



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การแสดงเอกลักษณ์เชิงพลวัตและการควบคุมแบบทำซ้ำในเวลาจริงของ
การหมุนวนของอากาศข้างหลังทรงกระบอกเดี่ยว

โดย สาทิสส์ ทรงชน และคณะ

เสร็จสิ้นโครงการ มีนาคม พ.ศ. 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การแสดงเอกลักษณ์เชิงพลวัตและการควบคุมแบบทำซ้ำในเวลาจริงของ การหมุนของอากาศข้างหลังทรงกระบอกเดี่ยว

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ผศ. ดร. สาทิสส์ ทรงชน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ศ. ดร. สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ทบวงฯ และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

สายทางกระแสหมุนวนคาร์มานข้างหลังทรงกระบอกเริ่มเกิดขึ้นเป็นคาบที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 40 ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ เอกลักษณ์นี้สามารถแสดงได้ด้วยสัญญาณเป็นคาบๆที่วัดได้ กระแสหมุนวนข้างหลังนี้จะแปรสภาพเป็นสัญญาณไม่มีคาบในช่วงรอยต่อการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 185 งานวิจัยนี้นำเสนอการทดลองเพื่อการสังเกตการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกซึ่งอยู่กับที่ ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 185 และยังได้สร้างตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่มีอิทธิพลในการเปลี่ยนการไหลในช่วงรอยต่อการไหลแบบปั่นป่วนให้กลับมาเป็นการไหลแบบราบเรียบซึ่งมีสัญญาณเป็นคาบ การควบคุมแบบพีไอก็ได้ประยุกต์ใช้กับการไหลในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วนเช่นเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบทำซ้ำ ตัวรับสัญญาณลดความร้อนติดตั้งที่ตำแหน่ง $x/d=2$ ข้างหลังทรงกระบอกกลม ความเร็วอิสระของอากาศเพื่อเข้าปะทะทรงกระบอกปรับไว้ที่ $U_\infty = 90$ เซนติเมตรต่อวินาที การทดลองทำในอุโมงค์ลมโดยใช้ลำโพงเป็นตัวขับเคลื่อนสัญญาณเพื่อการควบคุม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้กฎการควบคุมที่สร้างขึ้นที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 185 สามารถเปลี่ยนการไหลในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วนให้กลับมาเป็นการไหลแบบราบเรียบได้ นอกจากนี้การใช้การควบคุมแบบทำซ้ำจะให้ได้รูปร่างสัญญาณที่คล้ายคลึงกับสัญญาณอ้างอิงมากกว่าการควบคุมแบบพีไอ

คำสำคัญ : การควบคุมแบบทำซ้ำ / กระแสหมุนวนข้างหลัง/ ช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน

Abstract

Karman vortex street occurs in the wake of a cylinder starting as a periodic vortex wake, identified by measured periodic signals, in laminar flow at Reynolds number 40. This vortex wake transforms to non-periodic signals in transition to turbulence flow at Reynolds number approximately 185. This research presents experimental observation of air flow passing a stationary cylinder with Reynolds number of 185 and also creates an analog repetitive controller influencing the transition to turbulence flow to be periodic signal as appearing in laminar flow. PI control is also applied to the same transition to turbulence flow comparing with repetitive control. A hot-wire sensor was located at $x/d=2$ behind a circular cylinder. The air free-stream velocity was maintained uniformly at $U_\infty=90$ cm/s. Experiments have been performed in wind tunnel using acoustic sound speaker as an actuator. The results show that using the constructed control laws, at Reynolds number 185, can change the transition to turbulence flows to be laminar flows. Furthermore, it has been found that the real time repetitive control produces a better shape, similar to a command signal, than PI controller.

Keywords : Repetitive Control / vortex wake / transition to turbulence

Executive Summary

1. ที่มา

การควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Control, RC) จะใช้กับระบบที่ต้องการสัญญาณซ้ำๆ กันเป็นคาบ ซึ่งใช้วิธีการปรับปรุงคำสั่งที่จะให้กับระบบควบคุมแทนที่จะเปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ในการปรับปรุงคำสั่งต้องที่ให้กับระบบควบคุมจะต้องใช้ค่าความผิดพลาด(Error)ในคาบการทำงานที่ผ่านมา มาปรับปรุงคำสั่งที่จะให้เกิดการทำงานในคาบปัจจุบัน

การไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกกลมเดียวจะทำให้เกิดการไหลวนข้างหลังทรงกระบอกเกิดขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นคาบและรูปแบบที่ซ้ำๆ กันในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำ และเมื่อเลขเรย์โนลด์เปลี่ยนไปจากค่าที่น้อยไปมาก จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนไปตามค่าของมัน ที่ค่าน้อยๆ การไหลที่ด้านหลังวัตถุทรงกระบอกจะเกิดการกระเพื่อมเป็นฟังก์ชันคาบซ้ำๆ กันดังกล่าว เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นการไหลก็จะเกิดช่วงรอยต่อขึ้นมา และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นมากการไหลก็จะเป็นแบบปั่นป่วน นอกจากนี้เป็นที่ทราบกันว่าชั้นขอบเขตของการไหลแบบปั่นป่วนมีการเกิด Skin friction มีค่าสูงมากกว่าชั้นขอบเขตของการไหลแบบราบเรียบ ฉะนั้นการที่เราจะลดปัญหาที่เกิดจากแรงหน่วง (drag force) นั้นจะต้องดำเนินการให้มีชั้นขอบเขตราบเรียบยาวเท่าที่จะเป็นไปได้ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการไหลของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก และได้นำเอาระบบควบคุมแบบทำซ้ำมาประยุกต์ในการควบคุมให้เกิดการไหลเป็นแบบราบเรียบซึ่งเป็นการหน่วงปรากฏการณ์การเกิดการไหลในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน

ตัวควบคุมแบบทำซ้ำสามารถทำได้ทั้งในระบบดิจิทัลและแอนะล็อก ส่วนในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบแอนะล็อก ซึ่งสามารถสร้างได้ไม่ยากจนเกินไป เพราะอุปกรณ์หาได้ตามแหล่งขายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยได้ การใช้งานนั้นให้ผลตอบแทนรวดเร็วต่อการปรับเปลี่ยนเวลาในการหน่วงคำสั่งและค่าใช้จ่ายในการสร้างไม่สูงมากจนเกินงบประมาณ และสามารถประยุกต์ใช้ได้ในระบบควบคุมที่ต้องการความแม่นยำสูง

2. วัตถุประสงค์

ออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบทำซ้ำเพื่อควบคุมระบบควบคุมการไหลของอากาศหลังทรงกระบอกเดียวในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน

3. ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

3.1 ออกแบบสร้างและทดลองวงจรควบคุมแบบทำซ้ำโดยใช้คลื่นเสียงเป็นตัวจับเร้า

3.2 ควบคุมการไหลของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกกลมในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน(Transition to turbulence)ให้มีการไหลกลับมาเป็นแบบคาบ

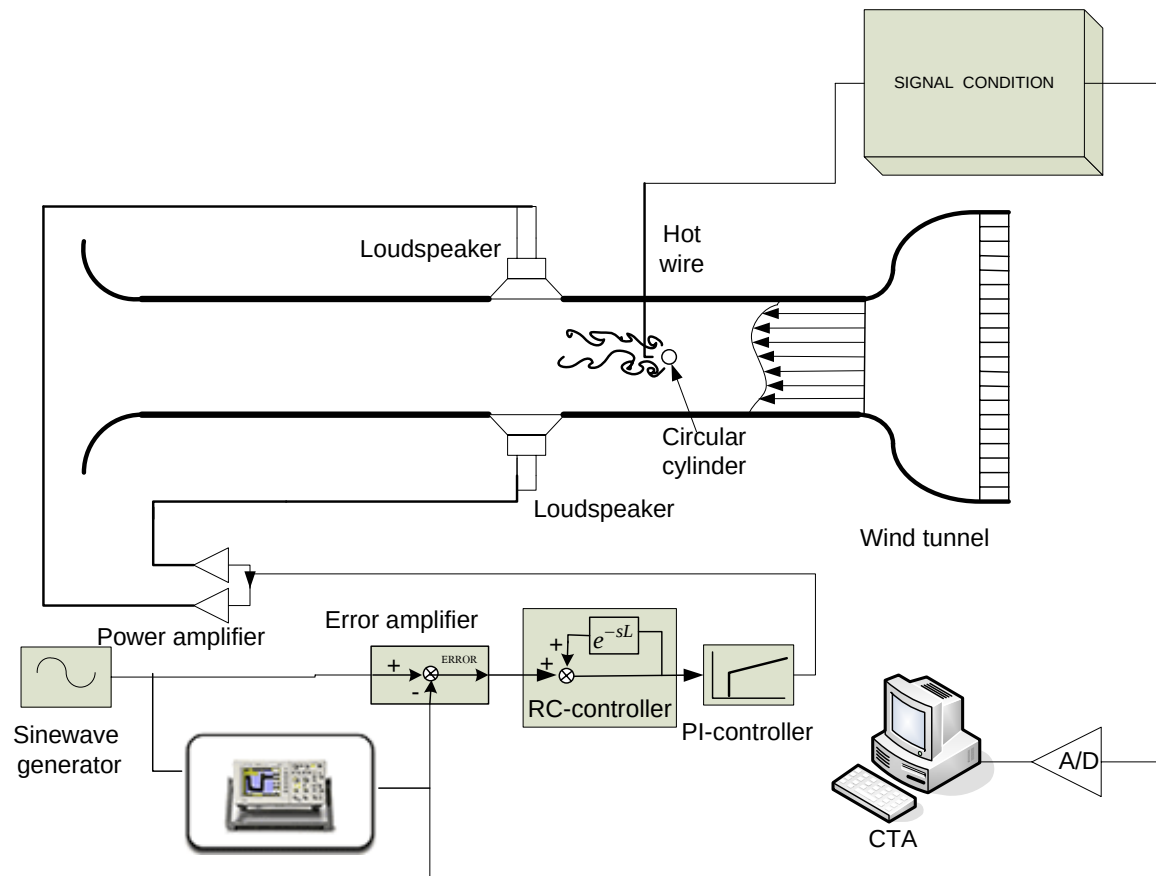
4. วิธีการทดลอง

ในโครงการวิจัยนี้ใช้การทดลองแบบจำลองในอุโมงค์ลมขนาดเล็ก ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 185 และทำการทดลอง 3 แบบดังนี้คือ

- การทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกโดยไม่มีการควบคุม
 - การทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมพีไอ
 - การทดลองควบคุมของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกตัวควบคุมพีไอร่วมกับตัวควบคุมทำซ้ำ
- การทดลองควบคุมของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกตัวควบคุมพีไอร่วมกับตัวควบคุมทำซ้ำได้แสดงไว้ใน รูปที่ 1 ส่วนการทดลองสองอันก่อนหน้าจะมีแผนภาพคล้ายกัน คือการทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมพีไอก็จะไม่มีส่วนของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ ส่วนการทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกโดยไม่มีการควบคุมก็จะตัดส่วนควบคุมทั้งหมดออกไป

ในส่วนของคุณสมบัติพื้นฐานที่ใช้ในการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

- อุณหภูมิของห้องเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส
- ความเร็วกระแสอิสระ(Free-Stream Velocity), U_∞ เท่ากับ 90 cm/s
- การติดตั้งมาตรวัดชนิดลวดร้อน ติดตั้งที่ด้านหลังของทรงกระบอกกลมจากจุดศูนย์กลางระยะห่างเท่ากับ $x/d = 2$ (near wake) และอยู่ตรงกึ่งกลางของทรงกระบอก และทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.21 มิลลิเมตร

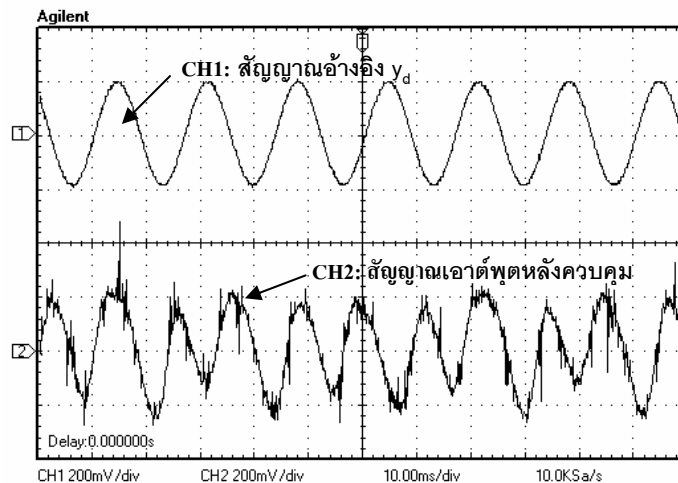


รูปที่ 1 แผนภาพการทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมแบบทำซ้ำซึ่งคลื่นเสียงเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อประยุกต์ใช้กับการสัดของกระแสหมุนวนของอากาศข้างหลังทรงกระบอกเดี่ยวในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน ในการทดลองใช้ทรงกระบอกกลมเดี่ยวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.21 มิลลิเมตร และให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็ว 0.9 เมตรต่อวินาที ที่สภาวะอากาศซึ่งทำให้ได้ค่าเลขเรย์โนลด์ประมาณ 185 โดยอยู่ในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน จุดประสงค์ในการควบคุมการไหลก็คือต้องการให้การไหลกลับเป็นลักษณะเป็นคาบ และมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับช่วงการไหลแบบราบเรียบเพื่อที่จะลดแรงหน่วงที่เกิดขึ้นในช่วงรอยต่อ

การทดลองควบคุมการไหลมีการใช้สองรูปแบบการควบคุมอย่างแรกเป็นการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยลำพังส่วนอย่างหลังจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ โดยการทดลองทั้งคู่นั้นจะใช้ค่าสัญญาณอ้างอิงเดียวกันคือ $y_d = 200 \sin(\omega t)$ ที่ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ การควบคุมด้วยวิธีพีไอสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมกรไหลในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วนให้ลดลงได้คล้ายกับการไหลในช่วงราบเรียบ และเมื่อใช้การควบคุมด้วยวิธีพีไอร่วมกับการควบคุมแบบทำซ้ำ ยังผลให้การตอบสนองเป็นคาบคล้ายกับสัญญาณอ้างอิงยิ่งขึ้นลดสภาพในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วนลงได้ดียิ่งกว่าการใช้การควบคุมด้วยวิธีพีไอบ้างแต่เพียงลำพังดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งจากงานวิจัยนี้เป็นหลักฐานที่สำคัญแสดงถึงแนวทางในการห้วงค่าเลขเรย์โนลด์ในการเกิดช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน และเป็นงานวิจัยแรกที่มีการใช้การควบคุมแบบทำซ้ำประยุกต์ใช้กับการไหลในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 2 การตอบสนองของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ ใช้สัญญาณอ้างอิง $y_d = 200 \sin(\omega t)$ ที่ความถี่ $\omega = 60$ เฮิร์ตซ์

สารบัญ

บทคัดย่อ

Abstract

Executive summary

บทที่ 1 บทนำ	1-2
1.1 ที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3-17
2.1 หลักการของการควบคุมแบบทำซ้ำ	3-7
2.2 การไหลแบบภายนอก	7-17
2.2.1 แนวคิดของชั้นขอบเขต	8-9
2.2.2 การเกิดปรากฏการณ์การแยก	9-10
2.2.3 แรงหน่วง	10-12
2.2.4 กระแสหมุนวนที่วัตถุรูปทรงกระบอกกลมที่อยู่กับที่	13
2.2.5 Strouhal number	14
2.2.6 ตัวเลขเรย์โนลด์	15-16
บทที่ 3 การทดลอง	17-30
3.1 การออกแบบวงจรควบคุมและการเตรียมการทดลอง	17-29
3.1.1 การออกแบบวงจรขยายความผิดพลาดและตัวควบคุมชนิดพีไอ	17-18
3.1.2 การออกแบบวงจรควบคุมแบบทำซ้ำชนิดแอนะล็อก	18-19
3.2 การเตรียมการทดลอง	20-25
3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง	20

3.2.2 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2.3 การจัดเตรียมการทดลอง	22-25
3.3 ผลการทดลอง	26-30
3.3.1 การทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก (ไม่มีการควบคุม)	26-27
3.3.2 ผลการทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่าน วัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	27-28
3.3.3 ผลการทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุ รูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับ ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ	29-30
บทที่ 4 บทสรุป	31
4.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง	31
4.2 ข้อเสนอแนะ	31
เอกสารอ้างอิง	32

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มา

การควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Control, RC) จะใช้กับระบบที่ต้องการสัญญาณซ้ำๆกันเป็นคาบ ซึ่งใช้วิธีการปรับปรุงคำสั่งที่จะให้กับระบบควบคุมแทนที่จะเปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ในการปรับปรุงคำสั่งต้องที่ให้กับระบบควบคุมจะต้องใช้ค่าความผิดพลาด(Error)ในคาบการทำงานที่ผ่านมา มาปรับปรุงคำสั่งที่จะให้เกิดการทำงานในคาบปัจจุบัน

การไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกกลมเดี่ยวจะทำให้เกิดการไหลวนข้างหลังทรงกระบอกเกิดขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นคาบและรูปแบบที่ซ้ำๆกันในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำ และเมื่อเลขเรย์โนลด์เปลี่ยนไปจากค่าที่น้อยไปมาก จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนไปตามค่าของมัน ที่ค่าน้อยๆการไหลที่ด้านหลังวัตถุรูปทรงกระบอกจะเกิดการกระเพื่อมเป็นฟังก์ชันคาบซ้ำๆกันดังกล่าว เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นการไหลก็จะเกิดช่วงรอยต่อขึ้นมา และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นมากการไหลก็จะเป็นแบบปั่นป่วน นอกจากนี้เป็นที่ทราบกันว่าชั้นขอบเขตของการไหลแบบปั่นป่วนมีการเกิด Skin friction มีค่าสูงมากกว่าชั้นขอบเขตของการไหลแบบราบเรียบ ฉะนั้นการที่เราจะลดปัญหาที่เกิดจากแรงหน่วง (drag) นั้นจะต้องดำเนินการให้มีชั้นขอบเขตราบเรียบยาวเท่าที่จะเป็นไปได้[15] ในงานวิจัยนี้ศึกษาการไหลของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก และได้นำเอาระบบควบคุมแบบทำซ้ำมาประยุกต์ในการควบคุมให้เกิดการไหลเป็นแบบราบเรียบซึ่งเป็นการหน่วงปรากฏการณ์การเกิดการไหลในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน

ตัวควบคุมแบบทำซ้ำสามารถทำได้ทั้งในระบบดิจิทัลและแอนะล็อก ส่วนในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบแอนะล็อก ซึ่งสามารถสร้างได้ไม่ยากจนเกินไป เพราะอุปกรณ์หาได้ตามแหล่งขายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในประเทศได้ การใช้งานนั้นให้ผลตอบแทนรวดเร็วต่อการปรับเปลี่ยนเวลาในการหน่วงคำสั่งและค่าใช้จ่ายในการสร้างไม่สูงมากจนเกินงบประมาณ และสามารถประยุกต์ใช้ได้ในระบบควบคุมที่ต้องการความแม่นยำสูง

1.1 วัตถุประสงค์

ออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบทำซ้ำเพื่อควบคุมระบบควบคุมการไหลของอากาศหลังทรงกระบอกเดี่ยวในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

- 1.2.1 ออกแบบสร้างและทดลองวงจรควบคุมแบบทำซ้ำโดยใช้คลื่นเสียงเป็นตัวจับเร้า
- 1.2.2 ควบคุมการไหลของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกกลมในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน(Transition to turbulence)ให้มีการไหลกลับมาเป็นแบบคาบ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การควบคุมการไหลมีเป้าหมายหลายประการคือควบคุม transition delay, เพิ่มแรงยก, ลดแรงหน่วงและแรงเสียดทานบนพื้นผิว, และลดเสียงรบกวนเป็นต้น ประโยชน์ที่เด่นชัดในการควบคุมการไหลก็คือในงานด้านเครื่องบินซึ่งต้องการลด skin-friction drag การลดแรงหน่วงจะเป็นพื้นฐานความรู้เพื่อประยุกต์ใช้กับเครื่องบินให้แล่นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถเดินทางได้ในระยะไกลมีความประหยัดพลังงาน มีเสียงเครื่องยนต์ที่เงียบ และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

