การศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบผ่านสนามแม่เหล็ก

A STUDY OF LAMINAR FLUID FLOW BEHAVIOR IN THE MAGNETIC FIELDS

ธนาพล สุขชนะ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบที่มีการไหลผ่านสนามแม่เหล็ก โดยออกแบบอุปกรณ์การทดลองให้สามารถสังเกตเห็นลักษณะการไหลของของไหลในท่อ ซึ่งจะสังเกตได้จากเส้นการไหลของน้ำสีที่ไหลในอุปกรณ์ท่อทดสอบ การทดลองใช้ท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 25.4 มิลลิเมตร และศูนย์กลางภายใน 19.4 มิลลิเมตร แม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบแม่เหล็กถาวร อุณหภูมิน้ำในการทดลอง 25 องศาเซลเซียส ควบคุมอัตราการไหลให้ได้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ไม่เกิน 2,000 ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นผลของสนามแม่เหล็กต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลได้ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ จากผลการทดลองพบว่าสนามแม่เหล็กมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลเมื่อไหลผ่านสนามแม่เหล็ก โดยสามารถสังเกตเห็นผลของสนามแม่เหล็กได้เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงประมาณ 900 และการประกบแม่เหล็กทั้งแบบดูดและผลักกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: การไหลของของไหล, การไหลแบบราบเรียบ, สนามแม่เหล็ก, เรย์โนลด์

Abstract

In the present study, A study of laminar fluid flow behavior in the magnetic fields. The test section fabricated from the plastic tube with inner and outer diameter are 19.4 and 25.4 mm, respectively. The experiments can be seen magnetic fields had behavior on laminar fluid flow at Reynolds number little than 2,000. The inlet water temperature is 25ºC. The results are compared with the pipe without the magnetic fields. The magnetic fields had influence on laminar fluid flow behavior. It can be seen that the influence of magnetic fields at the Reynolds number range about 900, and the magnetic flux are don't have influence on laminar fluid flow behavior.

Keywords: Fluid flow, Laminar flow, Magnetic fields, Reynolds

บทนำ

การระบายความร้อนในอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนานำเอาของเหลวเข้ามาเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิในการทำงานของอุปกรณ์และยืดอายุการใช้งาน ซึ่งมีการออกแบบสร้างกันในรูปแบบต่างๆ เช่น ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat pipe) ชุดระบายความร้อนซีพียูด้วยน้ำ ในการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในคอมพิวเตอร์จะทำงานอยู่ท่ามกลางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการไหลของของไหลในการระบายความร้อนมักเป็นการไหลแบบราบเรียบ เพื่อให้สามารถใช้พลังงานในการช่วยระบายความร้อนให้น้อยที่สุด และมีเสียงน้อยที่สุด ซึ่งลักษณะการไหลของของไหลนั้นมีผลต่อความเสียดทานในการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่การไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้นจะมีผลทำให้สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น และในขณะเดียวกันมีผลต่อตัวประกอบความเสียดทานในการไหลด้วย ได้มีผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยในการนำเอาสนามแม่เหล็กมาใช้ประโยชน์ และการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในท่อ เช่น อับดุลลา ซาฮายารี และมามุด ปาคไชร์ (Abdullah Shahryari & Mahmood Pakshir) [1] ได้ทำการศึกษาเรื่องอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ จากผลการทดลองพบว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการศึกษาปรากฏการณ์การไหลของของไหลศึกษาปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นในท่อเปล่าและศึกษาปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นระนาบเรียบขวางการไหล การศึกษาปรากฏการณ์ การไหลที่เกิดขึ้นในท่อเปล่า ผลการวิจัยพบว่า เครื่องที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหล สามารถแสดงปรากฏการณ์การไหลของของไหลเห็นได้อย่างชัดเจนตามค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ออสบอร์น เรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) วิศวกรชาวฝรั่งเศส ได้ทดลองหารูปแบบการไหลในท่อ พบว่าลักษณะการไหลภายในท่อสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การไหลที่มีความเร็วน้อย เส้นสีมีลักษณะเป็นเส้น ตรงเรียกว่า Laminar Flow คือการไหลงานเรียบ

