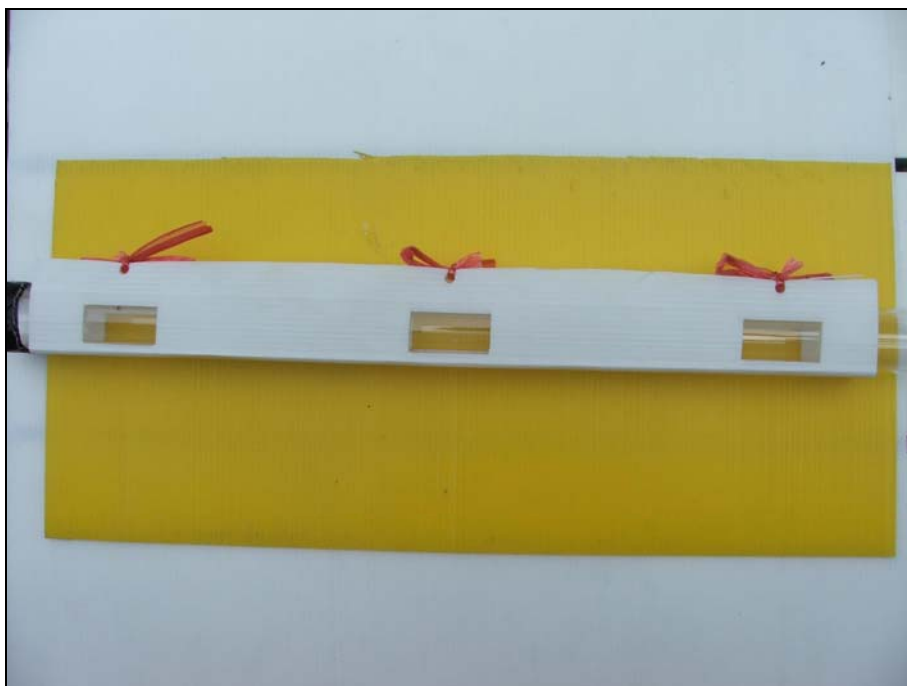
ภาพที่ 14 การแสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้

แต่อย่างไรก็ตามจากการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรทั้ง 4 ชุดแล้วพบว่ามีความห่างประมาณ 70 มิลลิเทสลา ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กแต่ละคู่ที่ตำแหน่งต่างๆ

สนามแม่เหล็กคู่ที่	ความเข้มของสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ (มิลลิเทสลา)					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
1	100	182	80	197	84	128.2
2	175	250	158	260	153	199.2
3	217	342	205	365	210	267.8
4	254	415	250	436	270	335.0

สำหรับการติดตั้งแม่เหล็กถาวรเข้าไปในระบบหมุนเวียนน้ำนั้น ในแต่ละค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจะใช้แม่เหล็กถาวร 3 คู่ ติดบนโครงพลาสติกที่เจาะช่องไว้เพื่อป้องกันการกระทบกันของแท่งแม่เหล็กจากการไถล ดังแสดงในภาพที่ 15 จากนั้นจึงนำไปติดตั้งบนท่ออะคริลิกและต่อเข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 15 โครงพลาสติกบนท่ออะคริลิก



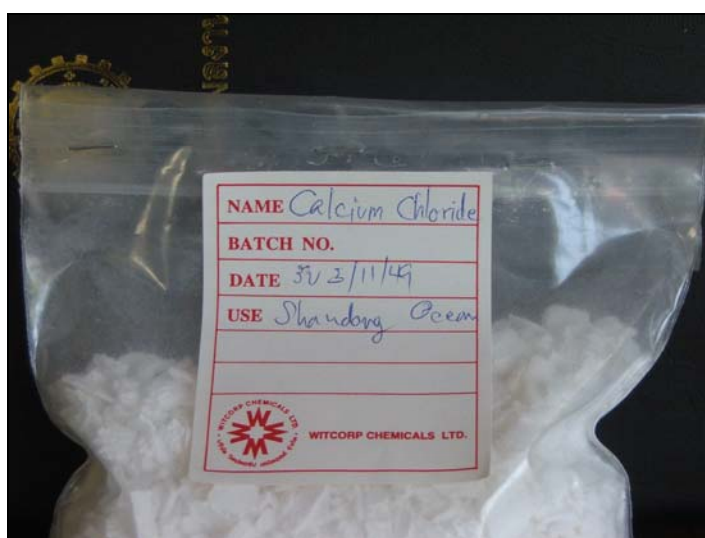
ภาพที่ 16 ชุดสนามแม่เหล็กที่ติดตั้งในระบบหมุนเวียนน้ำ

3. การทดลองเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำใช้ โดยปรับค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก

3.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความกระด้าง

การทดลองนี้เพื่อทดสอบว่าเมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบและปรับค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก แล้วมีผลอย่างไรต่อค่าความกระด้างของน้ำในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (โดยใช้สารแคลเซียมคลอไรด์ ดังแสดงในภาพที่ 17) และค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำชุดสนามแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มข้นแม่เหล็ก 128.2 มิลลิเทสลา ติดตั้งเข้าไปในระบบหมุนเวียนน้ำ
2. ละลายแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัม ในน้ำกลั่น 30 ลิตร ในถังเก็บน้ำขนาด 50 ลิตร
3. เก็บตัวอย่างน้ำ 120 มิลลิลิตร ไปทดสอบค่าความกระด้างและค่าความเป็นกรด-ด่าง ก่อนการบำบัด
4. เปิดปั๊มให้น้ำไหลเวียนในระบบผ่านสนามแม่เหล็กเป็นเวลา 60 นาที
5. เก็บตัวอย่างน้ำไปทดสอบค่าความกระด้างและค่าความเป็นกรด-ด่าง นำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล
6. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1-5 โดยปรับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กเป็น 199.2, 267.8 และ 335.0 มิลลิเทสลา ตามลำดับ



ภาพที่ 17 สารแคลเซียมคลอไรด์

3.2 ตะกรันสนิม (เหล็กออกไซด์)

การทดลองนี้เพื่อทดสอบว่าเมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบและปรับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก แล้วมีผลอย่างไรต่อปริมาณตะกรันสนิม (เหล็กออกไซด์) ในระบบหมุนเวียนน้ำ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำชุดสนามแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก 128.2 มิลลิเทสลา ติดตั้งเข้าไปในระบบหมุนเวียนน้ำ
2. ใส่ตะกรันสนิม 3 กรัม ในน้ำกลั่น 30 ลิตร ในถังเก็บน้ำขนาด 50 ลิตร
3. เปิดปั๊มให้น้ำไหลเวียนในระบบผ่านสนามแม่เหล็กเป็นเวลา 60 นาที
4. ถอดท่ออะคริลิกไปจุดและล้างตะกรันสนิม จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง Suction แล้วจึงนำตะกรันไปชั่ง เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล
5. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1-4 โดยปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น 199.2, 267.8 และ 335.0 มิลลิเทสลา ตามลำดับ



ภาพที่ 18 ตะกรันสนิม (เหล็กออกไซด์)

4. การทดลองเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำใช้ โดยปรับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กและความปั่นป่วนของการไหล

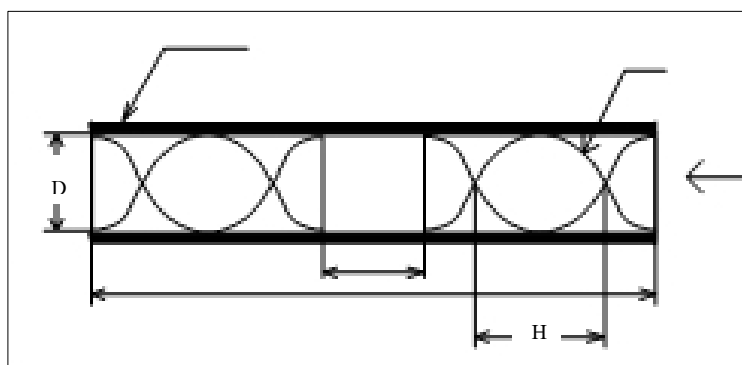
4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความกระด้าง

การทดลองนี้เพื่อทดสอบว่าเมื่อเพิ่มค่าความปั่นป่วนของการไหลเข้าไปเสริมกับความเข้มข้นแม่เหล็กแล้วมีผลให้ประสิทธิภาพในการปรับค่าความกระด้างของน้ำและค่าความเป็นกรด-ด่าง มีแนวโน้มเป็นไปอย่างไร โดยทำการติดตั้งแผ่นบิดที่มีลักษณะดังภาพที่ 19 เพื่อเพิ่มค่าความปั่นป่วน ซึ่งค่าระดับความปั่นป่วนนั้นจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างระยะที่แผ่นบิดหมุนครบ 180° (ระยะพิตช์) ต่อความกว้างของแผ่นบิด นั่นก็คือค่า y ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้จากสมการที่ (14) โดยหากค่า y ลดลง ค่าความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้น ในการทดลองจะใช้แผ่นบิดทั้งหมด 4 แผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นจะมีความหนาเท่ากันแต่มีค่า y แตกต่างกัน

$$y = H/D \quad (14)$$

โดยที่ H คือ ระยะที่แผ่นบิดหมุนครบ 180°

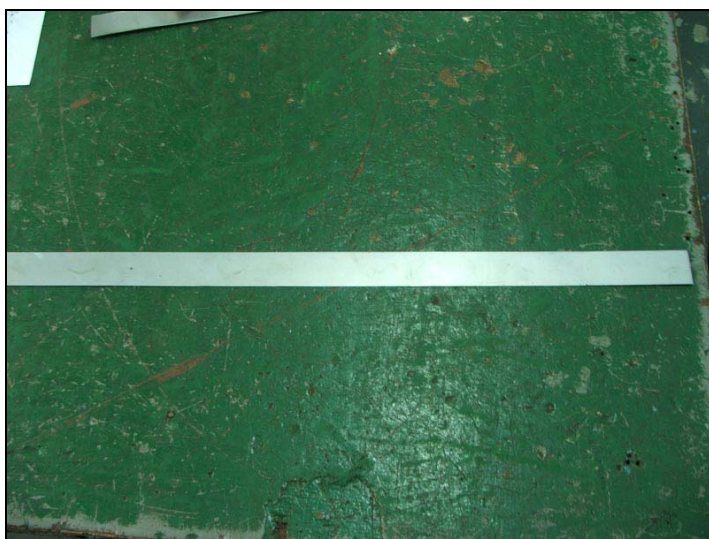
D คือ ความกว้างของแผ่นบิด



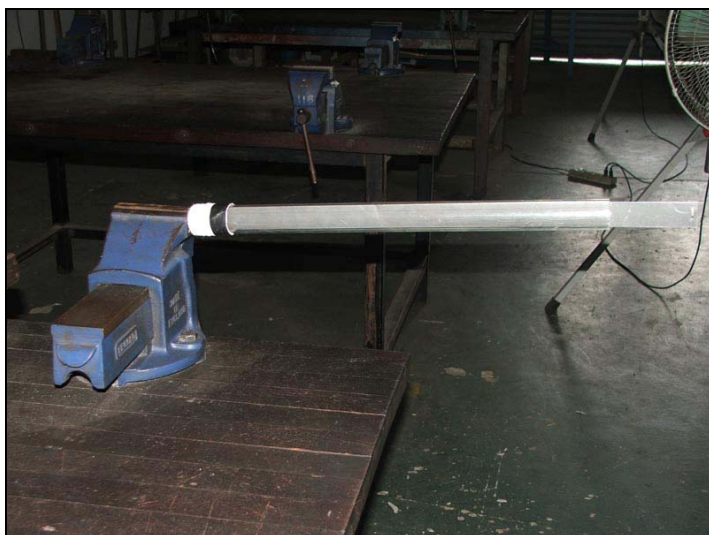
ภาพที่ 19 แสดงลักษณะของแผ่นบิด

สำหรับการทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1. นำชุดสนามแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก 128.2 มิลลิเทสลา ติดตั้งเข้าไปในระบบหมุนเวียนน้ำ
2. ละลายแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัม ในน้ำกลั่น 30 ลิตร ในถังเก็บน้ำขนาด 50 ลิตร



ภาพที่ 20 แผ่นเหล็กที่ใช้ทำแผ่นบิด



ภาพที่ 21 แสดงวิธีการทำแผ่นบิด

3. เก็บตัวอย่างน้ำ 120 มิลลิลิตร ไปทดสอบค่าความกระด้างและค่าความเป็นกรด-ด่าง ก่อนการบำบัด