จุดประสงค์ของการควบคุมการไหลก็เพื่อปรับปรุงระบบของกระบวนการไหลในมุมมองของเทคโนโลยีที่จะทำให้เกิดความประหยัดในด้านต่างๆและเหมาะสมกับสถานะแวดล้อม ดังนั้นการที่จะใช้วิธีที่ควบคุมเป็นหลักในการประยุกต์ด้านอุตสาหกรรมเราจะต้องรู้เงื่อนไขที่จำกัด การควบคุมการไหลประโยชน์เพื่อใช้ในอากาศยาน เรือ ปัจจุบันนี้การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบทำซ้ำได้นำมาใช้กันในระบบหลายชนิด โดยในการวิจัยนี้นำมาใช้ได้ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือควบคุมการไหลผ่านข้างหลังทรงกระบอกเดี่ยวในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้การไหลที่ช่วงรอยต่อถูกควบคุมให้มีการไหลที่เป็นคาบมากขึ้น ไม่มีการเกิดช่วงรอยต่อ ซึ่งอาจจะนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในอุตสาหกรรมการบิน เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงได้

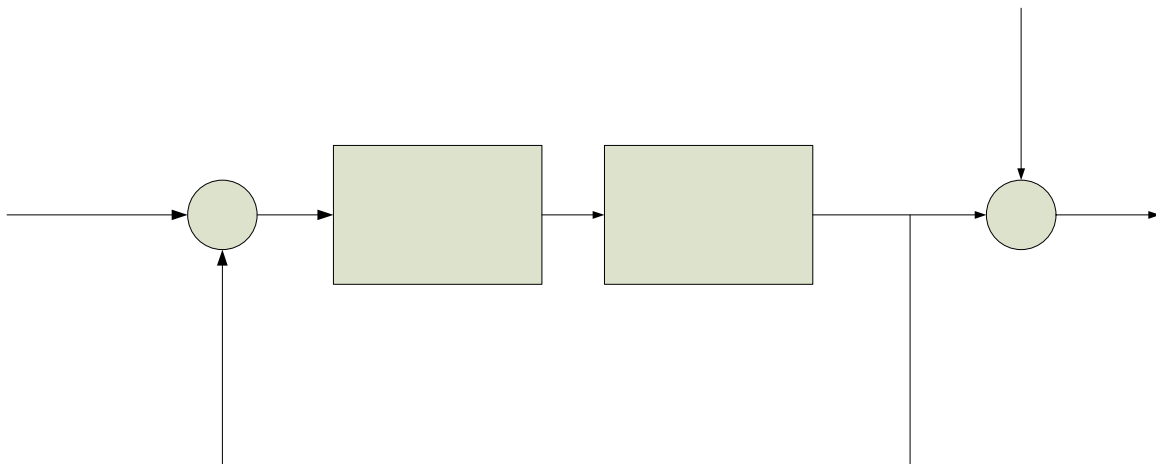
ตัวควบคุมแบบทำซ้ำสามารถสร้างได้โดยหาอุปกรณ์ตามท้องตลาด ตัวควบคุมแบบนี้ใช้พื้นฐานวงจรแอนะล็อก เป็นการลดความยุ่งยากในด้านต่างๆลงเช่น ไม่ต้องเขียนโปรแกรม ไม่ต้องมีอุปกรณ์เสริมด้านอื่นๆ การปรับค่าต่างๆทำได้สะดวก

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

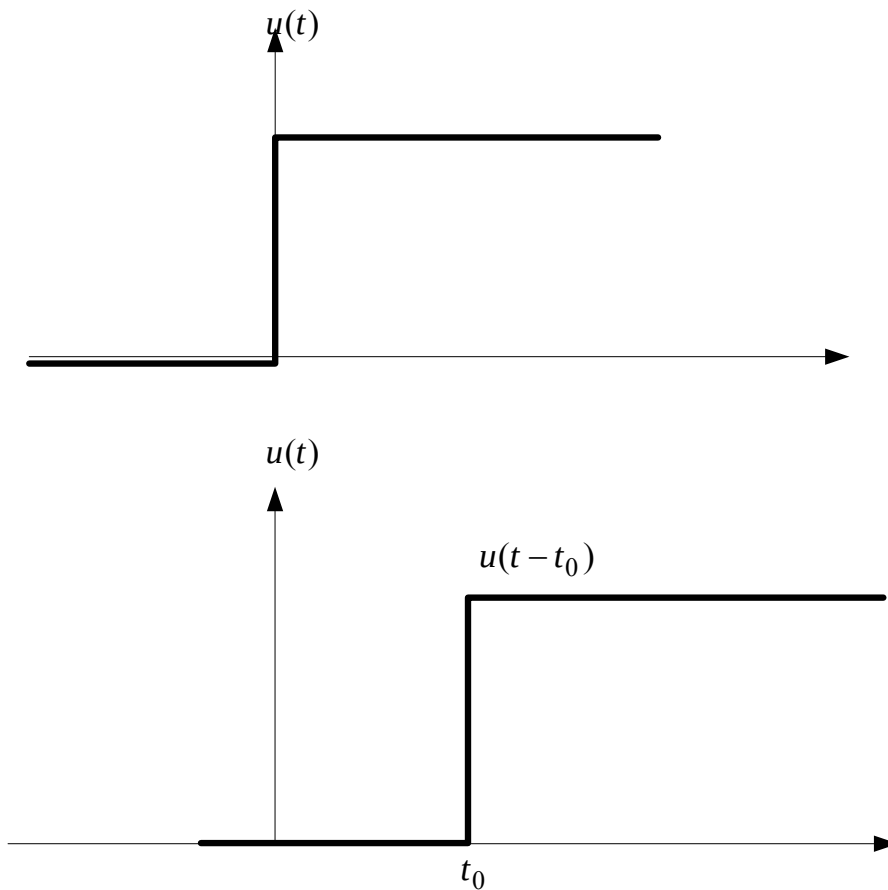
ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของการควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Control, RC) และการไหลภายนอกของไหลผ่านสิ่งกีดขวางตลอดจนปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นโดยสังเขป

2.1 หลักการของการควบคุมแบบทำซ้ำ[1]

การเพิ่มประสิทธิภาพของการติดตามแนววิถีด้วยการปรับปรุงแนววิถีอินพุต $U(s)$ ที่ให้กับระบบควบคุม $H(s)$ แสดงในรูปที่ 1 โดยใช้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นย้อนหลังกลับไปหนึ่งคาบเวลาเป็นสัญญาณในการเปลี่ยนคำสั่งเพื่อใช้ในคาบเวลาถัดไปซึ่งคือการควบคุมแบบทำซ้ำ ถ้าให้ $y(t)$ คือสัญญาณการอันหนึ่งการที่เราจะเลื่อนสัญญาณไปข้างหน้าเป็นเวลา t_0 สามารถเขียนได้เป็น $y(t - t_0)$ ตัวอย่างเช่นถ้าสัญญาณเป็นแบบขั้นที่ไม่มีการเลื่อนเวลาจะเขียนได้เป็น $u(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 2 บนส่วนถ้ามีการเลื่อนเวลาไปที่ t_0 เขียนได้เป็น $u(t - t_0)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ภาพล่าง)



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



1

รูปที่ 2.2 สัญญาณแบบขั้นที่ไม่มีการเลื่อน (บน) และสัญญาณแบบขั้นที่มีการเลื่อนเวลาไป t_0 (ล่าง)

การที่เราเลื่อนสัญญาณออกไปที่เวลา t_0 ก็คือการหน่วง (delay) สัญญาณไปที่เวลา t_0 นั้นเอง เราจะใช้คุณลักษณะนี้เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบการควบคุมที่มีการหน่วงของสัญญาณเพื่อนำไปใช้กับระบบควบคุมแบบทำซ้ำในโอกาสต่อไป

เราจะพิจารณาระบบที่เวลาต่อเนื่อง (Continuous-time System) ชนิด Single Input Single Output (SISO) โดยที่เขียนเป็นสมการระบบควบคุมแบบทำซ้ำ ซึ่งจากการใช้ความผิดพลาดของคาบเวลาที่ผ่านมา $y(t - L)$ ไปปรับปรุงคำสั่งของระบบ $u(t)$ เพื่อที่จะไปสั่งควบคุมระบบ $y(t)$ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$y(t) = y(t - L) + u(t) \quad (2.1)$$

โดยที่

0

L = จำนวนจริงบวกหรือค่าเวลาหน่วง

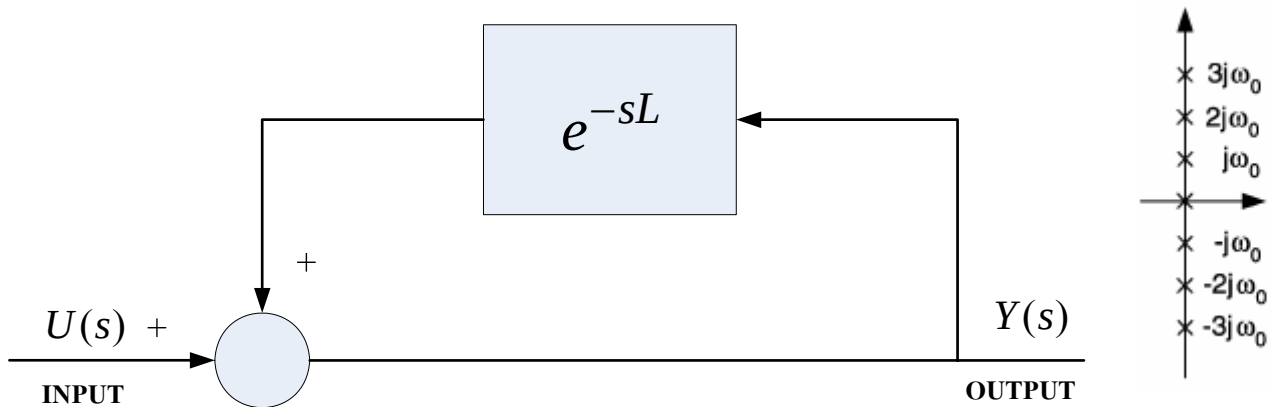
$y(t)$ = เอาต์พุต

$u(t)$ = อินพุต

จะสังเกตได้ว่า $y(t - L)$ เมื่อเทียบกับรูปที่ 2 ล่างที่เป็นสัญญาณแบบขั้นที่มีการเลื่อนเวลาไปหรือหน่วงเวลา (delay) ที่เขียนเป็นลักษณะ $u(t - t_0)$ นั่นคือ $y(t - L)$ ก็มีการหน่วงเวลาออกไปเท่ากับ L เมื่อใช้การแปลงลาปลาซ สมการที่ (2.1) จะได้

$$Y(s) = Y(s)e^{-sL} + U(s) \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) เขียนเป็นแผนภาพบล็อก (Block Diagram) ได้ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3. แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ[1]