2. ถ้าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เส้นสีจะค่อยๆ แปรปรวนเป็นลูกคลื่นจนแตกกระจายไปทั่วเรียกว่า Turbulent Flow คือการไหลแบบปั่นป่วนและการไหลแบบรุนแรง การไหลทั้ง 2 ชนิดจะใช้ Reynolds Number บ่งบอกจากการศึกษาวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาสามารถสร้างเครื่องทดสอบในการแยกแยะลักษณะการไหลตามทฤษฎีได้ และมีการทดลองนำเอาสนามแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้ช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, เฉลิมพล บุญมา และคณะ [3] ได้สร้างเครื่องทดสอบลักษณะการไหลของของไหล, สุมาชิ ซามินาทาน (Sumathi Swaminathan) [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กต่อเปลวไฟขนาดเล็ก, มีสร่า และชิท (Misra & Shit.) [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กเมื่อเลือดไหลผ่านหลอดเลือดด้วยวิธีเชิงตัวเลข, วางลี และคณะ (WANG Lei & et al.) [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการไหลของของไหลในแม่พิมพ์หล่อแบบต่อเนื่อง, ดีชิกาเชีย และรามาชานดาร์ ราโอ (Deshikachar & Ramachandra Rao.) [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กในกระแสเลือดและออกซิเจนในช่องทางตัวแปรตัด, อัสเตอริออส (Asterios) [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กตามขวางในการไหลแยกชั้นแบบราบเรียบ, ชีสเตอร์ (Chester) [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กในการไหลของของเหลวผ่านรอบตัวเรือน, อิชิโอกะ (Ichioka& et al.) [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลทางชีวภาพของสนามแม่เหล็กสถิตในกระแสเลือดในร่างกาย จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาทดลองเพื่อให้เห็นพฤติกรรมการไหลของของไหลที่ผ่านสนามแม่เหล็ก และลักษณะการประกบของขั้วแม่เหล็กว่ามีผลแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

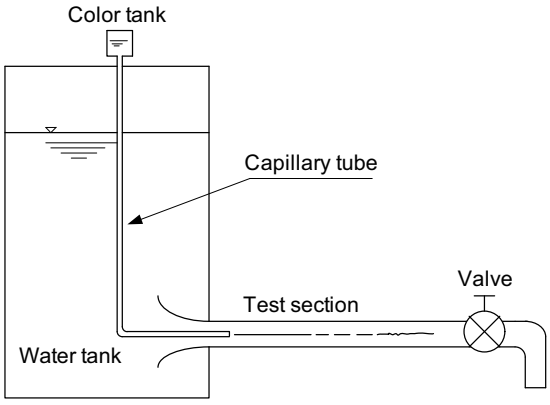
1. เพื่อศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อลักษณะการไหลของของไหล

2. เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของของไหลที่ผ่านสนามแม่เหล็กขั้วเดียวและต่างขั้วกัน

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

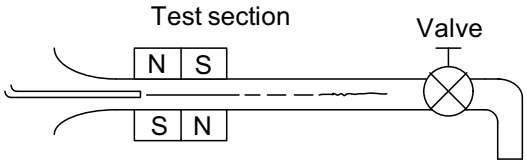
ไดอะแกรมอุปกรณ์การทดลอง

การที่เราสามารถจะสังเกตพฤติกรรมการไหลได้นั้น ต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถใช้ในการทดลองที่เห็นผลได้ตามทฤษฎีก่อนแล้วจึงทำการทดลองตามเงื่อนไขที่ต้องการทดสอบ โดยอุปกรณ์ทดลองมีลักษณะตามภาพที่ 1 อุปกรณ์ทดลองประกอบด้วย ถังบรรจุน้ำ (Water tank) สำหรับบรรจุน้ำในการทดลองขนาดประมาณ 15 ลิตร สังเกตผลการทดลองบริเวณท่อทดสอบ (Test section) ซึ่งทำด้วยพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 19.4 มิลลิเมตร ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ไหลในท่อทดสอบด้วยวาล์วควบคุม (Valve) ใช้ถังบรรจุสี (Color tank) ขนาด 200 ซีซี โดยปล่อยสีเข้าท่อทดสอบตามท่อขนาดเล็ก (Capillary tube)