4. สอดแผ่นบีดที่มีค่า $y = 4.0$ เข้าไปตลอดความยาวท่ออะคริลิก

5. เปิดปั๊มให้น้ำไหลเวียนในระบบผ่านสนามแม่เหล็กและแผ่นบีดเป็นเวลา 60 นาที

6. เก็บตัวอย่างน้ำไปทดสอบค่าความกระด้างและค่าความเป็นกรด-ด่าง นำไป

เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

7. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2-6 โดยสอดแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 6.0, 8.0 และ 10.0 เข้าไปในท่ออะคริลิก ตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 22) จากนั้นนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

8. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1-7 โดยปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น 199.2, 267.8 และ 335.0 มิลลิเทสลา ตามลำดับ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล



ภาพที่ 22 แผ่นบีดที่มีค่า y ต่างกัน

4.2 ตะกรันสนิม (เหล็กออกไซด์)

การทดลองนี้เพื่อทดสอบว่าเมื่อเพิ่มค่าความปั่นป่วนของการไหลเข้าไปเสริมกับความเข้มสนามแม่เหล็กแล้วมีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพในการลดปริมาณตะกรันสนิม มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. นำชุดสนามแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก 128.2 มิลลิเทสลา ติดตั้งเข้าไปในระบบหมุนเวียนน้ำ
2. ใส่ตะกั่วสนิมประมาณ 3 กรัม ในน้ำกลั่น 30 ลิตร ในถังเก็บน้ำขนาด 50 ลิตร
3. สอดแผ่นบีดที่มีค่า $y = 4.0$ เข้าไปตลอดความยาวท่ออะคริลิก
4. เปิดปั๊มให้น้ำไหลเวียนในระบบผ่านสนามแม่เหล็กและแผ่นบีดเป็นเวลา 60 นาที
5. ถอดท่ออะคริลิกไปชูดและล้างตะกั่วสนิม จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง Suction แล้วจึงนำตะกั่วสนิมไปชั่ง เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล
6. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2-6 โดยสอดแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 6.0, 8.0 และ 10.0 เข้าไปในท่ออะคริลิก ตามลำดับ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล
7. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1-7 โดยปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น 199.2, 267.8 และ 335.0 มิลลิเทสลา ตามลำดับ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล



ภาพที่ 23 แสดงลักษณะแผ่นบีดที่สอดในท่ออะคริลิก

5. การทดสอบน้ำที่ได้จากการทดลอง

สำหรับค่าที่จะทำการทดสอบจากน้ำที่ได้จากการทดลอง คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความกระด้าง (Hardness) ซึ่งก็คือปริมาณของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในน้ำ โดยค่าความ

เป็นกรด-ด่างนั้นทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-Meter) ส่วนความกระด้างทดสอบด้วยวิธีการไตเตรทแบบเกิดสารเชิงซ้อน (Complexometric Titration) และใช้เครื่อง Suction เพื่อหาปริมาณของตะกอนสนิมที่สนามแม่เหล็กสามารถดักจับได้

5.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ตรวจสอบความเป็นกรด-ด่างของน้ำตัวอย่างได้ โดยใช้ pH-Meter



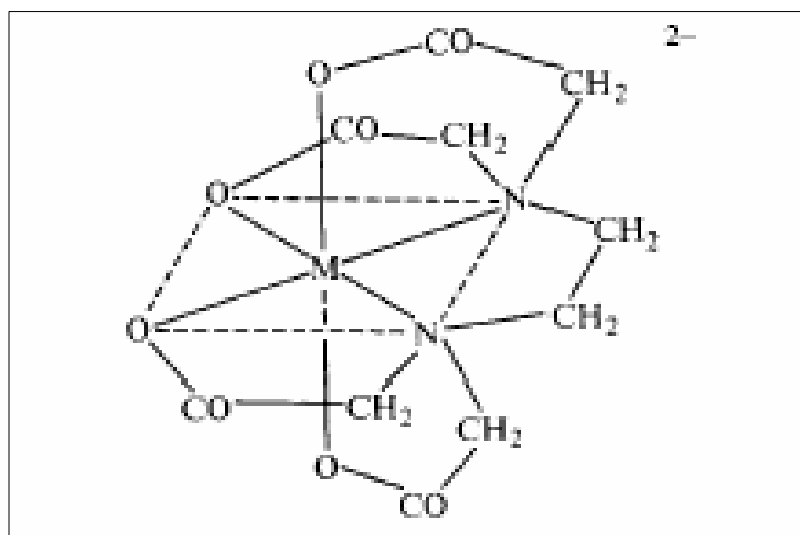
ภาพที่ 24 pH-Meter

5.2 ค่าความกระด้าง (Hardness)

วิธีหาค่าความกระด้างของน้ำที่ใช้คือการไตเตรทแบบเกิดสารเชิงซ้อน โดยใช้สารละลายมาตรฐาน Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA) ดังแสดงในภาพที่ 24 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ปิเปตต์สารละลายตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ 100 มิลลิลิตร

2. เติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 ลงไป 1 มิลลิลิตร
3. เขย่าสารให้เข้ากัน
4. หยด indicator (Erichrome black T) 4 หยด
5. เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายสีม่วงอมชมพู
6. ไทเทรตกับสารละลาย EDTA 0.01 M จนเมื่อเข้าสู่จุดยุติ สารละลายตัวอย่างจะเปลี่ยนสีจากสีม่วงอมชมพูไปเป็นสีน้ำเงิน
7. บันทึกปริมาตรของสารละลาย EDTA และนำไปคำนวณหาค่าความกระด้างของน้ำตัวอย่าง



ภาพที่ 25 แสดงโครงสร้างของ EDTA

โดยหลักการคือ EDTA จะเกิดสารเชิงซ้อนกับแคลเซียมด้วยอัตราส่วนจำนวนโมลเป็น 1:1 สามารถหาค่าความกระด้างของน้ำตัวอย่าง (mg/L หรือ ppm ของ CaCl_2) ได้จากสมการ

$$\text{ppm} (\text{CaCl}_2) = \text{มวลโมเลกุลของ CaCl}_2 \times V_{\text{EDTA}} \times [\text{EDTA}] \times 10^4 \quad (15)$$

โดยที่ V_{EDTA} คือ ปริมาตรของสารละลาย EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต (ลิตร)
 $[\text{EDTA}]$ คือ ความเข้มข้นของสารละลาย EDTA (Molar)

5.3 ปริมาณตะกอนสนิม

ตรวจสอบปริมาณตะกอนสนิมที่ดักจับได้ในท่ออะคริลิกโดยใช้เครื่อง Suction มีวิธีการคือ นำน้ำที่ได้จากการล้างตะกอนสนิมในท่ออะคริลิกไปกรองด้วยเครื่อง Suction ที่งอไว้ให้แห้ง จากนั้นนำไปชั่ง (ดังแสดงในภาพที่ 26 และ 27)



ภาพที่ 26 เครื่อง Suction



ภาพที่ 27 เครื่องชั่งสาร

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลของการปรับค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่มีต่อการบำบัดน้ำใช้

จากการทดลองโดยใช้สนามแม่เหล็กชั่วคราวที่ความเข้ม 0.29, 0.60 และ 1.51 พบว่าไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความกระด้างและปริมาณตะกอนสนิม จากการวิเคราะห์หน้าจะเป็นผลจากค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่น้อยมาก ดังนั้นจึงวิเคราะห์ผลจากการบำบัดน้ำด้วยแม่เหล็กถาวร

1.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความกระด้าง

การทดลองปรับค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไปที่ค่าต่างๆทั้งหมด 4 ค่าคือ 128.2, 199.2, 267.8 และ 335.0 มิลลิเทสลา มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความกระด้าง (แคลเซียมไอออน) ดังแสดงในตารางที่ 12 โดยที่ทุกการทดลอง น้ำที่ใช้ทดสอบมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส และมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) เท่ากับ 34661.846 (แสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก)

ตารางที่ 12 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัดด้วยความเข้มข้นสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ และผลต่างของค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		Δ_{pH}	ค่าความกระด้าง		Δ_{hardness}
(มิลลิเทสลา)	(pH)			(mg/L)		
	ก่อน	หลัง		ก่อน	หลัง	
128.2	7.02	6.99	0.03	210.53	205.24	5.29
199.2	7.00	7.00	0.00	207.02	198.47	8.55
267.8	6.99	7.00	-0.01	204.50	192.68	11.82
335.0	7.00	7.03	-0.03	212.00	197.00	15.00

หมายเหตุ: แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าความกระด้างไว้ในภาคผนวก

จากตารางที่ 12 นำค่าความเป็นกรด-ด่างและความกระด้างของน้ำมาวิเคราะห์ในรูปแบบประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างและความกระด้างของน้ำ (η : %) โดยที่ $\eta_{\Delta\text{pH}}$ คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง และ $\eta_{\Delta\text{hardness}}$ คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\Delta\text{pH}}$ (%)	$\eta_{\Delta\text{hardness}}$ (%)
128.2	0.43	2.51
199.2	0.00	4.13
267.8	-0.14	5.78
335.0	-0.43	7.08

หมายเหตุ: แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำไว้ในภาคผนวก



ภาพที่ 28 ตัวอย่างน้ำที่เก็บไปทดสอบ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 29 แสดงสีของน้ำตัวอย่างที่เปลี่ยนไปขณะทดสอบด้วยการไตเตรท (ก) เมื่อหยดสารละลาย Buffer pH 10 (ข) เมื่อหยด Erichrome Black T (ค) เมื่อหยดสารละลาย EDTA จนใกล้จุดยุติ (ง) เมื่อถึงจุดยุติ



ภาพที่ 30 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วย pH-Meter

1.2 ปริมาณตะกอนสนิม

การทดลองปรับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กไปที่ค่าต่างๆทั้งหมด 4 ค่าคือ 128.2, 199.2, 267.8 และ 335.0 มิลลิเทสลา มีผลต่อปริมาณตะกอนสนิม ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ และ ปริมาณตะกอนสนิมที่ติดอยู่ในท่ออะคริลิก

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	ปริมาณตะกอนก่อนการบำบัด (g)	ปริมาณตะกอนในท่ออะคริลิก (g)
128.2	3.083	0.412
199.2	3.186	0.629
267.8	3.092	0.835
335.0	3.180	1.044

จากตารางที่ 14 นำปริมาณตะกรันสนิมที่สามารถดักจับได้ในท่ออะคริลิกมาวิเคราะห์ในรูปประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$, %) ได้ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิวเทสลา)	$\eta_{\text{pipe-scale}}$ (%)
128.2	13.36
199.2	19.74
267.8	27.00
335.0	32.83

หมายเหตุ: แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิมไว้ในภาคผนวก

โดยตะกรันสนิมจะถูกสนามแม่เหล็กดักจับ สังเกตได้จากบริเวณที่ติดตั้งสนามแม่เหล็กไว้ทั้ง 3 คู่จะมีตะกรันสนิมติดอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 31 และ 32



ภาพที่ 31 ตะกรันสนิมในบริเวณที่ติดตั้งสนามแม่เหล็กทั้งสามคู่



ภาพที่ 32 ตะกรันสนิมในท่ออะคริลิก

2. ผลของการเพิ่มค่าความปั่นป่วนของการไหลโดยการติดตั้งแผ่นบิด เข้าไปเสริมการบำบัดน้ำใช้ ด้วยสนามแม่เหล็ก

2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความกระด้าง

ผลการทดลองเพิ่มค่าความปั่นป่วนของการไหลโดยการติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า y แตกต่างกันเข้าไปเสริมการบำบัดน้ำใช้ด้วยสนามแม่เหล็ก มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความกระด้าง ดังแสดงในตารางที่ 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 และ 23

ตารางที่ 16 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด ด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 4.0$ และผลต่างของ ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด

ค่าความเข้ม	ค่าความเป็นกรด-ด่าง			ค่าความกระด้าง		
สนามแม่เหล็ก (มิลลิตเอสลา)	(pH)		Δ_{pH}	(mg/L)		Δ_{hardness}
	ก่อน	หลัง		ก่อน	หลัง	
128.2	7.01	7.01	0.00	205.82	199.02	6.80
199.2	7.01	7.00	0.01	202.40	191.73	10.31
267.8	7.00	7.00	0.00	199.24	185.95	13.29
335.0	7.00	7.04	-0.04	207.74	190.66	17.08

ตารางที่ 17 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้ง แผ่นบิดที่มีค่า $y = 4.0$

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\Delta\text{pH}}$ (%)	$\eta_{\Delta\text{hardness}}$ (%)
128.2	0.00	3.30
199.2	0.14	5.09
267.8	0.00	6.67
335.0	-0.57	8.22