สมการที่ (2.1) นำมาเขียนในรูปของ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ได้เป็น

$$G(s) = \frac{1}{1 - e^{-sL}} \quad (2.3)$$

โพล (Pole) ของระบบจะหาค่าได้จาก $e^{-sL} = 1$ และแสดงในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เป็น

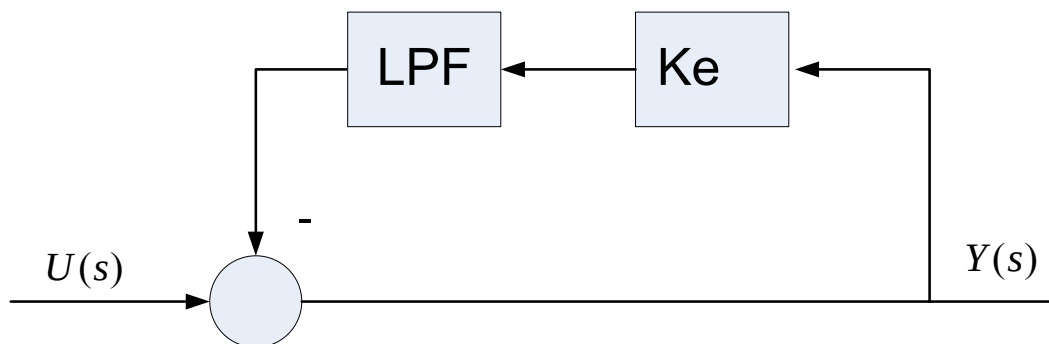
$$e^{-sL} \Big|_{s=j\omega} = 1$$

โดยที่ $\omega L = 2\pi k$ สำหรับทุกๆ $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ เมื่อเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) จะมีค่าดังสมการที่ (2.4)

$$G(s) = \frac{1}{s \prod_{k=1}^{\infty} (s^2 + k^2 \omega_0^2)} \quad (2.4)$$

โดยที่ $\omega_0 = 2\pi / L$

รูปแบบในสมการที่ (2.4) นี้จะเป็นการหน่วงเวลาที่มีค่าของโพลเป็นจำนวนอนันต์อยู่บนแกนจินตภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในตัวชดเชยจะพบว่ายังไม่สามารถนำไปใช้ได้เนื่องจากเมื่อเราแสดงความสัมพันธ์ในแผนภาพโบลด์(Bode Plot) จะเกิดค่าการโค้ง (peak) ที่ตำแหน่งของความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency $f = 1/L$ เฮิรตซ์) แอมพลิจูดที่ความถี่นี้ในทางทฤษฎีจะมีค่าอนันต์ซึ่งทำให้ระบบเสถียรภาพ ดังนั้นเราจึงต้องตัวประกอบการหน่วง(Damping factor) ที่ทุกๆ โพล โดยทำให้โพลยับมาทางซ้ายของแกนจินตภาพด้วยการใช้ $\hat{G}(s) = G(s - a)$ เมื่อนำสมบัติการเลื่อนมาประยุกต์จะได้ว่า $e^{-(s+a)L} = e^{-aL} e^{-sL}$ และกำหนดให้ $K = e^{-aL}$ ถ้า $K > 1$ โพลก็จะยับไปทางด้านขวาของแกนจินตภาพ แต่ถ้า $0 < K < 1$ โพลก็จะยับมาทางซ้ายของแกนจินตภาพ จากฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = 1/(1 - Ke^{-sL})$ ค่าของขนาดมากที่สุดนี้คือ $1/(1-K)$ และขนาดน้อยที่สุดคือ $1/(1+K)$ ทำให้ได้ค่าอัตราขยายขนาดระหว่างค่าขนาดมากที่สุดและขนาดน้อยที่สุดในหน่วยเดซิเบลมีค่าเป็น $20 \log((1+K)/(1-K))$ นอกจากนี้การใส่วงจรกรองผ่านต่ำเข้าไปจะช่วยจำกัดความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) เข้าไปในระบบควบคุมจะทำให้ได้ค่าตามต้องการ ซึ่งวงจรกรองจะใช้แบบอันดับที่หนึ่ง ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนอยู่ในรูปแบบ $G(s) = 1/(\tau s + 1)$ มีความถี่ตัดตัด (Cutoff Frequency) ที่ $1/\tau$ ดังแสดงแผนภาพไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่ได้ดัดแปลงด้วยการเพิ่มวงจรกรองผ่านต่ำ[1]

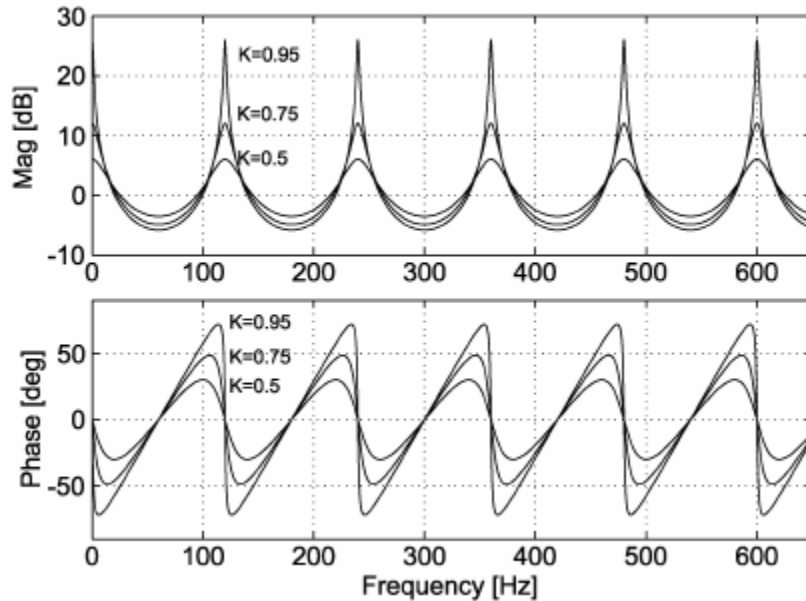
จากรูปที่ 2.4 ต้องการเลื่อนโพลจากจุดเริ่มต้น(Origin)ไปทางด้านซ้ายที่ตำแหน่ง $s = -a$ นั่นก็จะได้ $a = (-f)(\ln(K))$ rad/sec จะหาค่าของ

$$K = e^{-aL} \quad (2.5)$$

ใส่ $\ln$ กับสมการ (2.5) จะได้ $\ln(K) = \ln e^{-aL}$ ดังนั้น $a = (-1/L)\ln(K)$ เพราะว่า $L=1/f$ เราจะได้

$$a = -(f)\ln(K) \quad (2.6)$$

แผนภาพโบดแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพโบดของ $G(s)$ ที่ค่า K ต่างๆกันที่ K=0.95, K=0.75 และ K=0.5 [1]

จากสมการที่ (2.6) ถ้า $f = 120$ เฮิรตซ์, $K = 0.95$ จะได้ค่า $a = 6.156$ เรเดียนต่อวินาที ค่าขนาดสูงสุดจะได้เท่ากับ $20 \log((1/(1-K))) = 26.02$ เดซิเบล ค่าขนาดต่ำสุดจะได้เท่ากับ $20 \log((1/(1+K))) = -5.8$ dB ที่ $K=0.75$ ขนาดสูงสุดจะได้เท่ากับ 12.04 ขนาดขนาดต่ำสุดจะได้เท่ากับ -4.86 เดซิเบล และที่ $K=0.5$ ขนาดสูงสุดจะได้เท่ากับ 6.02 เดซิเบล ในขณะที่ ขนาดต่ำสุดจะได้เท่ากับ -3.52 เดซิเบล และจากรูป 2.3 ถ้าเราปรับค่า $L=8.33$ ms ($f=1/L=1/8.33$ ms) ก็จะเกิดค่าสูงสุดที่ความถี่ 120 เฮิรตซ์, 240 เฮิรตซ์, และ 360 เฮิรตซ์ ตามลำดับ

2.2 การไหลแบบภายนอก (External flow) [4]

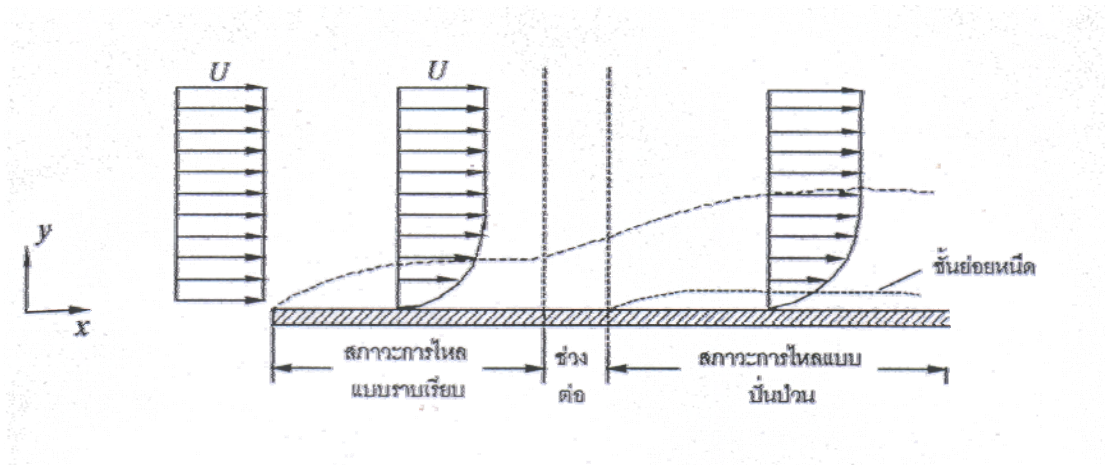
การไหลแบบภายนอก คือการไหลรอบวัตถุที่จมอยู่ในของไหล ตัวอย่างเช่น การไหลของอากาศรอบเครื่องบิน จรวด และยานยนต์ หรือการไหลของน้ำรอบเรือดำน้ำหรือปลา เป็นต้น การไหลภายนอกที่เกี่ยวข้องกับอากาศมักจะถูกเรียกว่า อากาศพลศาสตร์ (aerodynamics) และแรงที่เกี่ยวข้องกับแรงภายนอก จะสามารถแบ่งเป็นแรงที่ตั้งฉากกับการไหลและแรงที่ขนานกับการไหลซึ่งถูกเรียกว่า แรงยก