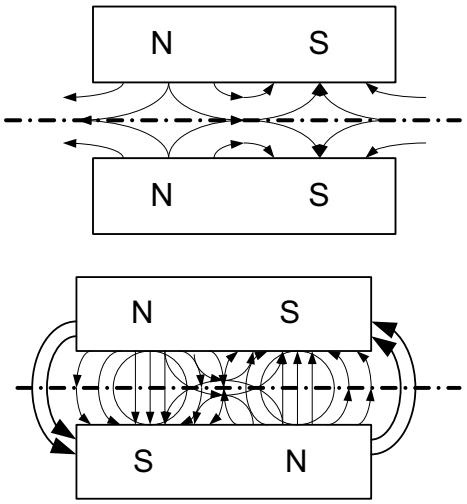


ภาพที่ 1 ไดอะแกรมของอุปกรณ์ทดลอง

ท่อทดสอบ



ภาพที่ 2 ท่อทดสอบ



ภาพที่ 3 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

จากภาพที่ 2 แสดงลักษณะของท่อทดสอบโดยใช้แม่เหล็กถาวรทดลองประกบบริเวณการแสดงเส้นสีของท่อทดสอบเพื่อสังเกตการไหลของน้ำที่ไหลในท่อ ในการทดลองจะทดการสลับขั้วแม่เหล็กเป็นสองลักษณะตามภาพที่ 3 การประกบแม่เหล็กขั้วต่างกันจะทำให้เกิดแรงดูดระหว่างแม่เหล็กต่างขั้วกันเส้นแรงแม่เหล็กจะมีลักษณะเป็นตาข่าย ในการทดลองจะทำให้ของไหลไหลตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กและเมื่อเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหมือนกันจะเกิดการผลักกันของแม่เหล็กทำให้ดูเหมือนช่องทางการไหลของของไหลเล็กลง

การทดลอง

ในการทดลองเริ่มจากการเก็บน้ำในห้องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยถังขนาด 200 ลิตร ต่อสายให้เข้าถังเก็บน้ำของอุปกรณ์ทดลอง โดยให้ไหลด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ควบคุมให้ระดับน้ำของถังทดลองให้คงที่ เปิดวาล์วให้น้ำในถังทดลองไหลออกทางท่อทดสอบด้วยปริมาณคงที่ จับเวลาและตวงน้ำเพื่อคำนวณหาอัตราการไหล จากนั้นเปิดวาล์วถังบรรจุสีให้สีไหลตามท่อขนาดเล็กเข้าท่อทดสอบ สังเกตลักษณะการไหลของของไหลด้วยกล้องถ่ายภาพนิ่งแบบดิจิตอลยี่ห้อโซนี่ รุ่น Cyber-shot DSC W190 ความละเอียด 12.1 ล้านพิกเซล และกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหว ยี่ห้อพานาโซนิค รุ่น

SDR-H20 ประกบแม่เหล็กเข้ากับท่อทดสอบตามเงื่อนไขในภาพที่ 2 และ 3 ซึ่งแม่เหล็กที่ใช้เป็นแม่เหล็ก แบบถาวรเนื่องจากการใช้แม่เหล็กถาวรจะช่วยให้ สนามแม่เหล็กคงที่ และไม่มีอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง เหมือนการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ่ายภาพแล้ว นำผลของท่อเปล่ามาเปรียบเทียบกับทฤษฎี และเปรียบเทียบกับท่อทดสอบที่ประกบด้วยแม่เหล็ก

การคำนวณและเปรียบเทียบผลการทดลอง

ในการทดลองสามารถพิจารณาผลการทดลองได้สองส่วนคือ 1) เปรียบเทียบผลที่ได้จากอุปกรณ์ทดลองกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ในทางทฤษฎี 2) เปรียบเทียบผลที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองกับทฤษฎี

ประเภทของการไหลของของไหล

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ของไหลที่ไหลลักษณะนี้จะมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,000 พารามิเตอร์ ค่า f หรือ ปัจจัยแรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพียงอย่างเดียว สมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}} \qquad (1)$$