ตารางที่ 18 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด ด้วยความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 6.0$ และผลต่างของ ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)		Δ_{pH}	ค่าความกระด้าง (mg/L)		Δ_{hardness}
	ก่อน	หลัง		ก่อน	หลัง	
128.2	7.00	7.01	-0.01	214.59	208.53	6.06
199.2	7.00	7.00	0.00	206.85	197.41	9.44
267.8	7.00	7.00	0.00	205.45	192.63	12.82
335.0	7.02	7.02	0.00	211.77	195.79	15.98

ตารางที่ 19 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้ง แผ่นบีดที่มีค่า $y = 6.0$

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\Delta\text{pH}}$ (%)	$\eta_{\Delta\text{hardness}}$ (%)
128.2	-0.14	2.82
199.2	0.00	4.56
267.8	0.00	6.24
335.0	0.00	7.54

ตารางที่ 20 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด ด้วยความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 8.0$ และผลต่างของ ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		Δ_{pH}	ค่าความกระด้าง		Δ_{hardness}
	(pH)			(mg/L)		
	ก่อน	หลัง		ก่อน	หลัง	
128.2	7.01	7.03	-0.02	200.93	195.25	5.68
199.2	7.00	7.00	0.00	203.87	194.73	9.14
267.8	7.01	7.00	0.01	208.14	195.37	12.77
335.0	7.02	7.03	-0.01	208.01	192.62	15.39

ตารางที่ 21 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 8.0$

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\Delta_{\text{pH}}}$ (%)	$\eta_{\Delta_{\text{hardness}}}$ (%)
128.2	-0.29	2.83
199.2	0.00	4.48
267.8	0.14	6.14
335.0	-0.14	7.40

ตารางที่ 22 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด ด้วยความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 10.0$ และผลต่างของ ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความกระด้างของน้ำ ก่อนและหลังจากผ่านการบำบัด

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		Δ_{pH}	ค่าความกระด้าง		Δ_{hardness}
	(pH)			(mg/L)		
	ก่อน	หลัง		ก่อน	หลัง	
128.2	7.02	6.98	0.04	208.64	203.37	5.27
199.2	6.99	7.01	-0.02	211.42	202.72	8.70
267.8	7.02	7.03	-0.01	205.03	192.47	12.56
335.0	7.01	7.01	0.00	209.58	194.51	15.07

ตารางที่ 23 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 10.0$

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\Delta_{\text{pH}}}$ (%)	$\eta_{\Delta_{\text{hardness}}}$ (%)
128.2	0.57	2.52
199.2	-0.29	4.12
267.8	-0.14	6.13
335.0	0.00	7.19

2.2 ปริมาณตะกอนสนิม

ผลการทดลองเพิ่มค่าความปั่นป่วนของการไหลโดยการติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า y แตกต่างกันเข้าไปเสริมการบำบัดน้ำใช้ด้วยสนามแม่เหล็ก มีผลต่อปริมาณตะกอนสนิม ดังแสดงในตารางที่ 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 และ 31

ตารางที่ 24 แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 4.0$ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติดอยู่ในท่ออะคริลิก

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	ปริมาณตะกอนก่อนการบำบัด (g)	ปริมาณตะกอนในท่ออะคริลิก (g)
128.2	3.099	0.510
199.2	3.027	0.801
267.8	3.088	1.102
335.0	3.018	1.315

ตารางที่ 25 แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 4.0$

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\text{pipe-scale}}$ (%)
128.2	16.46
199.2	26.46
267.8	35.69
335.0	43.57

ตารางที่ 26 แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 6.0$ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติดอยู่ในท่ออะคริลิก

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	ปริมาณตะกอนก่อนการบำบัด (g)	ปริมาณตะกอนในท่ออะคริลิก (g)
128.2	3.084	0.488
199.2	3.079	0.747
267.8	3.084	1.078
335.0	3.039	1.299

ตารางที่ 27 แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 6.0$

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\text{pipe-scale}}$ (%)
128.2	15.82
199.2	24.26
267.8	34.95
335.0	42.74

ตารางที่ 28 แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 8.0$ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติดอยู่ในท่ออะคริลิก

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	ปริมาณตะกอนก่อนการบำบัด (g)	ปริมาณตะกอนในท่ออะคริลิก (g)
128.2	3.123	0.432
199.2	3.050	0.728
267.8	3.006	1.035
335.0	3.074	1.178

ตารางที่ 29 แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 8.0$

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\text{pipe-scale}}$ (%)
128.2	13.83
199.2	23.87
267.8	34.43
335.0	38.32

ตารางที่ 30 แสดงปริมาณตะกอนสนิมก่อนการบำบัดด้วย ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 10.0$ และปริมาณตะกอนสนิมที่ติดอยู่ในท่ออะคริลิก

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	ปริมาณตะกอนก่อนการบำบัด (g)	ปริมาณตะกอนในท่ออะคริลิก (g)
128.2	3.014	0.420
199.2	3.046	0.679
267.8	3.047	0.963
335.0	3.094	1.083

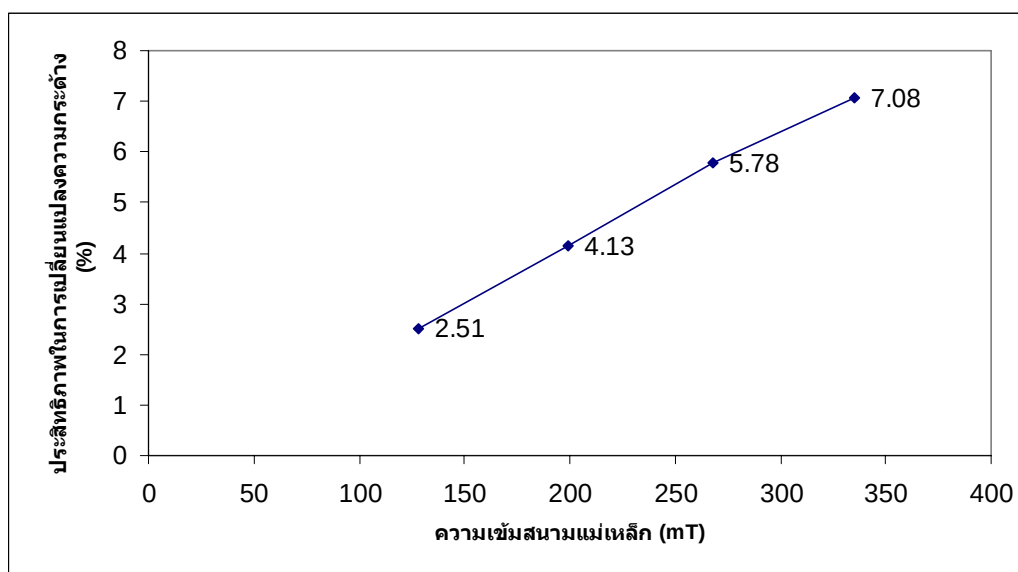
ตารางที่ 31 แสดงประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า $y = 10.0$

ค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)	$\eta_{\text{pipe-scale}}$ (%)
128.2	13.93
199.2	22.29
267.8	31.60
335.0	35.00

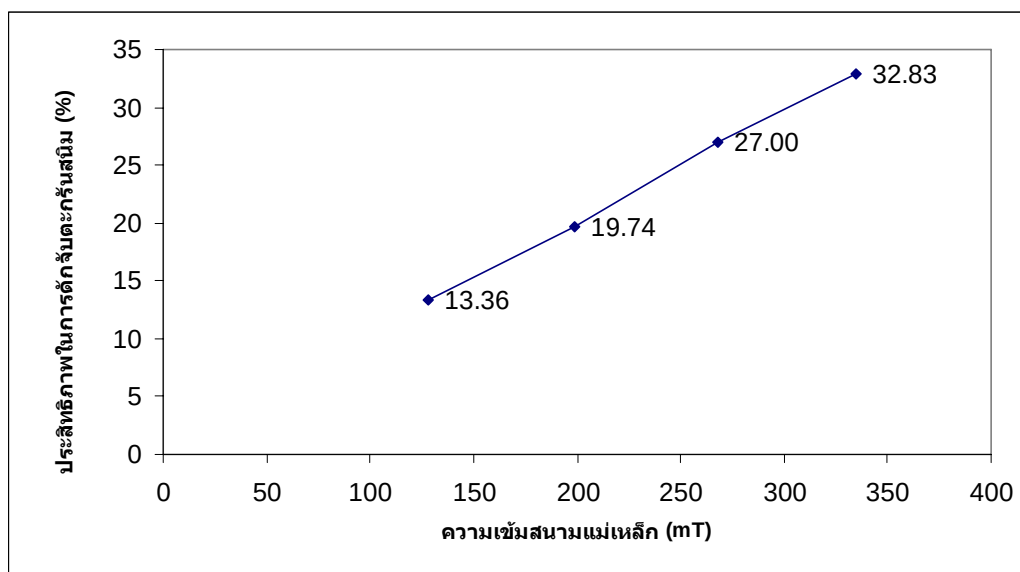
วิจารณ์

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็ก กับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความกระด้าง และปริมาณตะกอนสนิม

จากตารางที่ 12,13,14 และ 15 พบว่าค่า Δ_{pH} และ $\eta_{\Delta_{pH}}$ มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย แสดงว่าอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือมีผลน้อยมากจนไม่ถือเป็นนัยสำคัญ ในเงื่อนไขของสภาพน้ำดังที่ทำการทดลอง จึงนำเฉพาะค่า $\eta_{\Delta_{hardness}}$ และ $\eta_{pipe-scale}$ ที่ได้จากตารางที่ 13 และ 15 ไปพล็อตกราฟ โดยให้แกนแนวนอน (X) เป็นค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา) และแนวแกนตั้ง (Y) เป็นประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta_{hardness}}$) และประสิทธิภาพของการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{pipe-scale}$) ดังแสดงในภาพที่ 33 และ 34 ตามลำดับ



ภาพที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง



ภาพที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม

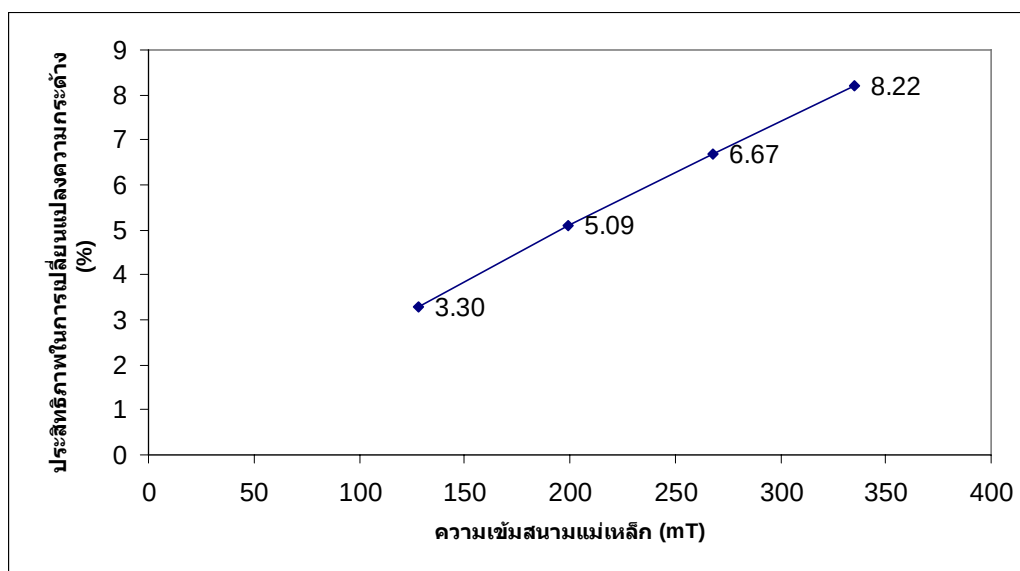
จากภาพที่ 33 จะเห็นว่าเมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้างก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง ก็คือ ประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้างนั่นเอง โดยจะเห็นว่าทุกๆค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง (ประมาณ 60-70 mT) ค่าประสิทธิภาพในการลดความกระด้างจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.3-1.5 %

ในภาพที่ 36 ก็เช่นเดียวกัน คือ เมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่อยๆเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงดักจับตะกอนสนิมก็เพิ่มตาม โดยทุกๆค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง ค่าประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิมจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5-7 %