และแรงหน่วง ตามลำดับ ซึ่งแรงดังกล่าวจะมีผลมาจากความแตกต่างของความดันที่อยู่รอบวัตถุที่จมอยู่ในของไหล สำหรับแรงหน่วงจะมีผลมาจากความหนืดในชั้นขอบเขต(boundary layer)และผลมาจากความดันแตกต่างในทิศทางการไหล ปรากฏการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องจะได้กล่าวถึงไว้ในหัวข้อนี้

2.2.1 แนวคิดของชั้นขอบเขต [4]

แนวคิดของชั้นขอบเขต คือ การที่แบ่งของไหลออกเป็นสองส่วน ส่วนแรก คือ ส่วนของของไหลที่ติดกับผิวของวัตถุที่จมอยู่ในของไหลซึ่งถูกกำหนดให้มีลักษณะชั้นบางๆ ผลของแรงเสียดทานจากความหนืดในชั้นดังกล่าวจะมีพฤติกรรมของการไหลอย่างเด่นชัด ส่วนที่สองคือส่วนของการไหลที่อยู่ด้านนอกของชั้นบางๆของของไหลส่วนแรกของไหลในส่วนที่สองได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทานเนื่องจากแรงหนืดน้อยมากจนตัดผลของแรงเสียดทานได้ทิ้งได้ ของไหลในบริเวณดังกล่าวจึงอนุมานได้เป็นของไหลไร้ความหนืดได้ ชั้นบางๆในส่วนแรกจะถูกเรียกว่า ชั้นขอบเขต(boundary layer) Ludwig Prandtl เป็นผู้บุกเบิกขึ้นในปี ค.ศ. 1904 ในชั้นขอบเขตดังที่กล่าวถึงนั้น แรงเนื่องจากความหนืดและแรงเฉื่อยมีความสำคัญทั้งคู่ ซึ่งจะทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์ดังปรากฏในสมการที่ (2.7) มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะการไหลในชั้นขอบเขตเป็นอย่างมาก ความยาวคุณลักษณะที่ใช้ในการกำหนดตัวเลขเรย์โนลด์นั้นจะเป็นความยาวของวัตถุในทิศทางการไหล

กรณีที่วัตถุจมอยู่บนของไหลนั้นเป็นแผ่นราบ รูปที่ 2.6 จะแสดงการไหลผ่านแผ่นราบที่วัดด้านบนความเร็วการไหลก่อนที่จะถึงแผ่นราบจะสม่ำเสมอและมีขนาดเท่ากับ U และเมื่อของไหลเคลื่อนที่มาสัมผัสกับผิวแผ่นราบจะทำให้อนุภาคของไหลในส่วนสัมผัสผิวราบต้องลดความเร็วจาก U ลงมาเป็นศูนย์ตามความเร็วผิวราบ ทำให้เกิดรูปร่างของความเร็วจนขึ้น รูปร่างของความเร็วยังเปลี่ยนแปลงไปเมื่อของไหลไหลลึกเข้ามาในแผ่นราบมากขึ้นซึ่งจะทำให้ความหนาของชั้นขอบเขตการไหล (Boundary layer) มีขนาดเพิ่มขึ้น ชั้นขอบเขตในช่วงแรกของแผ่นจะมีสภาพการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ(Laminar) และจะเกิดเป็นช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน(Transition flow) และจากนั้นการไหลในชั้นขอบเขตจะพัฒนาเป็นการไหลแบบปั่นป่วน(Turbulence flow) ในชั้นขอบเขตที่มีการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะมีชั้นบางๆเกิดขึ้นโดยอยู่ชิดกับผิวของแผ่นราบ ชั้นบางๆดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ชั้นย่อยหนืด (Viscous sublayer)



รูปที่ 2.6 การไหลในชั้นขอบเขต [4]

พารามิเตอร์ที่เป็นกำหนดสภาพการไหลในชั้นขอบเขตคือ ตัวเลขเรย์โนลด์ซึ่งจะเขียนได้เป็น

$$Re_x = \frac{\rho U x}{\mu} \quad (2.7)$$

โดยที่ x คือ ค่าระยะตามการไหลที่วัดจากขอบด้านหน้าของแผ่นราบ

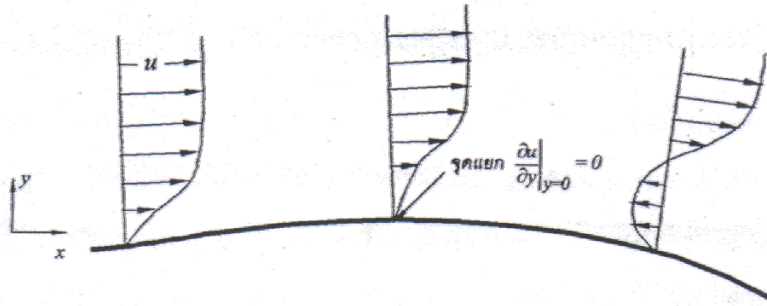
จากการทดลองจะพบว่า สำหรับการไหลผ่านแผ่นราบนั้น สภาพการไหลในชั้นขอบเขตจะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้คือ

- ก) ชั้นขอบเขตจะมีสภาพการไหลแบบราบเรียบเมื่อ $Re_x < 3 \times 10^5$
- ข) ชั้นขอบเขตจะมีสภาพการไหลที่อาจเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนหรืออีกนัยหนึ่งชั้นขอบเขตอยู่ในสภาพการไหลแบบช่วงต่อเมื่อ $3 \times 10^5 < Re_x < 3 \times 10^6$
- ค) ชั้นขอบเขตจะมีสภาพการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อ $Re_x > 3 \times 10^6$

2.2.2 การเกิดปรากฏการณ์การแยก (Separation) [4]

การไหลของของไหลผ่านวัตถุโดยทั่วไปนั้น อาจเจอสถานะที่มีค่าความดันแตกต่างในการไหลได้ 3 แบบคือ 1.)สถานะค่าความดันแตกต่างเป็นศูนย์ 2.)สถานะที่มีค่าความดันแตกต่างที่เป็นลบและ 3.)สถานะที่มีค่าความดันแตกต่างเป็นบวก ในกรณีที่ความดันแตกต่างเป็นลบแสดงว่าความดันที่ต้นทางมีค่าสูงกว่าความดันที่ปลายทาง ในกรณีที่ความดันแตกต่างเป็นบวกแสดงว่าความดันที่ต้นทางมีค่าน้อยกว่าความดันที่ปลายทาง ในกรณีของการไหลผ่านผิวของวัตถุที่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างเป็นบวก การไหลจะถูกชะลอให้ไหลช้าลงจากค่าความดันที่ปลายทางซึ่งสูงกว่าความดันที่ต้นทาง และหากว่าความ

ดันแตกต่างมีขนาดมากเพียงพอ การไหลจะถูกชะลอให้ช้าลงเรื่อยๆจนกระทั่งเกิดเงื่อนไขที่ค่าความชันของความเร็วที่ผิวของวัตถุมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งสภาวะดังกล่าวเรียกว่า สภาวะการแยก (Separation) และต่อจากนั้นจะเกิดการไหลย้อนกลับขึ้นดังรูป 2.7 จะแสดงถึงสภาวะการเกิดการแยกขึ้น การแยกดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติของการไหลที่เรามากไม่ให้เกิดขึ้น เพราะจะเกิดการไหลย้อนกลับหรือการไหลจะหลุดออกจากผิว ผลก็คือจะก่อให้เกิดแรงเสียดทานที่เกิดจากค่าแรงดันแตกต่างสูงมาก



รูปที่ 2.7 แสดงถึงรูปร่างความเร็วของการไหลที่เกิดสภาวะการแยก[4]

การมีค่าความดันแตกต่างที่เป็นบวกนั้นเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเกิดสภาวะไหลแยกขึ้น แต่การมีค่าความดันแตกต่างดังกล่าวไม่จำเป็นจะต้องเกิดปรากฏการณ์การแยกเสมอไป การที่จะเกิดปรากฏการณ์การแยกขึ้นได้นั้นจำเป็นต้องมีการเกิดค่าความดันแตกต่างที่เป็นบวก และเงื่อนไขอื่นที่เหมาะสมประกอบกันด้วย

2.2.3 แรงหน่วง[4]

แรงหน่วง(drag force) ที่เกิดขึ้นบนวัตถุเนื่องจากการไหลผ่านของของไหลจะสามารถแบ่งเป็นแรงหน่วงที่เกิดจากความเค้นเฉือนและแรงหน่วงที่เกิดจากความดัน แรงที่เกิดจากความเค้นเฉือนซึ่งบางทีเรียกว่า แรงเสียดทานผิว จะมีค่าเท่ากับผลคูณของความเค้นเฉือนกับพื้นที่ผนังกับพื้นที่ที่ถูกกระทำ