ประเภทของการไหลของของไหลแบบราบเรียบ และ การไหลแบบปั่นป่วนสามารถแบ่งได้โดยอาศัยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ตามสมการที่ (2)

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \qquad (2)$$

โดยที่ Re = ค่า Reynolds number

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

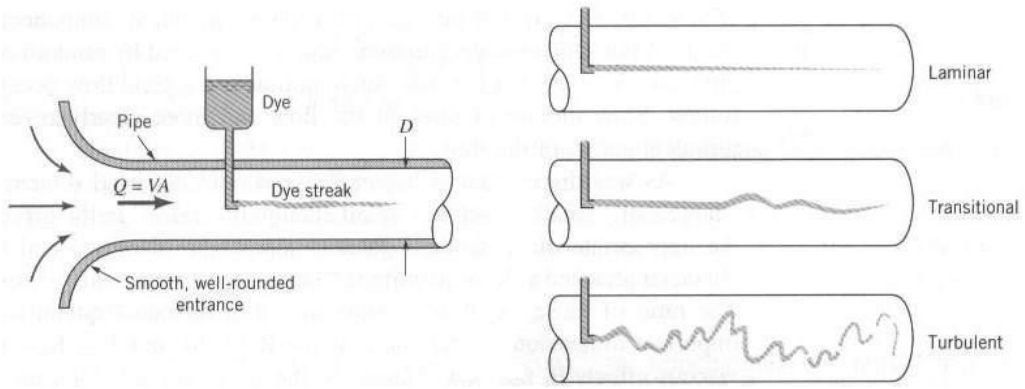
D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, kg/m.s

ν = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

ลักษณะการไหลของของไหลตามทฤษฎีของออสบอร์น เรย์โนลด์

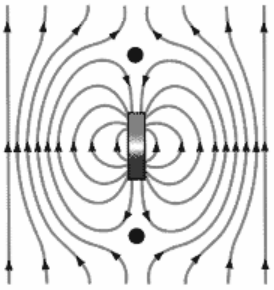
จากการทดลองของเรย์โนลด์พบว่าการไหลของของไหลแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน โดยใช้ชุดทดลองที่ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำชนิดให้เกิดความดันคงที่



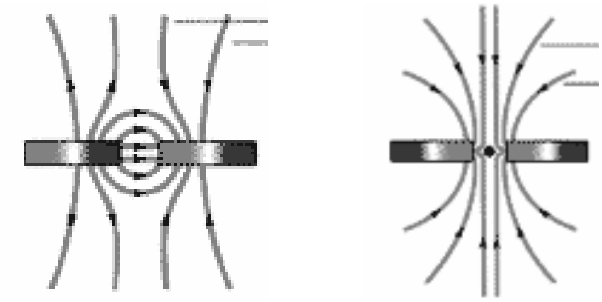
ภาพที่ 4 ลักษณะเส้นสีในการไหลของของไหล

ที่มา : FRANK M. WHITE. (1997) FLUID MEACHANICS FOURTH EDITION. MCGRAW-HILL,P.330

ลักษณะของสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 5 สนามแม่เหล็กในแม่เหล็กชิ้นเดียวกัน



ภาพที่ 6 สนามแม่เหล็กเมื่อหันขั้วต่างกันเข้าหากัน และหันขั้วเหมือนกันเข้าหากัน

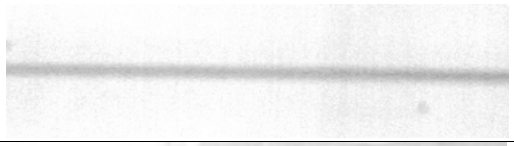
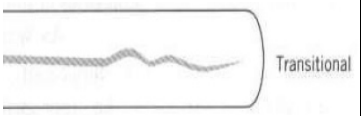
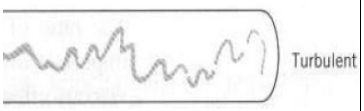
ผลการวิจัย

ผลของการทดลองสามารถแสดงเป็นรูปภาพ และตาราง ได้ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดลองอุปกรณ์ทดลองเทียบกับทฤษฎี