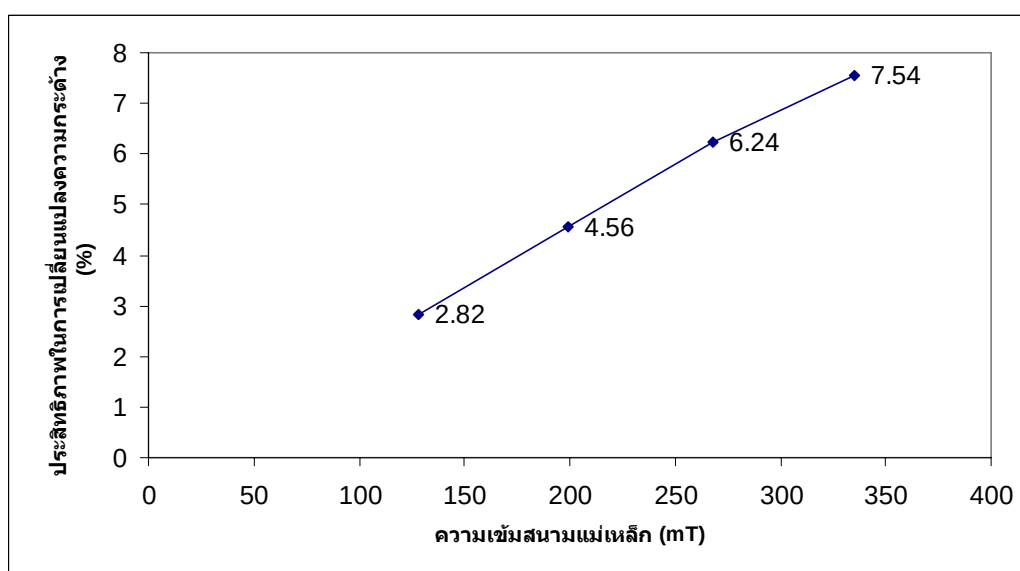
2. ความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นบิตที่ค่า y ต่างๆ กับ ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำใช้ด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

เช่นเดียวกับผลการทดลองส่วนที่ 1 ผลการทดลองในส่วนที่ 2 จะเห็นว่าค่า Δ_{pH} และ $\eta_{\Delta pH}$ มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย จึงนำค่าเฉพาะค่า $\eta_{\Delta hardness}$ และ $\eta_{pipe-scale}$ ที่ได้จากการนำไปพล็อตกราฟ โดยให้แกนแนวนอน (X) เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)

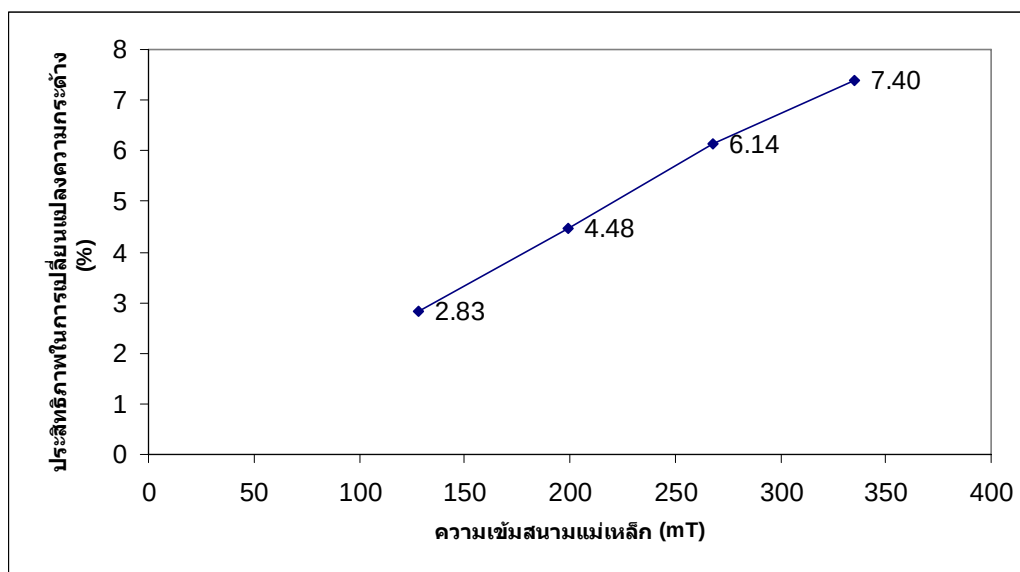
และแนวแกนตั้ง (Y) เป็นประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta\text{hardness}}$) และประสิทธิภาพของการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) ได้ดังแสดงในภาพที่ 35, 36, 37 และ 38



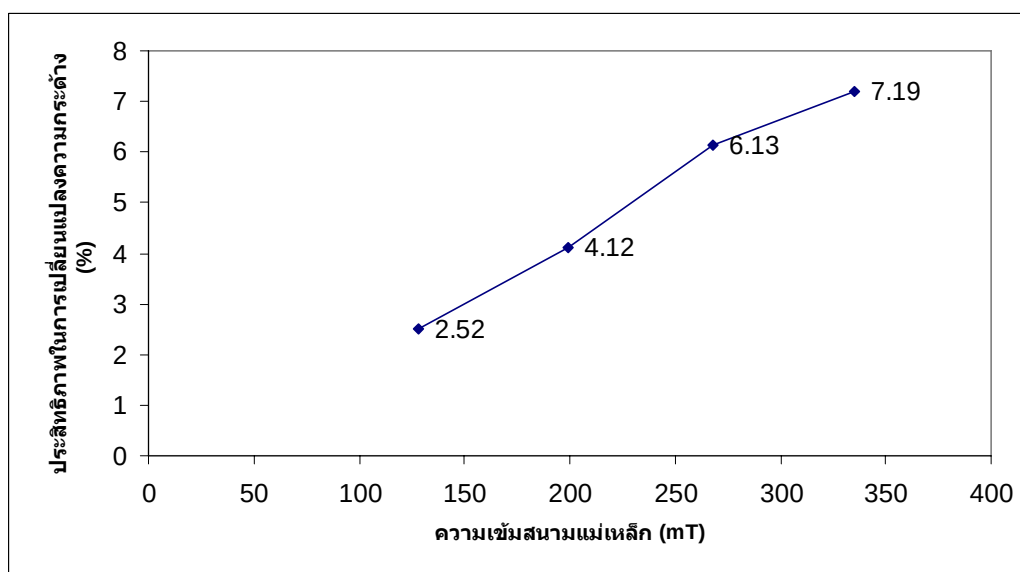
ภาพที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 4.0$



ภาพที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 6.0$



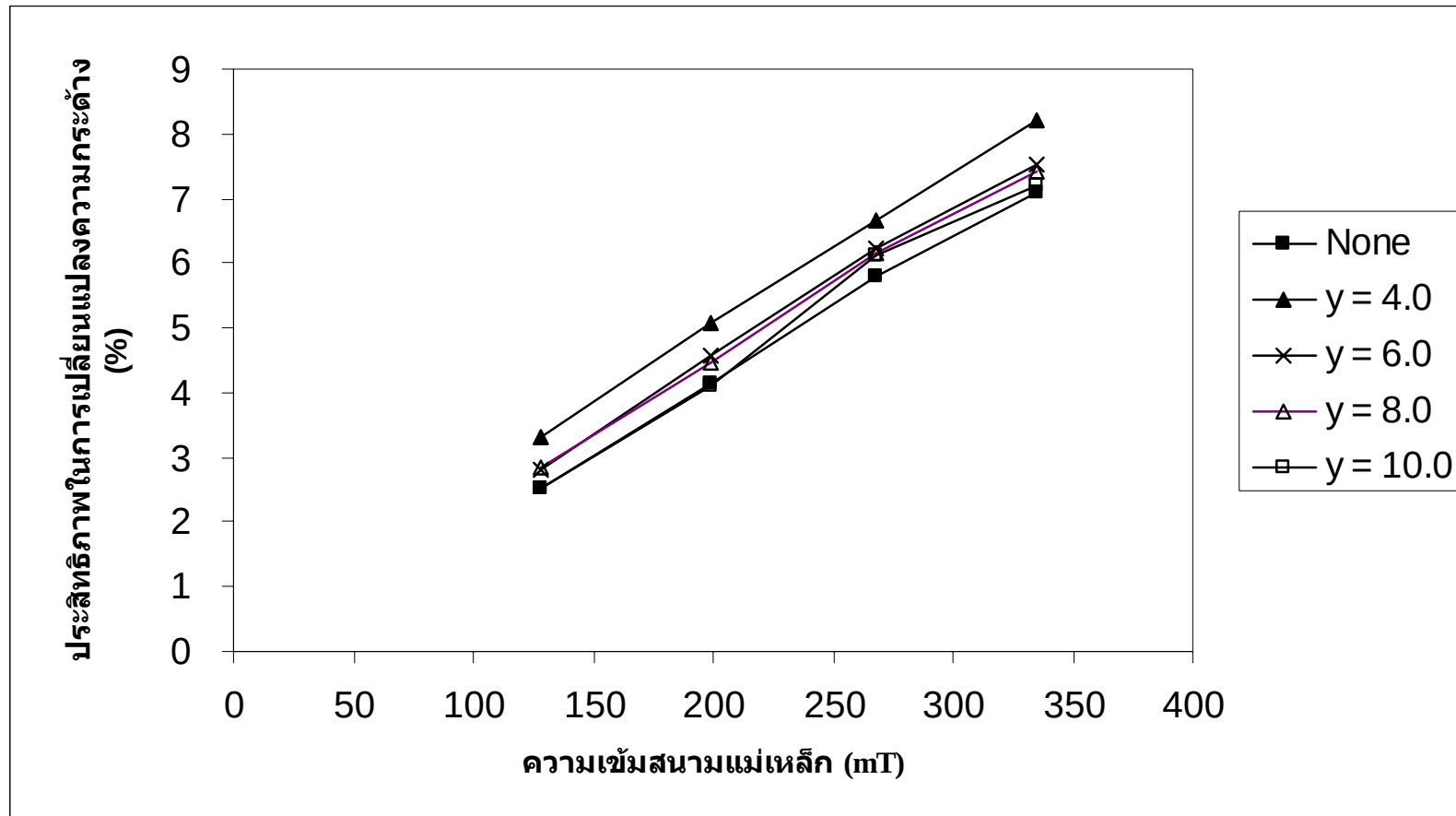
ภาพที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 8.0$



ภาพที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า $y = 10.0$

พิจารณา ประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta \text{hardness}}$) จากภาพที่ 35, 36, 37 และ 38 พบว่าแนวโน้มของกราฟมีลักษณะคล้ายกับตอนยังไม่ได้ติดตั้งแผ่นบิด แต่จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ของ

$\eta_{\Delta\text{hardness}}$ สูงขึ้น จึงพล็อตกราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง เมื่อไม่ติดตั้งแผ่นบีดกับติดตั้งแผ่นบีดทุกๆค่า y เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 39

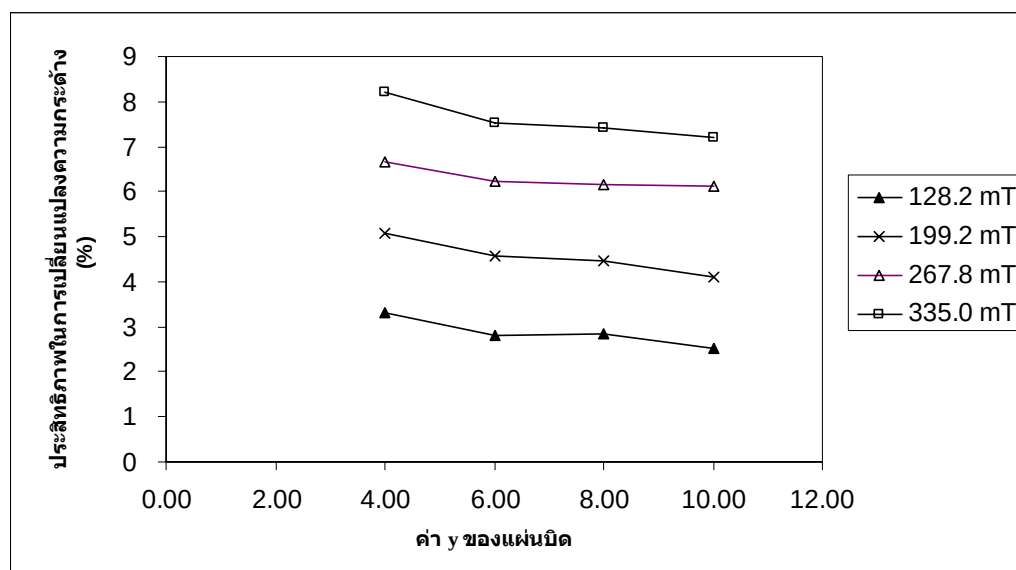


ภาพที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง เมื่อไม่ติดตั้งแผ่นบิดกับติดตั้งแผ่นบิดทุกๆ