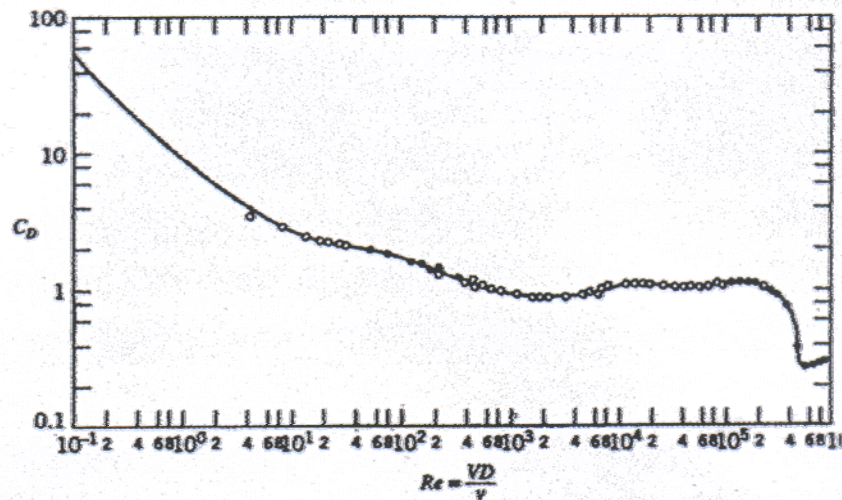
$$d\vec{F}_{shear} = \vec{\tau}_w dA \quad (2.8)$$

สำหรับแรงหน่วงที่เกิดจากความดันจะมีค่าเท่ากับผลคูณของความดันที่กระทำต่อวัตถุกับพื้นที่ที่ถูกกระทำ

$$d\vec{F}_{pressure} = -p d\vec{A} \quad (2.9)$$

วัตถุรูปร่างอื่นที่ไม่ใช่แผ่นราบที่จมอยู่ในของไหลจึงมักจะมีแรงหน่วงที่มีผลมาจากทั้งแรงเค้นเฉือนที่ผนังและแรงหน่วงจากความดันประกอบกันโดยขึ้นกับเงื่อนไขของการไหล ซึ่งจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์

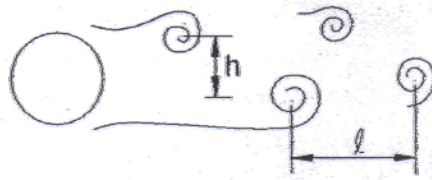
แรงหน่วงของวัตถุรูปร่างอื่นๆเหล่านั้นมักนิยมหาค่าจากการทดลอง เนื่องจากแรงหน่วงที่เกิดจากค่าความดันนั้นหากต้องการหาค่าด้วยวิธีทฤษฎีวิเคราะห์ จะซับซ้อนและลำบากยุ่งยากมาก และในบางครั้งอาจหาไม่ได้เลยหากเกิดปรากฏการณ์การแยกชั้นบนผิวของวัตถุ ตัวอย่างของวัตถุที่แรงหน่วงเกิดจากทั้งความเค้นเฉือนที่ผนังและจากความดันคือ วัตถุรูปทรงกระบอกเรียบ ผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกเรียบถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงถึงสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกเรียบ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่เกิดขึ้นจะมีทั้งแรงหน่วงที่เกิดจากความเค้นเฉือนที่ผนังกับแรงหน่วงที่เกิดจากความดันประกอบกัน เมื่อการไหลมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 10 การไหลผ่านรูปทรงกระบอกจะค่อนข้างช้า ในการไหลลักษณะนี้จะไม่เกิดปรากฏการณ์การแยก แรงหน่วงที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเกิดจากผลของความเค้นเฉือนที่ผิวเป็นหลัก ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่มีค่าสูง เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่มีค่าลดลงเนื่องจากเกิดปรากฏการณ์การแยก แรงหน่วงจะเป็นผลรวมระหว่างแรงหน่วงจากความเค้นเฉือนที่ผนังกับแรงหน่วงจากความดัน ซึ่งสัดส่วนของแรงทั้งสองส่วนจะแปรไปเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น กล่าวคือส่วนของแรงหน่วงที่เกิดจากความเค้นเฉือนที่ผนังลดลง เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น และเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าประมาณ 5×10^3 จุดที่เกิดการแยกจะเคลื่อนตัวขึ้นไปอยู่ที่ขอบด้านบนและด้านล่างของรูปทรงกระบอก ซึ่งเป็นจุดที่มีความเร็วของของไหลที่อยู่นอกชั้นขอบเขตสูงทำให้ความดันด้านหลัง (wake) มีค่าต่ำ ส่งผลให้ค่าความแตกต่างความดันบนวัตถุมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงมีค่าสูงขึ้น

ปรากฏการณ์อีกประการที่เกิดขึ้นเมื่อมีการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกคือการเกิดปรากฏการณ์การแยกและเกิดการไหลย้อนกลับของของไหลที่หลุดออกจากผิวแล้วม้วนตัวอยู่ในกระแสด้านหลัง ที่เรียกว่ากระแสมวนวน (vortex) ซึ่งเมื่อการไหลมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ถึงค่าๆหนึ่ง จะเกิดกระแสมวนวนที่ด้านหลังทรงกระบอกเป็นคู่ และเมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นกระแสมวนวน เหล่านี้จะหลุดออกจากตำแหน่งเริ่มต้น เคลื่อนที่ไปด้านหลังสลับกันไปในขณะที่จะมีกระแสมวนวนตัวใหม่เกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่าเส้นทางกระแสมวนวนคาร์มาน (von Karman vortex street) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงถึงการเส้นทางกระแสมวนวนคาร์มาน หลังวัตถุรูปทรงกระบอก

การหลุดเป็นแถวของชุดเส้นทางกระแสมวนวนคาร์มาน เหล่านี้ไปทางกระแสด้านหลังวัตถุโดยที่รูปร่างของการหลุดและการเคลื่อนที่ของชุดกระแสมวนวน เหล่านี้จะอยู่ในสภาพเสถียรความสัมพันธ์ของรูปร่างของการเคลื่อนที่และหลุดตัวของกระแสมวนวน เป็น

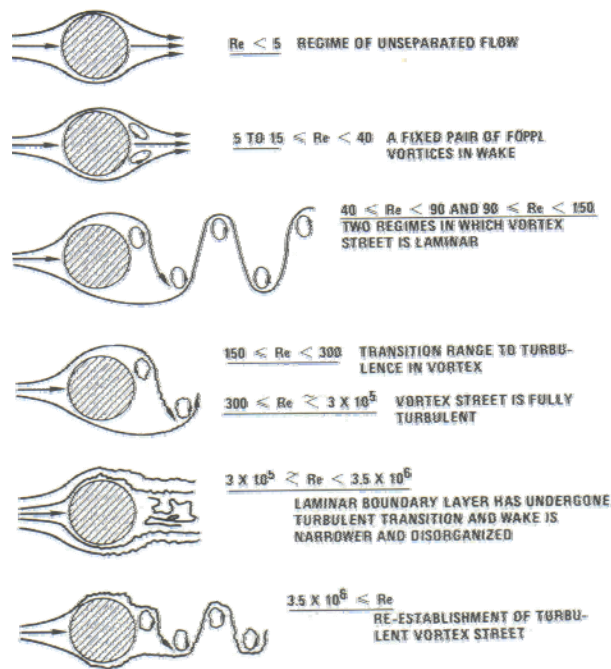
$$\frac{h}{l} = 0.281 \quad (2.10)$$

โดยที่ h และ l เป็นระยะห่างระหว่างกระแสมวนวน แต่ละวงตามรูปที่ 2.9 คาร์มานยังเสนอความสัมพันธ์ในการหาค่าแรงต่อหน่วยความยาวของวัตถุรูปทรงกระบอกว่ามีค่าเป็น

$$D = \rho U^2 h \left[2.83 \frac{u_s}{U} - 1.12 \left(\frac{u_s}{U} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

โดยที่ u_s เป็นความเร็วของกระแสมวนวน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วในกระแสนการไหลอิสระค่า h และ u_s/U นั้นสามารถหาได้จากการทดลอง

2.2.4 กระแสหมุนวนที่วัตถุรูปทรงกระบอกกลมที่อยู่กับที่ [3]



รูปที่ 2.10 การไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกกลมผิวเรียบที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่างกัน[5]

การผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกในรูปที่ 2.10 ที่ค่าของตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 5 ของเหลวจะไหลตามเส้นขอบของทรงกระบอก ช่วง $5 \leq Re \leq 45$ จะเกิดการแยก (separation) ที่ด้านหลังของวัตถุรูปทรงกระบอกพร้อมทั้งจะมีกระแสหมุนวนที่สมมาตรกัน (ตรงกัน) เกิดที่ใกล้ด้านหลังทรงกระบอก ส่วนระยะห่างระหว่างกระแสหมุนวนจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ ถ้าค่า เลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นกระแสหมุนวนด้านหลังจะขาดเสถียรภาพ และระยะห่างระหว่างกระแสหมุนวนจะแยกตัวออก ช่วง $Re = 150$ และ 300 กระแสหมุนวนจะแยกตัวออกจากแรงกระบอกกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วน แม้ว่าชั้นขอบเขตการไหลบนทรงกระบอกกลมจะเป็นแบบราบเรียบ เลขเรย์โนลด์ย่าน $300 < Re < 1.5 \times 10^5$ จะเรียกว่า Subcritical ในย่านนี้ชั้นขอบเขตแบบราบเรียบจะแยกออกทำมุม 80 องศาติดไปทางด้านหลังจากจมูกของทรงกระบอกและกระแสหมุนวนจะหลุดออกมาอย่างแรงและเป็นช่วงๆ ช่วงรอยต่อ $1.5 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ ชั้นขอบเขตของทรงกระบอกจะกลายเป็น Turbulent จุดการแยกออกจะเคลื่อนไปด้านท้าย 140 องศาและสัมประสิทธิ์การลาก (C_D) ของทรงกระบอกจะลดลงถึง 0.3