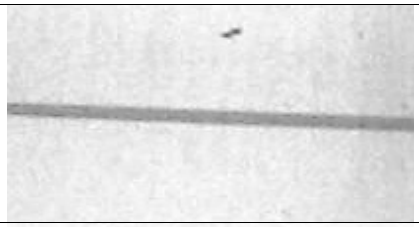
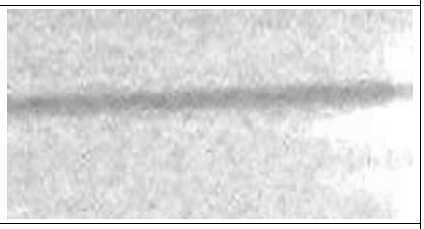
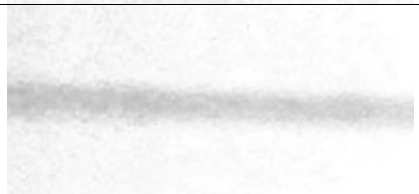
ลำดับที่	อัตราการไหล (m^3/s)	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)	ลักษณะการไหล
1	$2.78x10^{-6}$	204	ราบเรียบ
2	$5.03x10^{-6}$	363	ราบเรียบ
3	$10.64x10^{-6}$	780	ราบเรียบ
4	$13.30x10^{-6}$	975	ราบเรียบ
5	$16.39x10^{-6}$	1204	ราบเรียบ
6	$19.80x10^{-6}$	1453	ราบเรียบ
7	$28.17x10^{-6}$	2068	เปลี่ยนแปลงการไหล
8	$35.70x10^{-6}$	2620	เปลี่ยนแปลงการไหล
9	$42.55x10^{-6}$	3124	เปลี่ยนแปลงการไหล
10	$57.14x10^{-6}$	4193	ปั่นป่วน
11	$80.00x10^{-6}$	5872	ปั่นป่วน
12	$100.00x10^{-6}$	7339	ปั่นป่วน

ตารางที่ 2 ภาพการไหลของของไหลจากอุปกรณ์ทดลอง

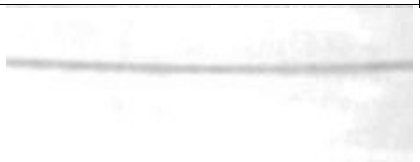
ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	ภาพการไหลจากการทดลอง	ทฤษฎี ออสบอร์น เรย์โนลด์
204		
2620		
4193		

จากตารางที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อสังเกตพฤติกรรมการไหลของของไหลในท่อสามารถให้ผลเป็นไปตามทฤษฎี โดยจากการทดสอบเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,000 จะเห็นลักษณะของเส้นสีเป็นเส้นเดียวอย่างต่อเนื่องเป็นช่วงการไหลแบบราบเรียบ ช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 2,000 – 4,000 จะเห็นลักษณะของเส้นสีเปลี่ยนจากเส้นตรงเป็นลักษณะเหมือนคลื่นซึ่งอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลง และเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4,000 จะสังเกตเห็นสีมีการกระจายตัวไม่เป็นเส้นซึ่งสามารถสรุปได้ว่าของไหลไหลอยู่ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบภาพการไหลในช่วงราบเรียบของท่อเปล่าและท่อที่ประกบแม่เหล็ก

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	ท่อเปล่า	ท่อประกบด้วยแม่เหล็ก
204		
363		
780		
975		

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบภาพการไหลในช่วงราบเรียบของท่อเปล่าและท่อที่ประกบแม่เหล็ก (ต่อ)

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	ท่อเปล่า	ท่อประกบด้วยแม่เหล็ก
1204		
1453		

จากตารางที่ 3 จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของเส้นสีของท่อทดสอบที่มีการประกบแม่เหล็กที่แตกต่างไปจากท่อเปล่า สามารถสรุปได้ว่าสนามแม่เหล็กมีผลต่อลักษณะการไหลของของไหล โดยทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ได้จากท่อเปล่ากับภาพที่ได้จากท่อที่มีการประกบด้วยแม่เหล็กจะเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 900 และที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 1,400 จะเห็นลักษณะของสีในการทดสอบคล้ายกับช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ท่อเปล่าประมาณ 2,000 แสดงให้เห็นว่าเมื่อประกบแม่เหล็กเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบจะทำให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ช่วงการเปลี่ยนแปลงการไหลของของไหลลดลง