ค่า y

จากภาพที่ 39 พบว่าการใส่แผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 4.0 เข้าไปในการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็กมีประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้างสูงที่สุด ในทุกช่วงค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 128.2 ถึง 335.0 มิลลิเทสลา โดยมีแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 6.0 และ 8.0 มีประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้างรองลงไปตามลำดับ และแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 10.0 มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เนื่องจากค่าความปั่นป่วนของการไหลมีค่ามากที่สุดเมื่อติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 4.0 และลดลงเมื่อค่า y เพิ่มขึ้นตามลำดับ

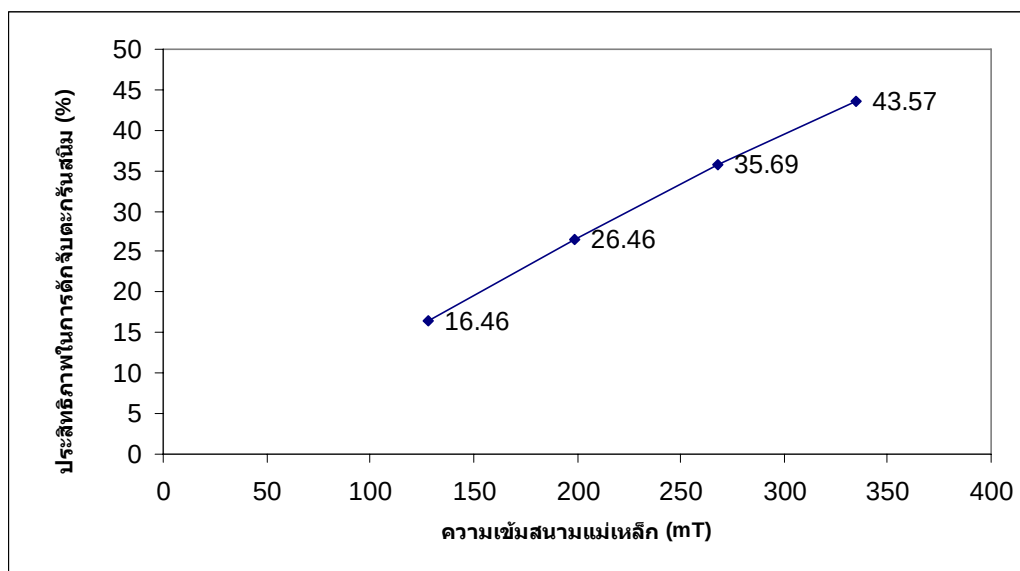
จากความสัมพันธ์ดังภาพที่ 41 จึงกล่าวได้ว่าหากแผ่นบีดมีค่า y น้อยลง ยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้างมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังภาพที่ 40 ซึ่งแสดงให้เห็นภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า y ของแผ่นบีด และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta\text{hardness}}$) ทุกๆค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก



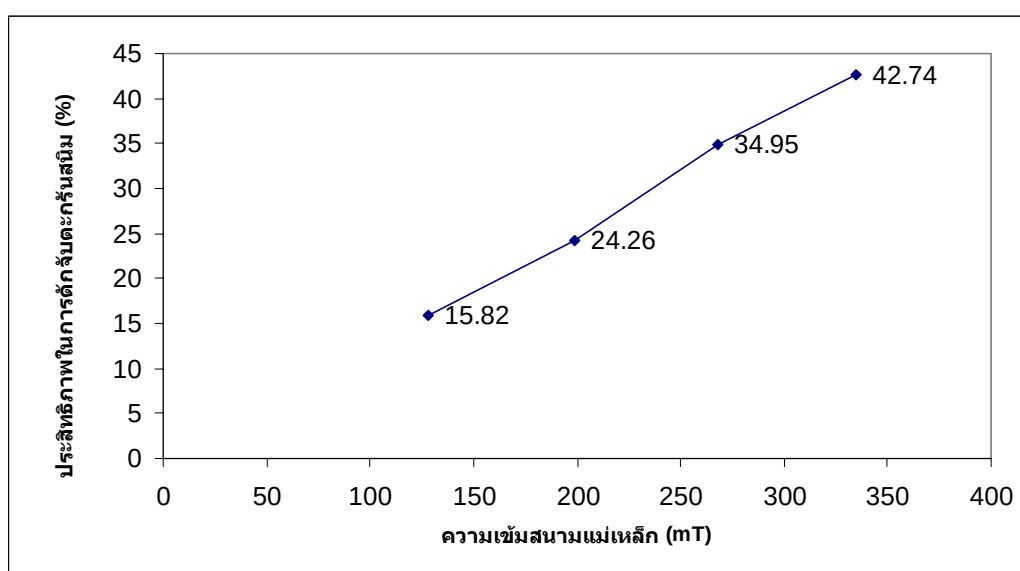
ภาพที่ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า y ของแผ่นบีด และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta\text{hardness}}$) ที่ทุกๆค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก

สำหรับสาเหตุที่ใส่แผ่นบีดแล้วประสิทธิภาพในการลดความกระด้างเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์น่าจะเกิดจากการไหลของน้ำผ่านแผ่นบีดทำให้ค่าความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อิออนในน้ำมีพลังงานมากขึ้นตามสมการที่ (5) นั่นก็คืออิออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) ซึ่งเป็นอิออนที่มีปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กและมีผลต่อค่าความกระด้างของน้ำ

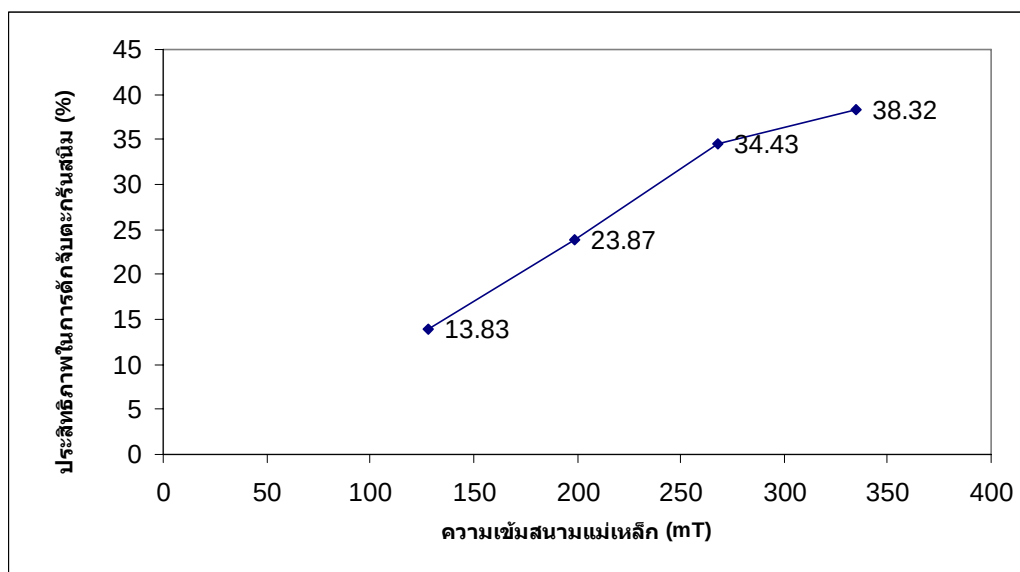
ในส่วนความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) กับความเข้มข้นแม่เหล็กแสดงไว้ดังภาพที่ 41, 42, 43 และ 44



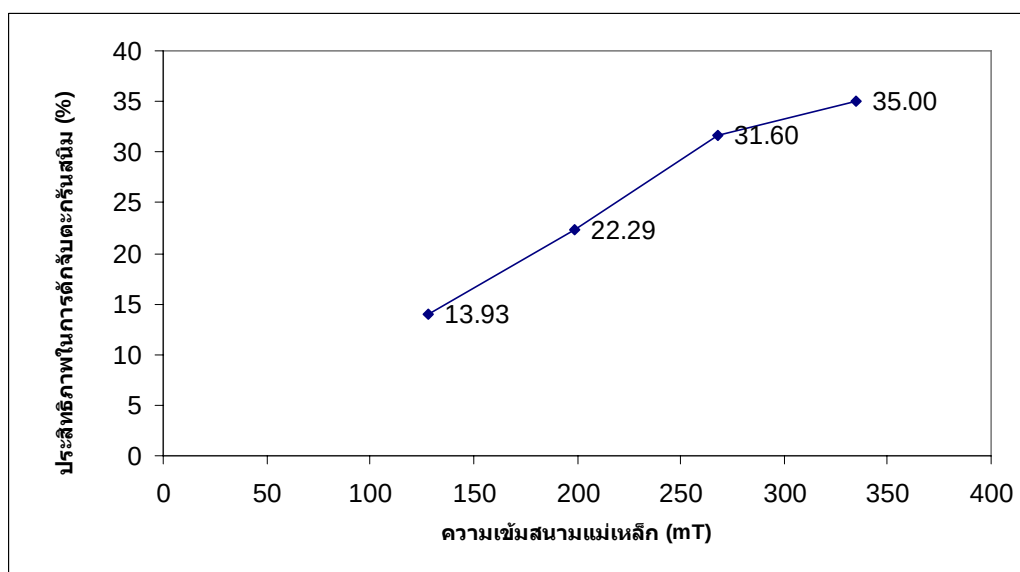
ภาพที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม เมื่อติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 4.0$



ภาพที่ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม เมื่อติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 6.0$



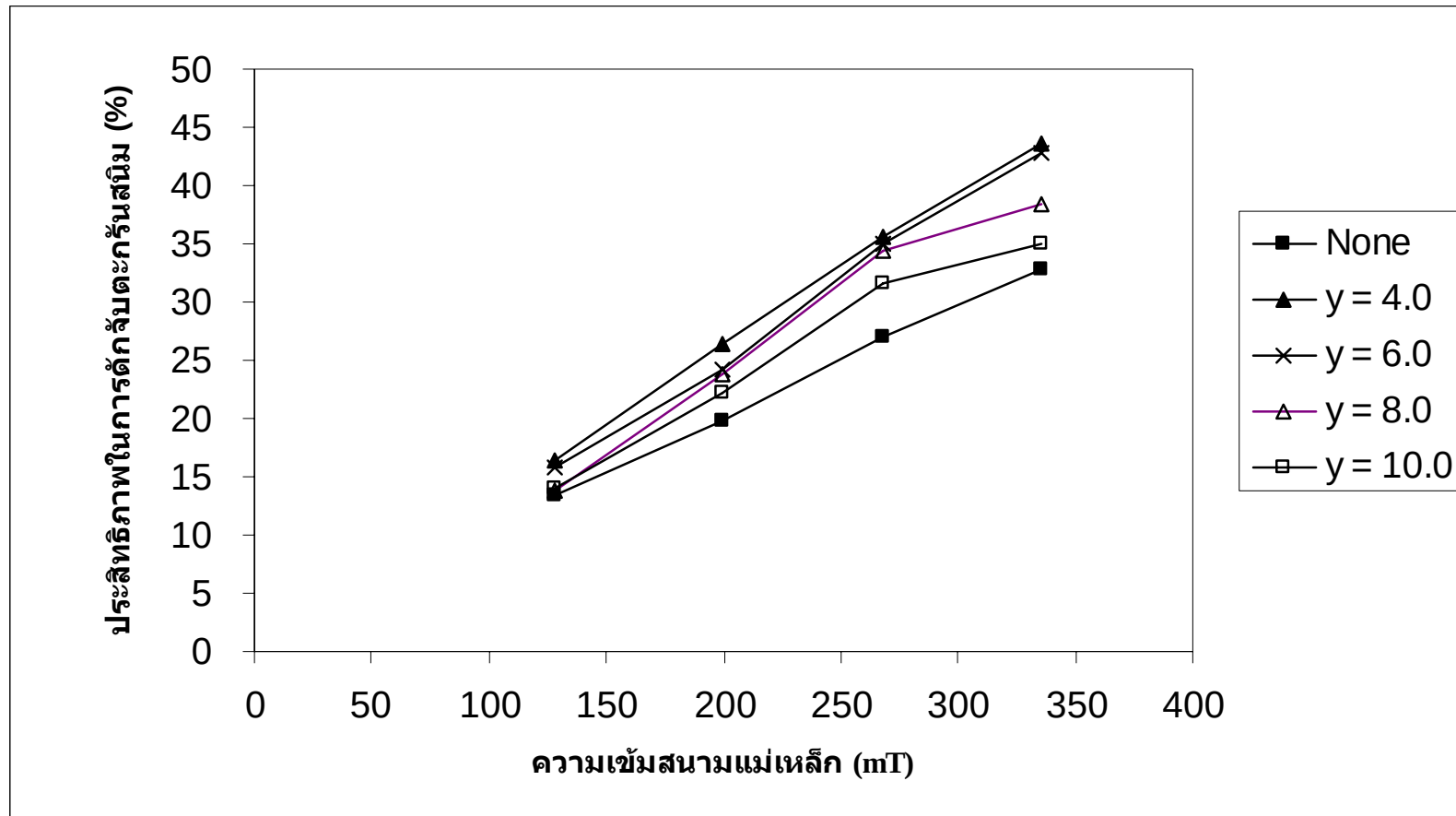
ภาพที่ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม เมื่อติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 8.0$