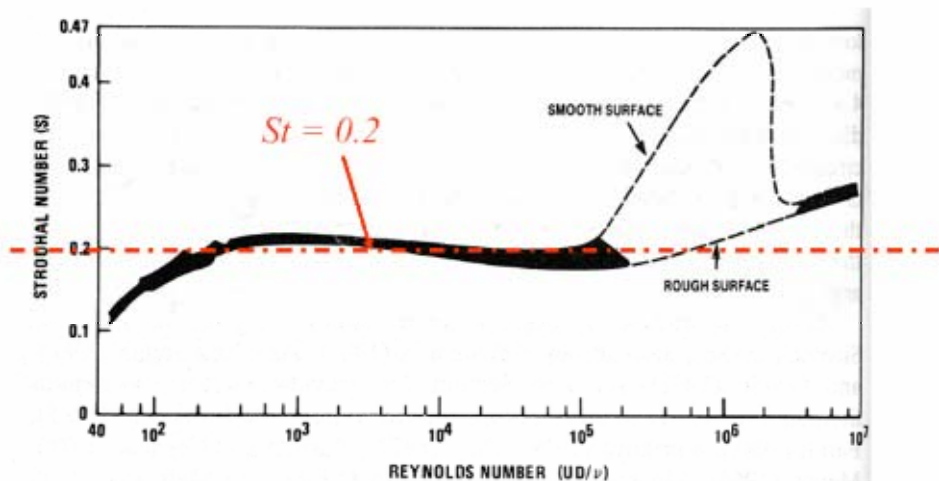
2.2.5 Strouhal number (S_t) [5]

S_t เป็นตัวแปรไร้มิติที่เป็นสัดส่วนคงที่ ระหว่าง ความถี่ของการปล่อย Vortex , f_s และความเร็วในการไหลอิสระ U_∞ เขียนสมการได้เป็น

$$f_s = S_t U_\infty / d \quad (2.12)$$

โดยที่ d = circular cylinder diameter

U_∞ และ d จะต้องสอดคล้องกันคือถ้า U_∞ มีหน่วยเป็นเมตร/วินาที d ต้องมีหน่วยเป็นเมตรหรือถ้า U_∞ มีหน่วยเป็นนิ้ว 1 วินาที d จะต้องมีหน่วยเป็นนิ้ว Strouhal Number ของวัตถุรูปทรงกระบอกกลม อยู่กับที่ในช่วงการไหลที่ช้ากว่าความเร็วเสียง เป็นฟังก์ชันของสมการ $Re = U_\infty d / \nu$ พื้นผิวทางกระบอกกลมที่เรียบและขรุขระได้แสดงว่าของ S_t ในรูป 2.11 จากรูปเราจะพบว่าค่าของ S จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.2



รูปที่ 2.11 Strouhal number-Reynolds number relationship for circular cylinders [3]

2.2.6 ตัวเลขเรย์โนลด์ [3]

ตัวเลขเรย์โนลด์จะขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลอย่างไหลอย่างอิสระ (Free Stream Velocity), U_∞ และเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก, d เขียนสมการได้เป็น

$$Re = U_\infty \rho d / \mu \quad (2.13)$$

โดยที่

$$U_\infty = \text{Free-Stream Velocity} = 0.9 \text{ m/s}$$

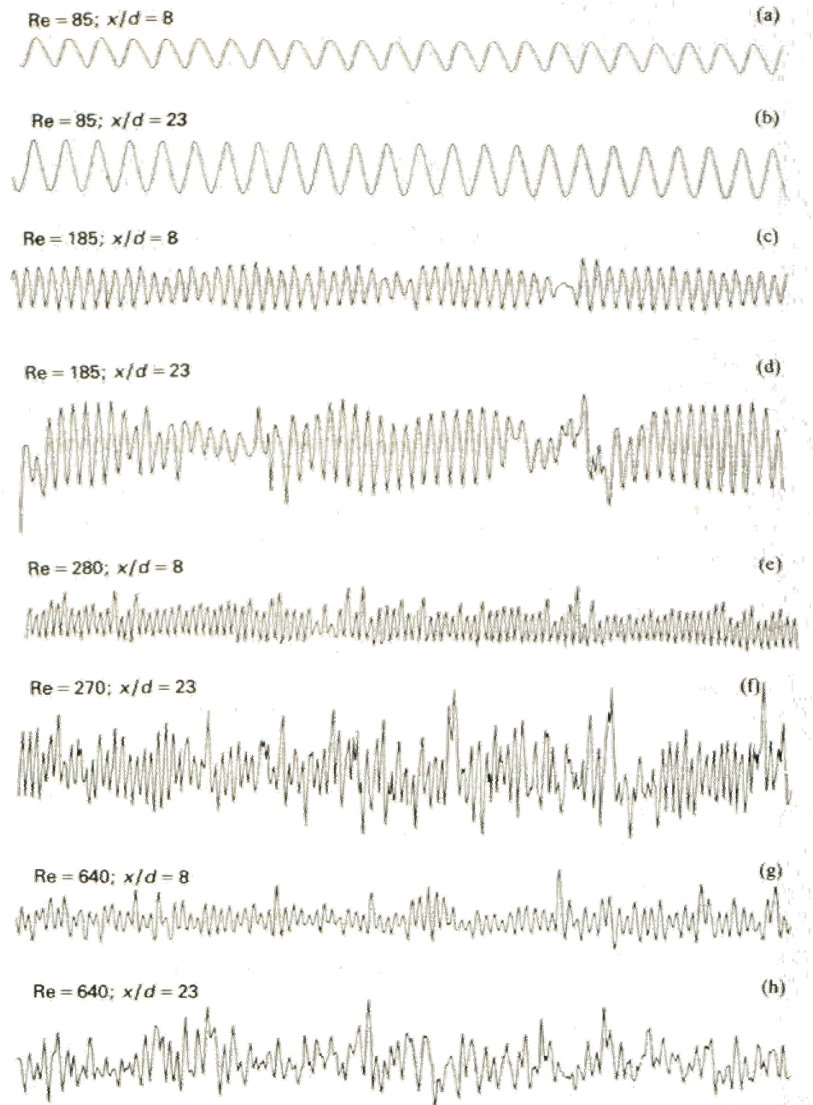
$$\rho = \text{Mass Density of Air} = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \text{Coefficient of viscosity} = 1.835 \times 10^{-5} \text{ s/m}^2$$

$$d = \text{circular cylinder diameter} = 0.321 \times 10^{-2} \text{ m}$$

เป็นค่าที่ใช้ในการทดลองนี้ รูปที่ 2.12 แสดงอนุกรมของ Oscillogram ที่จุดสองจุดซึ่งสัมพันธ์กันกับวัตถุรูปทรงกระบอกที่อยู่ในอุโมงค์ลม รูป 12 (a) และ (b) จะเห็นว่าการเกิดเส้นทางกระแสหมุนวนที่ผ่านจุดสังเกตจะมีการกระเพื่อมเป็นไซน์ซอยด์ (Sinusoidal) ความถี่ของไซน์ซอยด์ จะสัมพันธ์กันกับค่าของ $St U_\infty / d$

ในรูป 2.12 เป็นการเปรียบเทียบว่าเกิดอะไรขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่ม การเปรียบเทียบกันระหว่างค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากันที่ $Re = 85$ รูปที่ 2.12 (a) กับ (b) แต่แตกต่างกันที่ x/d จะพบว่ามีความสม่ำเสมอของการกระเพื่อมดี ที่ $Re = 185$ ความสม่ำเสมอของการกระเพื่อมหายไปเกิดสภาวะช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน ขึ้นตามรูป 2.12 (c) และ (d) เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นถึง 280 รูป 2.12 (e) และ (f) จะเกิดสภาวะปั่นป่วน และที่ 2.12 (g) กับ (h) Re มีค่า 680 จะเกิดสภาวะการกระเพื่อมที่สภาวะปั่นป่วนมากกว่าเดิม



รูปที่ 2.12 Oscillogram ของการกระเพื่อมในกระแสไหลหลังวัตถุทรงกระบอกที่ค่าเรย์โนลด์ต่างๆ[2]

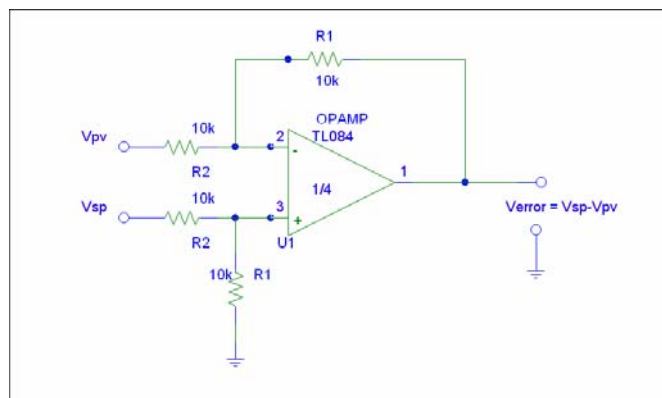
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสิ่งกีดขวางเป็นทรงกระบอกกลมในการทำให้เกิดปรากฏการณ์กระแสหมุนวนข้างหลังทรงกระบอก แล้วจึงสร้างระบบควบคุมแบบทำซ้ำโดยใช้เสียงเป็นตัวจับเร้าดังจะได้นำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 การออกแบบวงจรควบคุมและการเตรียมการทดลอง

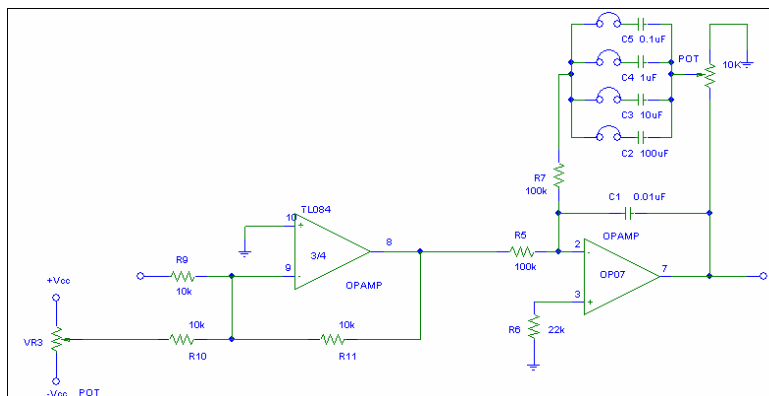
3.1.1 การออกแบบวงจรขยายความผิดพลาดและตัวควบคุมชนิดพีไอ