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ทดลองสามารถแสดงผลของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในลักษณะของเส้นสีที่เทียบเคียงได้กับทฤษฎีการไหลของของไหลได้ และเมื่อนำมาทดสอบผลของสนามแม่เหล็กต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลที่ไหลผ่านสนามแม่เหล็กพบว่าสนามแม่เหล็กช่วยให้ ลักษณะการไหลของของไหลเปลี่ยนไป ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของเส้นสีในการทดลองเทียบกับท่อเปล่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากโมเลกุลของสะสารต่างๆ มีอำนาจแม่เหล็กภายในตัวเองในลักษณะขั้วเหนือและขั้วใต้ และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดการจัดเรียงขั้วแม่เหล็กใหม่ จึงทำให้โมเลกุลของของไหลในการทดลองเกิดการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ดังผลการทดลองขึ้น เมื่อพิจารณาจากภาพจะพบว่าของไหลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 900 และเริ่มเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 1,400 ซึ่งในการไหลของของไหลปกติจะมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต ในช่วงการไหลแบบราบเรียบอยู่ที่ประมาณ 2,000 จะเห็นว่าเมื่อของไหลไหลผ่านสนามแม่เหล็กจะทำให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตลดลง จากผลการทดลองดังกล่าวเมื่อนำของไหลไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ระบบระบายความร้อน ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์จะเกิดสนาม แม่เหล็กจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าอยู่แล้วจะสามารถช่วยให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ระบายความร้อนสูงขึ้นได้เนื่องจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตลดลง หรือใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาวิจัยต่อเกี่ยวกับความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยเฉพาะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อการไหลของของไหล ซึ่งในงานอุตสาหกรรมต่างๆในปัจจุบันเครื่องจักรกลส่วนใหญ่มักมีการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าแล้วเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ โดยที่สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นทั้งผลดีและผลเสียต่ออุปกรณ์ เครื่องจักรหรือแม้แต่ตัวมนุษย์เอง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณอธิการบดีและผู้บริหาร มหาวิทยาลัยปทุมธานี ที่ได้พิจารณาอนุมัติสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Abdullah, S. and Mahmood, P. (2008). Influence of modulated electromagnetic field on fouling in a double-pipe heat exchanger. *International Journal of Materials Processing Technology*. 203, 389-395.

[2] จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์; นุสรา ใยยะผลสุข; และศิรวิทย์ ศิริรักษ์. (2542). *การศึกษาปรากฏการณ์การไหลของของไหล.* ปริญญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[3] เฉลิมพล บุญมารักษ์พันธ์; และ ไชยยันต์ ชุณหพิมล. (2543). *เครื่องทดสอบลักษณะการไหลของของไหล.* ปริญญานิพนธ์เทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[4] Sumathi S. (2005). *Effects of Magnetic Field on Micro Flames.* A Thesis Master of Science in Mechanical Engineering Louisiana State University.

[5] Misra, J.C. and Shit, G.C. (2007). *Effect of Magnetic Field on Blood Flow Through an Artery: A Numerical Model.* Centre for Theoretical Studies Indian Institute of Technology Kharagpur India.

[6] Wang, L. ,Shen, H. and Liu, B. (2006). *Effect of Electromagnetic Field on Fluid Flow in Continuous Casting Mold.* Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, China.

[7] Deshikachar, K.S. and Ramachandra, R.A. (2003). Effect of a magnetic field on the flow and blood oxygenation in channels of variable cross-section. *International Journal of Engineering Science*, 23, 1121-1133.

[8] Asterios, P. (2007). Effect of transverse magnetic field on flow separation of laminar boundary layers plate. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 7, 487 – 489.

[9] Chester, W. (2006). The effect of a magnetic field on the flow of a conducting fluid past a body of revolution. *Journal of Fluid Mechanics,* 10, 459-465.

[10] Ichioka, S., Iwasaka, M., Shibata, M., Harii, A. and Ueno, S. (1998). Biological effects of static magnetic fields on the microcirculatory blood flow in vivo: a preliminary report, 36(1), 9-15.