ภาพที่ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม เมื่อติดตั้งแผ่นปิดที่มีค่า $y = 10.0$

พิจารณา ประสิทธิภาพของการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) จากภาพที่ 41, 42, 43 และ 44 จะเห็นว่าแนวโน้มกราฟมีลักษณะคล้ายกับตอนยังไม่ใส่แผ่นปิด แต่จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ของ

$\eta_{\Delta\text{pipe-scale}}$ สูงขึ้น จึงพล็อตกราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม เมื่อ ไม่ติดตั้งแผ่นบีดกับติดตั้งแผ่นบีดทุกค่า y เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังภาพที่ 45

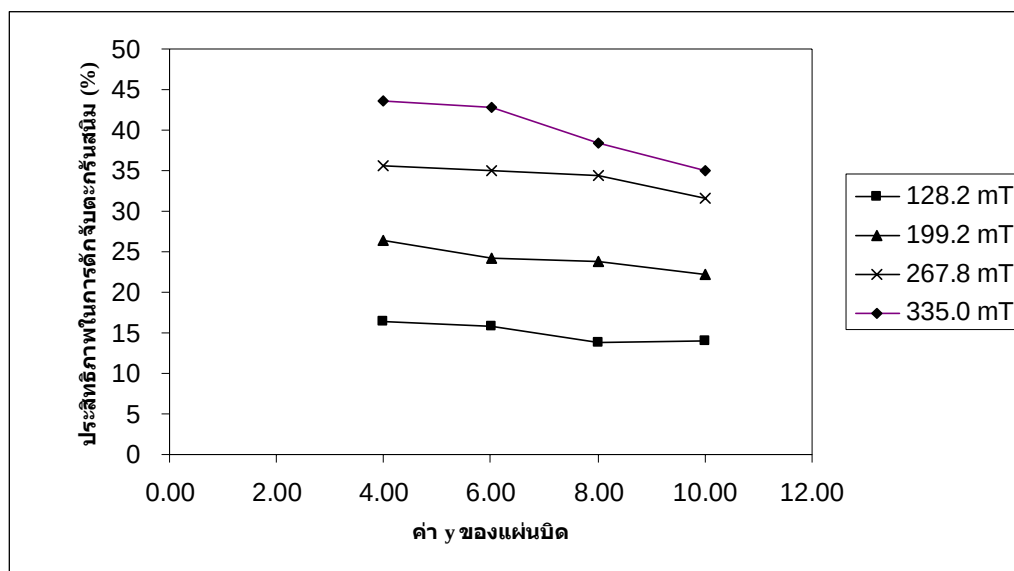


ภาพที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกั่วสนิม เมื่อไม่ติดตั้งแผ่นปิดกับติดตั้งแผ่นปิดทุกๆ

ค่า y

จากภาพที่ 45 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม เมื่อใส่แผ่นบีดที่มีค่า y ต่างๆกัน มีลักษณะคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆกับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงความกระด้าง เมื่อติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า y ต่างๆกัน กล่าวคือ เมื่อมีการติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 4.0 เข้าไปในการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็ก จะทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิมสูงที่สุด ในทุกๆช่วงค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก โดยมีแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 6.0 และ 8.0 มีประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิมรองลงไปตามลำดับ และแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 10.0 มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เนื่องจากค่าความปั่นป่วนของการไหลมีค่ามากที่สุดเมื่อติดตั้งแผ่นบีดที่มีค่า y เท่ากับ 4.0 และลดลงเมื่อค่า y เพิ่มขึ้นตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ดังภาพที่ 45 จึงกล่าวได้ว่าหากแผ่นบีดมีค่า y น้อยลง ยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิมมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังภาพที่ 46 ซึ่งแสดงให้เห็นภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า y ของแผ่นบีด และประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\Delta \text{hardness}}$) ในทุกๆค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก



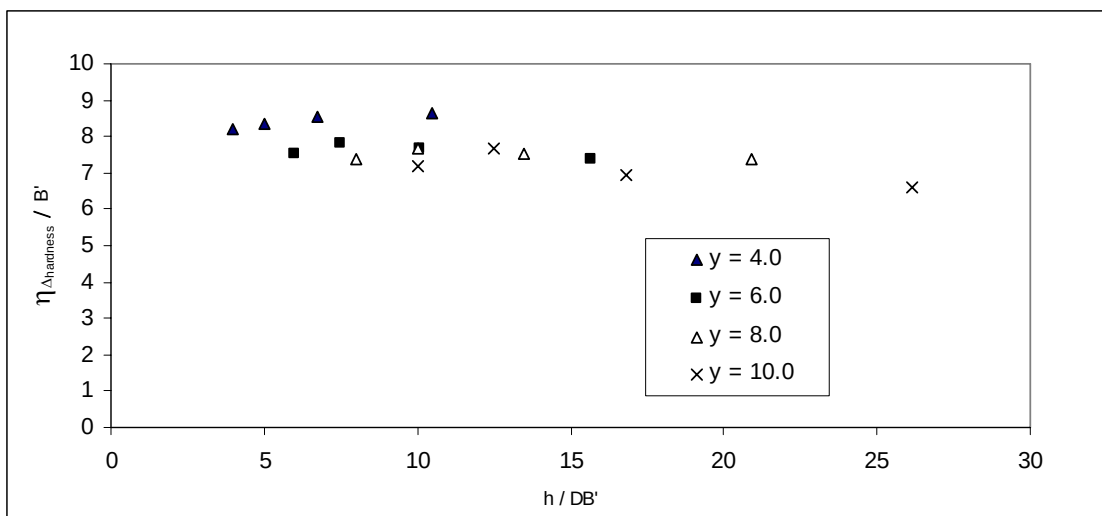
ภาพที่ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า y ของแผ่นบีด และประสิทธิภาพของการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) ที่ทุกๆค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก

สาเหตุที่ใส่แผ่นบีดแล้วประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิมเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์น่าจะเกิดจากการไหลของน้ำผ่านแผ่นบีดทำให้ค่าความปั่นป่วนของการไหลเพิ่มมากขึ้นและเป็นการไหลแบบหมุนเวียน (Swirl flow) ทำให้อุณหภูมิของตะกอนสนิมซึ่งเป็นสารประเภทเฟอร์ไรต์ (สารที่แม่เหล็กดูด) มีโอกาสเคลื่อนที่ไปในบริเวณที่ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าสูง ซึ่งก็คือบริเวณขอบท่ออะคริลิก เนื่องจากความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรจะมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณกลางท่อ และเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้บริเวณผิวท่อทั้งสองด้านที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรไว้

3. การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ค่า y ของแผ่นบีด และค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

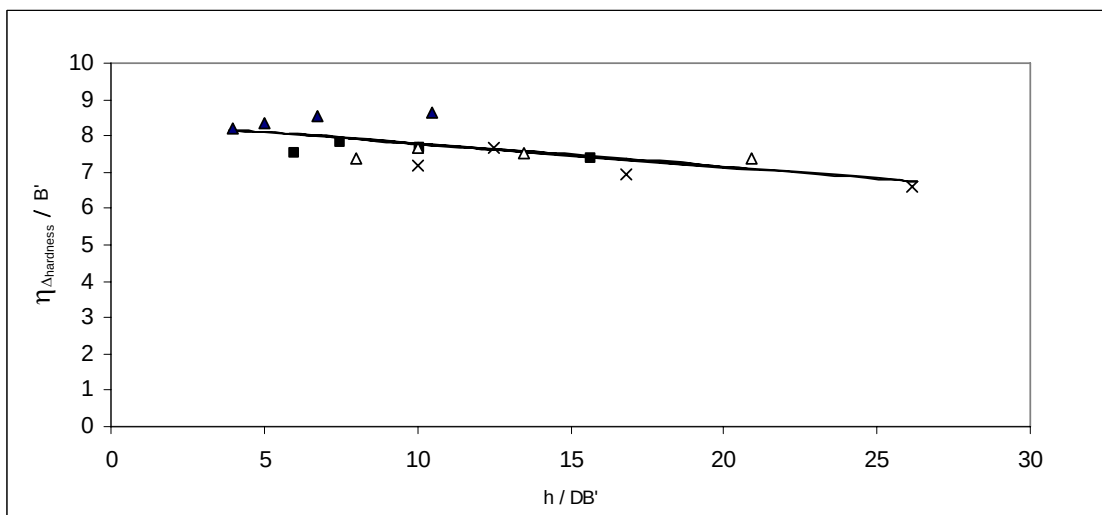
3.1 สมการของประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง

พิจารณาจากภาพที่ 39 เพื่อหาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง ค่า y ของแผ่นบีด และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น ในช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 128.2 มิลลิเทสลา ถึง 335.0 มิลลิเทสลา และค่า y ของแผ่นบีดตั้งแต่ 4.0 ถึง 10.0 โดยทำให้ตัวแปรทั้งสามตัวเป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่ง $\eta_{\Delta\text{hardness}}$ และ y เป็นตัวแปรไร้มิติอยู่แล้ว โดย y สามารถแสดงให้อยู่ในรูป h/D ดังนั้นกำหนดให้ $B'_i = B_i / B_{\max}$ โดยที่ B_i คือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแต่ละการทดลอง และ $B_{\max}$ คือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดคือ 335.0 มิลลิเทสลา จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติทั้งสามคือ $\eta_{\Delta\text{hardness}}$, h/D และ B' จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\eta_{\Delta hardness} / B'$ กับ h / DB'

จากการเรียงตัวของกลุ่มข้อมูลดังภาพที่ 47 เลือกใช้วิธี Least Squares เพื่อหาสมการเชิงเส้น โดยแสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ได้กราฟสมการเส้นตรงดังภาพที่ 48 โดยรูปสมการคือ $y = 8.416 + 6.3 \times 10^{-2}x$



ภาพที่ 48 แสดงเส้นสมการสำหรับหาประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้าง

โดยรูปทั่วไปของสมการการหาประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้างคือ

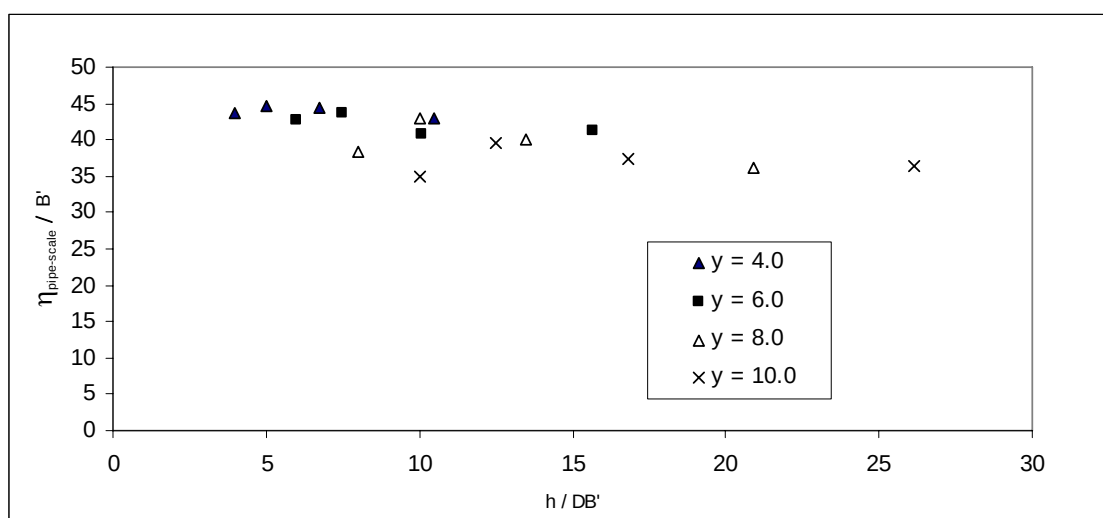
$$\eta_{\Delta hardness} = 8.416B' - 6.3 \times 10^{-2} y$$

$$\text{โดยที่ } B' = B_i / 335.0 ; 128.2 \leq B_i \leq 335.0$$

$$\text{และ } y = h / D; 4.0 \leq h / D \leq 10.0$$

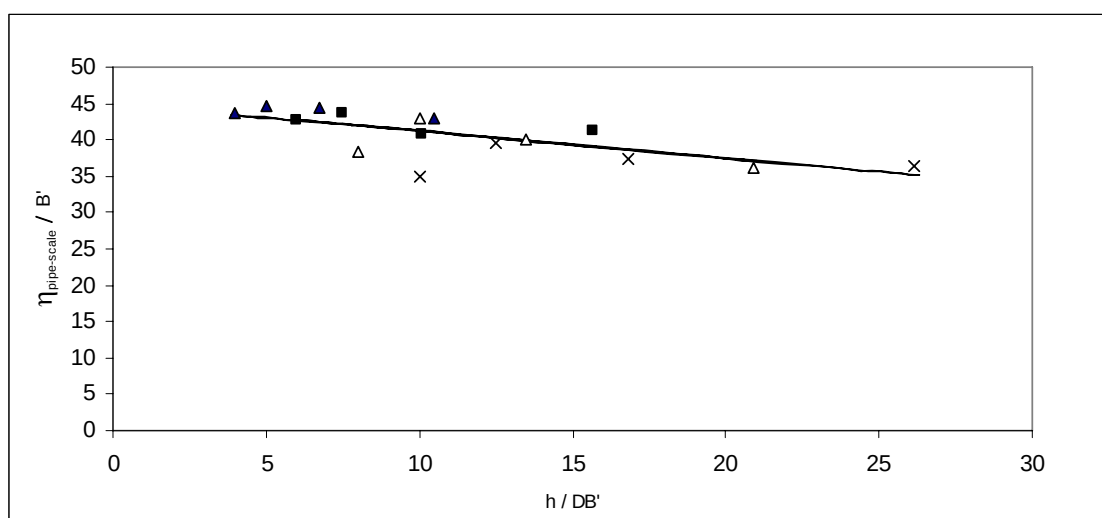
3.2 สมการของประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม

พิจารณาจากภาพที่ 45 เพื่อหาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ค่า y ของแผ่นบีด และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น ในช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 128.2 มิลลิเทสลา ถึง 335.0 มิลลิเทสลา และค่า y ของแผ่นบีดตั้งแต่ 4.0 ถึง 10.0 โดยทำให้ตัวแปรทั้งสามตัวเป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่ง $\eta_{\text{pipe-scale}}$ และ y เป็นตัวแปรไร้มิติอยู่แล้ว โดย y สามารถแสดงให้อยู่ในรูป h/D ดังนั้นกำหนดให้ $B'_i = B_i / B_{\text{max}}$ โดยที่ B_i คือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแต่ละการทดลอง และ B_{max} คือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดคือ 335.0 มิลลิเทสลา จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติทั้งสามคือ $\eta_{\text{pipe-scale}}$, h/D และ B' จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\eta_{\text{pipe-scale}} / B'$ กับ h / DB'

จากการเรียงตัวของกลุ่มข้อมูลดังภาพที่ 49 เลือกใช้วิธี Least Squares เพื่อหาสมการเชิงเส้น โดยแสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ได้กราฟสมการเส้นตรงดังภาพที่ 50 โดยรูปสมการคือ

$$y = 44.90 + 0.371x$$


ภาพที่ 50 แสดงเส้นสมการสำหรับหาประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม

โดยรูปทั่วไปของสมการการหาประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิมคือ

$$\eta_{pipe-scale} = 44.90B' - 0.371y$$

$$\text{โดยที่ } B' = B_i / 335.0 ; 128.2 \leq B_i \leq 335.0$$

$$\text{และ } y = h / D ; 4.0 \leq h / D \leq 10.0$$

4. เปรียบเทียบระหว่างการใช้ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบถาวรกับสนามแม่เหล็กแบบชั่วคราวในระบบบำบัดน้ำใช้ด้วยสนามแม่เหล็กและค่าระดับความปั่นป่วนของการไหล

จากการทดลองจะเห็นว่าแม่เหล็กถาวรมีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดน้ำมากกว่าสนามแม่เหล็กแบบชั่วคราว เนื่องจากมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่ามาก หากต้องการชุดกำเนิดแม่เหล็กแบบชั่วคราวที่ให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กใกล้เคียงกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก และสนามแม่เหล็กแบบชั่วคราวต้องการกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการ

เหนียวทำให้เกิดสนิมแม่เหล็ก ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องเพิ่มเติมเมื่อนำไปใช้งานจริง ต่างจากแม่เหล็กถาวรที่ไม่ต้องการกระแสไฟฟ้าและมีอายุการใช้งานนานตั้งแต่ 2 ปีขึ้นไป

ในแง่ของผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ แม่เหล็กถาวรมีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กตั้งฉากกับการไหล ซึ่งทำให้การบำบัดน้ำมีประสิทธิภาพสูงสุด ต่างกับแม่เหล็กแบบชั่วคราวที่เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไม่ตั้งฉากกับการไหล ซึ่งส่งผลให้การบำบัดน้ำได้ประสิทธิภาพไม่เต็มที่

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นแม่เหล็กและค่าความดันป่วนของการไหลที่มีผลต่อการบำบัดน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการทดลองไหลเวียนน้ำในระบบปิดผ่านสนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มต่างๆกัน และยังได้ติดตั้งแผ่นบิดโดยสอดเข้าไปในท่อบริเวณที่ติดตั้งสนามแม่เหล็กเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากการปรับค่าการไหลแบบปั่นป่วน โดยวิเคราะห์ในรูปประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ($\eta_{\Delta pH}$) ประสิทธิภาพในการลดความกระด้าง ($\eta_{\Delta hardness}$) และประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$)

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า เมื่อทำการปรับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กให้มีความเข้มสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการลดความกระด้างและประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม โดย $\eta_{\Delta hardness}$ เพิ่มขึ้นประมาณ 1.5% และ $\eta_{\text{pipe-scale}}$ เพิ่มขึ้นประมาณ 6% ทุกความเข้มข้นแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นประมาณ 70 เทสลา ส่วนประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ($\eta_{\Delta pH}$) มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย เมื่อทำการติดตั้งแผ่นบิดที่มีค่า y แตกต่างกัน จำนวน 4 ค่าคือ 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 เข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำใช้ด้วยสนามแม่เหล็ก พบว่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ยังคงมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย จึงสรุปได้ว่าสนามแม่เหล็กและการเพิ่มระดับความปั่นป่วนของการไหลไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือมีผลน้อยมากจนไม่ถือเป็นนัยสำคัญในเงื่อนไขของสภาพน้ำดังที่ทำการทดลอง ส่วนประสิทธิภาพในการลดความกระด้าง และประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิมมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการบำบัดน้ำใช้ด้วยสนามแม่เหล็กโดยปรับค่าความปั่นป่วนของการไหลโดยการติดตั้งแผ่นบิดเข้าไป ประสิทธิภาพในการลดความกระด้าง ($\eta_{\Delta hardness}$) สูงสุดที่ได้คือ 8.22% ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก 335.0 มิลลิเทสลาและค่า y ของแผ่นบิดเท่ากับ 4.0 และประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) สูงสุดที่ได้คือ 43.57% ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก 335.0 มิลลิเทสลาและค่า y ของแผ่นบิดเท่ากับ 4.0 เช่นเดียวกัน ซึ่งพบว่าค่า y ที่ลดลง จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า y ที่น้อยแสดงถึงค่าระดับความปั่นป่วนและการหมุน

วนที่เพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกันหากค่า y มีค่ามากก็จะทำให้ค่าระดับความปั่นป่วนและการหมุนวนน้อยตามไปด้วย และจากการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ค่า y ของแผ่นบีด และค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กด้วยวิธี Least Squares พบว่า ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กระหว่าง 128.2 ถึง 335.0 มิลลิเทสลา และค่า y ของแผ่นบีดระหว่าง 4.0 ถึง 10.0 สามารถหาประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้างได้จากสมการ $\eta_{\Delta\text{hardness}} = 8.416B' - 6.3 \times 10^{-2}y$ และหาประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิมได้จากสมการ $\eta_{\text{pipe-scale}} = 44.90 B' - 0.371y$

กล่าวโดยสรุปได้ว่าค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเพิ่มสูงขึ้น และการเพิ่มค่าระดับความปั่นป่วนของการไหลด้วยการสอดแผ่นบีดเข้าไปในระบบการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็ก โดยที่แผ่นบีดยังมีค่า y น้อยลง จะทำให้ค่าระดับความปั่นป่วนของการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยเสริมประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็กให้ดียิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็ก โดยปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของน้ำที่ใช้ทดลอง
2. ควรวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า y ของแผ่นบีดกับค่าระดับความปั่นป่วนเพื่อนำมาเชื่อมโยงกับการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็ก
3. ควรศึกษาผลกระทบจากค่าตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลต่อการบำบัดน้ำด้วยสนามแม่เหล็ก เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตติ กรรกริรมย์กุล, เกริก เปรมประเสริฐ, รัฐพล พิพัทธกุลกุล และ พัลลภ ตระกูลชัยธารา. 2545.

เครื่องกรองน้ำด้วยสนามแม่เหล็ก. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิศวกรรมเครื่องกล ปีการศึกษา 2545 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล, ไพรวลัย เกิดทองมี, หฤทัย ล่องกุลบุตร และ นิติยา คล้ายแก้ว. 2545.

รายงานโครงการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยสนามแม่เหล็ก. มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.

ไพโรจน์ แสณสินรังษี, สมคิด ทิพย์ประเสริฐ, สุทธิพงศ์ สวัสดิ์, อนุสรณ์ สิงห์ไพศาล,

ทศพล สุกตะ และ ชวลิต กิตติชัยการ. 2547. อิทธิพลของระดับความปั่นป่วนของการไหลต่อการบำบัดน้ำโดยใช้สนามแม่เหล็กถาวร,บทความที่ วศ. 15/034,น.192 – 198. ในเอกสารการประชุมทางวิชาการครั้งที่ 42. ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มันสิน ตันจุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2540. การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ สำหรับระบบหม้อ

ไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปา. พิมพ์ครั้งที่ 3. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์, วราคม เนินน้อย, ปรัชญา ส้ารวยศิลป์, สมศักดิ์ เพ็ชรกุล และ สมิทธิ์

เอี่ยมสอาด. 2549. การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการสอดใส่แผ่นบิด. ในรายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

สุรวุฒิ ประดิษฐ์นันท์. 2526. กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.

Akay, A. 2004. **The Impact of Swirl in Turbulent Pipe Flow.** The Academic Faculty of Woodruff School of Mechanical Engineering.

Chang, R. 1998. **Chemistry**. McGraw – Hill Companies, Inc.

Chen, C. and D. Chen. 2007. **Turbulent structure of Oscillatory shallow Flows in Open channel**. Department of Civil and Construction Engineering, UMIST, UK.

Coey J.M.D. and C. Stephen. 2000. Magnetic Water Treatment. **Journal of Magnetism and Magnetic Material**. (209): 71-74.

Hendricks, R.C., M.J. Braun, D. Peloso, M.M. Athavale and R.L. Mullen. 1999. Visualization of Flows in Packed Beds of Twisted Tapes. **2nd Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing sponsored by the Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering**, Honolulu, Hawaii.

Janzen, J.G., L. B. S. de Souza and H. E. Schulz. 2003. **Kinetic Energy in Grid Turbulence: Comparison between Data and Theory**. São Carlos School of Engineering, Department of hydraulics and sanitation, Brazil.

Kobe, S., G. Dražič, P.J. McGuinness, T. Meden, E. Sarantopoulou, Z. Kollia and A.C. Cefalas. 2003. Control over nanocrystallization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. **Journal of Materials Science and Engineering** (23): 811-815

Munson, R., F. Young, H. Okiishi. 1998. **Fundamental of fluid mechanics**. 3rd ed. John Wiley & Sons, USA.

Steenbergen, W. 1995. **Turbulent pipe flow with swirl**. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology.

Stoecker, W.F. 1998. **Design of Thermal System**. 3rd ed. McGraw – Hill Companies, Inc.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า ความต้านทานและกระแสไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ความต้านทาน (โอห์ม)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
12	12.0	1
12	6.0	2
12	4.0	3
12	3.0	4
12	2.4	5

ตัวอย่างการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าในวงจร

จาก $E = IR$

$$\therefore \text{จัดรูปสมการใหม่จะได้ } I = \frac{E}{R}$$

ดังนั้นแทนค่า $E = 12 \text{ V}$, $R = 12 \Omega$ ในสมการจะได้

$$\therefore I = \frac{12}{12} = 1 \text{ แอมแปร์}$$

การคำนวณหาตัวแปรที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (13) กำหนดให้

B	=	0.25	เวเบอร์/ตารางเมตร
μ_0	=	$4\pi \times 10^{-7}$	เวเบอร์/รอบ-แอมแปร์-เมตร
μ_r	=	200	(ไม่มีหน่วย)
I	=	5	แอมแปร์

โดยที่ N และ l คือ จำนวนรอบของขดลวดและระยะห่างระหว่างขดลวดแรกกับขดสุดท้ายตามลำดับ และ μ_r เป็นค่าที่ได้จากการสุ่ม จากนั้นแทนค่าในสมการ (13)

$$0.25 = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(200)(N)(5)}{l}$$

แก้สมการจะได้ค่า $\frac{N}{l} = 198.94 \approx 200$ รอบ/เมตร

เลือกค่าจำนวนรอบของขดลวดที่	30	รอบ
เพราะฉะนั้นระยะห่างระหว่างขดลวดแรกกับขดสุดท้ายคือ	0.15	เมตร

ตัวอย่างการคำนวณค่าตัวเลเยอร์โนลด์

จากตาราง Appendix B (Munson et al. (1998)) จะได้คุณสมบัติของน้ำดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\rho &= 995.7 \text{ kg / m}^3 \\ \mu &= 7.975 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{s / m}^2 \\ \gamma &= 9.765 \text{ kN / m}^3 \\ g &= 9.81 \text{ m / s}^2\end{aligned}$$

เนื่องจากเลือกใช้ท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) = 1 นิ้ว = $1 \times (2.54 \times 10^{-2})$ m.

$$\therefore \text{พื้นที่หน้าตัด (A)} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(2.54 \times 10^{-2})^2}{4} = 5.067 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

จาก $V = Q/A$

$$\therefore V = \frac{(553.584 \times 10^{-6})}{(5.067 \times 10^{-4})} = 1.093 \text{ m/s}$$

$$\text{จาก } Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$\therefore Re = \frac{(995.7)(1.093)(2.54 \times 10^{-2})}{(7.975 \times 10^{-4})} = 34661.846$$

ตัวอย่างการหาค่าความกระด้างของน้ำตัวอย่าง

จากสมการที่ 15 แทนค่า

$$\text{มวลโมเลกุลของ } CaCl_2 = 110.97$$

$$[EDTA] = 0.01 \text{ M (mol/L or molar)}$$

$$V_{EDTA} = 18.97 \text{ mL} = 0.01897 \text{ L}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{จะได้ } \text{ppm } (CaCl_2) &= 110.97 \times 0.01897 \times 0.01 \times 10^4 \\ &= 210.53 \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ 2 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไตเตรทเป็นค่าความกระด้าง

แผ่นปิด	ความเข้มข้นแม่เหล็ก 128.2				ความเข้มข้นแม่เหล็ก 199.2				ความเข้มข้นแม่เหล็ก 267.8				ความเข้มข้นแม่เหล็ก 335.0			
	ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง	
	V _{EDTA}	ppm	V _{EDTA}	ppm	V _{EDTA}	ppm	V _{EDTA}	ppm	V _{EDTA}	ppm	V _{EDTA}	ppm	V _{EDTA}	ppm	V _{EDTA}	ppm
None	18.97	210.53	18.50	205.24	18.66	207.02	17.89	198.47	18.43	204.50	18.66	192.68	17.36	212.00	17.75	197.00
y =4.0	18.55	205.82	17.93	199.02	18.24	202.40	17.28	191.73	17.95	199.24	18.24	185.95	18.24	207.74	17.18	190.66
y =6.0	19.34	214.59	18.79	208.53	18.64	206.85	17.79	197.41	18.51	205.45	18.64	192.63	18.64	211.77	17.64	195.79
y = 8.0	18.11	200.93	17.59	195.25	18.37	203.87	17.55	194.73	18.76	208.14	18.37	195.37	18.37	208.01	17.36	192.62
y =10.0	18.80	208.64	18.33	203.37	19.05	211.42	18.27	202.72	18.48	205.03	19.05	192.47	19.05	209.58	17.53	194.51

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ

- ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ($\eta_{\Delta pH}$)

จากสมการ

$$\eta_{\Delta pH} = \frac{pH_1 - pH_2}{pH_1} \times 100 = \frac{\Delta pH}{pH_1} \times 100 \quad (16)$$

โดยที่ pH_1 คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างก่อนผ่านการบำบัด

pH_2 คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างหลังผ่านการบำบัด

และจาก $pH_1 = 7.02$, $pH_2 = 6.99$ แทนค่าในสมการที่ () จะได้

$$\eta_{\Delta pH} = \frac{7.02 - 6.99}{7.02} \times 100$$

$$\therefore \eta_{\Delta pH} = 0.43 \%$$

- ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta hardness}$)

จากสมการ

$$\eta_{\Delta hardness} = \frac{ppm_1 - ppm_2}{ppm_1} \times 100 = \frac{\Delta hardness}{ppm_1} \times 100 \quad (17)$$

โดยที่ ppm_1 คือ ค่าความกระด้างก่อนผ่านการบำบัด

ppm_2 คือ ค่าความกระด้างหลังผ่านการบำบัด

และจาก $ppm_1 = 210.53$, $ppm_2 = 205.24$ แทนค่าในสมการที่ () จะได้

$$\eta_{\Delta hardness} = \frac{210.53 - 205.24}{210.53} \times 100$$

$$\therefore \eta_{\Delta hardness} = 5.29 \%$$

- ประสิทธิภาพในการดักจับตะกรันสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$)

จากสมการ

$$\eta_{\text{pipe-scale}} = \frac{m_e}{m_1} \times 100 \quad (18)$$

โดยที่ m_1 คือ ปริมาณตะกรันสนิมทั้งหมด
 m_e คือ ปริมาณตะกรันสนิมที่ดักจับได้

และจาก $ppm_1 = 3.083$, $ppm_2 = 0.412$ แทนค่าในสมการที่ () จะได้

$$\eta_{\Delta hardness} = \frac{3.083 - 0.412}{3.083} \times 100$$

$$\therefore \eta_{\Delta hardness} = 13.36 \%$$

การคำนวณหาสมการโดยวิธี Least Squares

ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta hardness}$)

เนื่องจากมีแนวโน้มเป็นสมการเส้นตรงจึงกำหนดให้อยู่ในรูปดังสมการที่ 19

$$y = a_0 + a_1 x \quad (19)$$

และจากวิธี Least Squares สามารถแก้ปัญหได้จากสมการที่ 20 และ 21

$$ma_0 + a_1 \sum x_i = \sum y_i \quad (20)$$

$$a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \quad (21)$$

โดยที่ m คือจำนวนพิกัดทั้งหมดเท่ากับ 16, x_i คือ y_i / B_i' และ y_i คือ $\eta_{\Delta \text{hardness}} / B_i'$ ซึ่งข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการแก้โจทย์ปัญหาได้แสดงไว้ดังตารางผนวกที่ 3

ตารางผนวกที่ 3 แสดงข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการแก้โจทย์ปัญหาเพื่อหาสมการของ $\eta_{\Delta \text{hardness}}$

	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
	10.45	8.62	109.25	90.13
	6.73	8.56	45.25	57.58
	5.00	8.34	25.04	41.75
	4.00	8.22	16.00	32.88
	15.68	7.37	245.82	115.54
	10.09	7.67	101.82	77.38
	7.51	7.81	56.33	58.59
	6.00	7.54	36.00	45.24
	20.90	7.40	437.01	154.59
	13.45	7.53	181.01	101.36
	10.01	7.68	100.15	76.86
	8.00	7.40	64.00	59.20
	26.13	6.59	682.83	172.07
	16.82	6.93	282.82	116.52
	12.51	7.67	156.48	95.92
	10.00	7.19	100.00	71.90
Σ	183.28	122.51	2639.81	1367.53

จากนั้นแทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในสมการที่ (20) และ (21) จะได้

$$16a_0 + 183.28a_i = 122.51 \text{ _____(A)}$$

และ $183.28a_i + 2639.81a_l = 1367.53 \text{ _____(B)}$

∴ แก้สมการ (A) และ (B) ได้ $a_0 = 8.416$ และ $a_l = -6.3 \times 10^{-2}$ แทนค่าในสมการที่ (19) ได้สมการที่ (22)

$$y = 8.416 - 6.3 \times 10^{-2}x \quad (22)$$

จากสมการที่ (22) ทำให้อยู่ในรูปทั่วไปโดย แทน y ด้วย $\eta_{\Delta hardness} / B'$ และ x ด้วย h / DB' ได้สมการที่ (23)

$$\frac{\eta_{\Delta hardness}}{B'} = 8.416 - \frac{6.3 \times 10^{-2} h}{DB'} \quad (23)$$

จากสมการที่ (23) จัดรูปโดยนำ B' คูณตลอดทั้งสมการ ได้สมการที่ (24)

$$\eta_{\Delta hardness} = 8.416B' - 6.3 \times 10^{-2} y \quad (24)$$

โดยที่ $B' = B_i / 335.0 ; 128.2 \leq B_i \leq 335.0$

และ $y = h / D ; 4.0 \leq h / D \leq 10.0$

ประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$)

การหาสมการของประสิทธิภาพในการดักจับตะกอนสนิม ($\eta_{\text{pipe-scale}}$) มีวิธีการคล้ายกับการหาสมการของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้าง ($\eta_{\Delta\text{hardness}}$) โดยจากสมการที่ (20) และ (21) m คือจำนวนพิกัดทั้งหมดเท่ากับ 16, x_i คือ y_i / B_i' และ y_i คือ $\eta_{\text{pipe-scale}} / B_i'$ ซึ่งข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการแก้โจทย์ปัญหาได้แสดงไว้ดังตารางผนวกที่ 4

ตารางผนวกที่ 4 แสดงข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการแก้โจทย์ปัญหาเพื่อหาสมการของ $\eta_{\text{pipe-scale}}$

	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
	10.45	43.01	109.25	449.58
	6.73	44.50	45.25	299.34
	5.00	44.65	25.04	223.40
	4.00	43.57	16.00	174.28
	15.68	41.34	245.82	648.14
	10.09	40.80	101.82	411.67
	7.51	43.72	56.33	328.15
	6.00	42.74	36.00	256.44
	20.90	36.14	437.01	755.48
	13.45	40.14	181.01	540.07
	10.01	43.07	100.15	431.02
	8.00	38.32	64.00	306.56
	26.13	36.40	682.83	951.18
	16.82	37.49	282.82	630.41
	12.51	39.53	156.48	494.49
	10.00	35.00	100.00	350.00
Σ	183.28	650.41	2639.81	7250.21

จากนั้นแทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในสมการที่ (20) และ (21) จะได้

$$16a_o + 183.28a_i = 650.41 \text{ _____(A)}$$

และ $183.28a_i + 2639.81a_l = 7250.21 \text{ _____(B)}$

∴ แก้สมการ (A) และ (B) ได้ $a_o = 44.90$ และ $a_l = -0.371$ แทนค่าในสมการที่ (19) ได้สมการที่ (25)

$$y = 44.90 - 0.371x \quad (25)$$

จากสมการที่ (25) ทำให้อยู่ในรูปทั่วไปโดย แทน y ด้วย $\eta_{\text{pipe-scale}} / B'$ และ x ด้วย h / DB' ได้สมการที่ (26)

$$\frac{\eta_{\text{pipe-scale}}}{B'} = 44.90 - \frac{0.371h}{DB'} \quad (26)$$

จากสมการที่ (26) จัดรูปโดยนำ B' คูณตลอดทั้งสมการ ได้สมการที่ (27)

$$\eta_{\text{pipe-scale}} = 44.90B' - 0.371y \quad (27)$$

โดยที่ $B' = B_i / 335.0 ; 128.2 \leq B_i \leq 335.0$

และ $y = h / D ; 4.0 \leq h / D \leq 10.0$

การคำนวณหาต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

1. ต้นทุน

ประกอบไปด้วย

- ถังน้ำขนาดความจุ 50 ลิตร 1 ถัง	100	บาท
- ปั๊มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า 1 ตัว	2000	บาท
- ท่อพีวีซี ความยาว 5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว	100	บาท
- ข้อต่อ ข้องอ และข้อต่อสามทาง	60	บาท
- วาล์วน้ำ 1 หัว	20	บาท
- ท่ออะคริลิก ความยาว 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว	200	บาท
- แม่เหล็กถาวรความเข้ม 335.0 มิลลิเทสลา 3 คู่	900	บาท
- แผ่นปิด กว้าง 1 นิ้ว ยาว 50 เซนติเมตรหนา 0.5 มิลลิเมตร 1 แผ่น	100	บาท

2. ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

ประกอบด้วย

- ค่าไฟฟ้าที่จ่ายให้ปั๊มน้ำ 60 นาที	1	บาท
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดเป็น	3841	บาท