การออกแบบวงจรขยายความผิดพลาดเราได้เลือกการจัดวงจรเป็นแบบวงจรขยายความแตกต่าง (Difference amplifier) ที่สร้างจากวงจรขยายเชิงดำเนินการ (Operational amplifier) หรือเรียกสั้นๆว่าออป-แอมป์ (Op-Amp) โดยจะเลือกใช้ไอซีเบอร์ TL084 ที่ภายในตัวดังมีออป-แอมป์จำนวนสี่ตัว และมีคุณสมบัติที่ดีคือมีกระแสออฟเซต (Offset Current) และกระแสไบอัสต่ำ ซึ่งความสัมพันธ์ $V_{error} = R_1/R_2 (V_{sp} - V_{pv})$ เราต้องการอัตราขยายของวงจรเป็นหนึ่งนั่นคือ $R = R_2 = R_1$ ให้มีค่าเท่ากับ $10\text{ K}\Omega$ จะได้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรขยายความผิดพลาดที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1

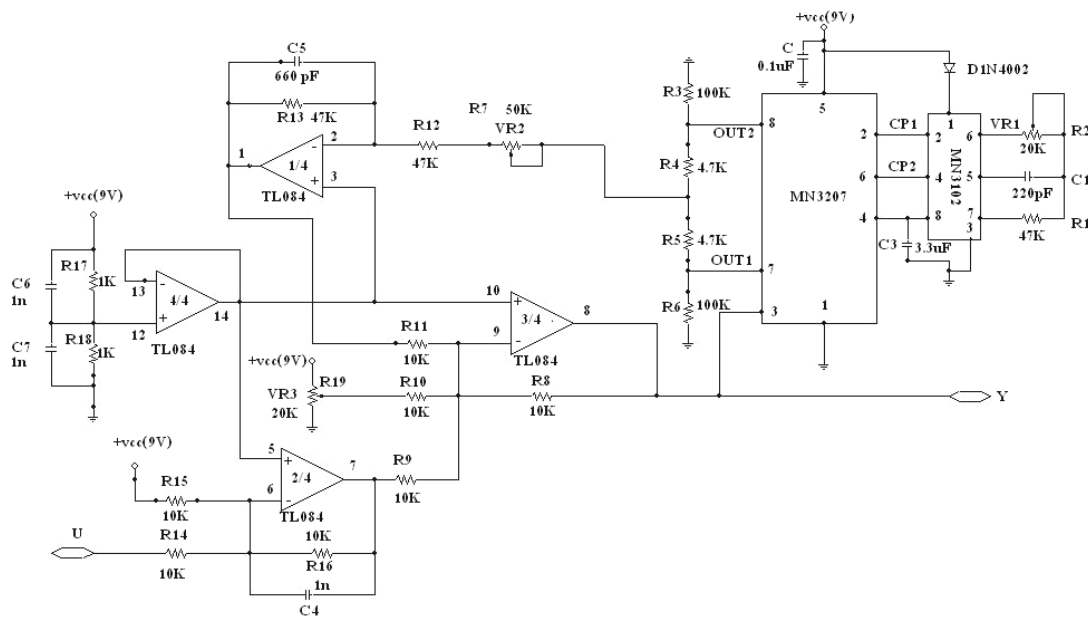
การออกแบบวงจรควบคุมชนิดพีไอนั้นต้องสามารถปรับค่าของพีไอให้เหมาะกับระบบที่จะควบคุม การเลือกออป-แอมป์ใช้ไอซีเบอร์ OP07 ที่เรียกว่า Precision Amplifier ได้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมชนิดฟีดแบ็ค

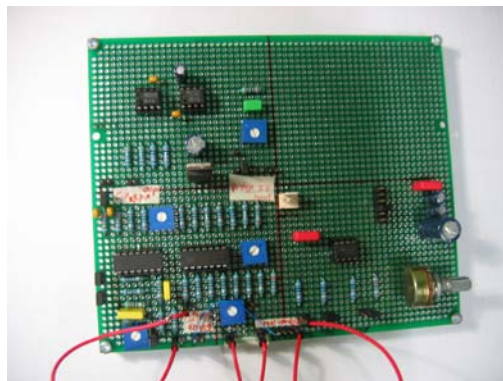
3.1.2 การออกแบบวงจรควบคุมแบบทำซ้ำชนิดแอนะล็อก

ตัวควบคุมแบบทำซ้ำโดยวงจรแอนะล็อก (Analog) รูปวงจรแสดงในรูปที่ 3.3 หัวใจหลักของวงจรอยู่ที่ไอซีเบอร์ MN3107 และ MN3102 โดยไอซี MN3207 ทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงเวลาและมีคุณสมบัติสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise) มีพิสัยพลวัต (Dynamic Range) เท่ากับ 3 เดซิเบล ใช้เทคโนโลยี Bucket Brigade Delay (BBD) เป็นตัวหน่วงเวลายาวนานได้ถึง 1024 ตอน (Stage) หรือหน่วงเวลาได้ถึง 51.2 ms ปกติไอซีในวงจรนี้จะใช้เป็นตัวกำเนิด Reverberation effect ในอุปกรณ์เครื่องบันทึกเสียงที่สามารถใช้ไฟฟ้าได้ในช่วง 4 ถึง 10 โวลต์ ไอซี MN 3207 ต้องใช้ไอซีเบอร์ MN3102 ประกอบกันโดยจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสัญญาณนาฬิกาเพื่อกำหนดช่วงหน่วยเวลาให้กับระบบ แหล่งจ่ายไฟของระบบไอซีทั้งสองตัวใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว สัญญาณนาฬิกาของระบบ (f_{osc}) คำนวณค่าโดยประมาณจาก $f_{osc} = 1/(2R_2 C_1)$ โดยให้ $R_1 \gg R_2$ ไอซี MN3102 จะสร้างสัญญาณพัลส์ ที่ขา CP1, CP2 (ขา 2 และ 4) ขาทั้งสองจะสร้างความถี่สลับไปมาแต่ จะความถี่เดียวกัน ไอซีเบอร์นี้มีจำนวน Stages เท่ากับ 1024 Stages และในการหน่วงเวลาคำนวณได้จาก $t_{delay} = 1024/(2f_{osc})$ ในวงจรรูป 3.3 จะมีตัวปรับค่า K ของวงจรโดยมีค่า $K = R_{13}/(R_{12} + VR_2)$ ค่าของ K สามารถปรับได้ในช่วง 0.48 ถึง 1 เท่า ไอซี TL 084 สามารถประยุกต์ใช้ได้ในงานหลายชนิด หาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ราคาไม่แพง มีคุณสมบัติที่ดี ดังนี้คือ มีกระแสออฟเซต (Offset Current) และกระแสไบอัสที่ต่ำมีภาคป้องกันเอาต์พุตลัดวงจร และทำงานด้วยความเร็วสูง ภายในมีออป-แอมป์สี่ตัว ออป-แอมป์ตัวที่ 1/4 จัดรูปแบบวงจรขยายแบบลบที่มีอัตราขยาย $K = R_{13}/(R_{12} + VR_2)$ โดยที่ C5



รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมแบบทำซ้ำ

ต่อระหว่างขา 2 (ขาที่ 2) กับขาเอาต์พุต (ขา 1) จัดวงจรเป็นกรองแบบผ่านต่ำ (Low Pass filter) มีจุดตัดที่ $1/(2\pi RC)$ ต่ำสุดเป็น 2.4 กิโลเฮิร์ตซ์ และสูงสุดเป็น 5.13 เฮิร์ตซ์ จะช่วยลดสัญญาณรบกวน ออป-แอมป์ตัวที่ 3/4 จัดวงจรแบบวงจรรวมกลับขั้วสัญญาณ (Inverting Summer) เพื่อที่จะรับสัญญาณจากอินพุต U ที่กลับเฟสโดยออป-แอมป์ตัวที่ 2/4 แล้วบวกกับสัญญาณที่ออกจากวงจรหน่วงเวลาที่ขา 1 และออกเป็นเอาต์พุตของวงจรควบคุมแบบทำซ้ำ จะสังเกตว่าไอซี MN3207 ที่ขา 3 จะเป็นอินพุตของวงจรหน่วงเวลานั้นเอง ในการประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดตั้งแต่วงจรขยายความผิดพลาด วงจรควบคุมชนิดพีไอและวงจรควบคุมแบบทำซ้ำใช้การประกอบลงในแผ่นทองแดงด้วยวิธีการใช้โยงสายต่อกัน โดยจัดแบ่งวงจรเป็นส่วนๆ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การประกอบของวงจรขยายความผิดพลาด วงจรควบคุมชนิดพีไอและวงจรควบคุมแบบทำซ้ำ

3.2 การจัดเตรียมการทดลอง

การทดลองการควบคุมแบบทำซ้ำโดยใช้วงจรแอนะล็อก มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะควบคุมการไหลของของไหลที่ผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกกลมซึ่งมีการไหลในช่วง รอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน ($Re = 185$) ให้ไหลเป็น Periodic ด้วยวิธีการควบคุมแบบทำซ้ำ ในบทนี้เราจะทดลองเป็น 3 อย่างคือ

- การทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก (ไม่มีการควบคุม)
- การทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมพีไอ
- การทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกตัวควบคุมพีไอร่วมกับตัวควบคุมทำซ้ำ

3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. อุโมงค์ลม(Wind tunnel) มีขนาดส่วนทดสอบ $W=0.12m$, $H=0.59m$ (ตรงที่ติดตั้ง วัตถุทรงกระบอกและ Hot-Wire) สามารถปรับอัตราการไหลของลมด้วยการปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ด้วยวิธีการใช้ Inverter ปรับความถี่ให้กับมอเตอร์
2. วัตถุรูปทรงกระบอก (Circular Cylinder) ทำจากเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d=3.21mm$
3. มาตรวัดชนิดลวดร้อน (Hot-wire probe) DANTEC 55 P14 สายนำสัญญาณยาว 4 เมตร ติดตั้งห่างจากวัตถุรูปทรงกระบอก x/d เท่ากับ 2
4. วงจรขยายความผิดพลาด (error amplifier) ใช้ IC เบอร์ TL 084 มีอัตราการขยาย 1 เท่า ดังแสดงในวงจรรูปที่ 3.1
5. ตัวควบคุมแบบพีไอ (Proportional Plus Integral Controller, PI-Controller) ใช้ IC เบอร์ OP-07 (Precision Operational Amplifier) สามารถปรับค่าของ P และ I ได้
6. เครื่องขยายเสียง ขนาด 200 วัตต์
7. ลำโพงยี่ห้อ โซนี่ทนกำลังขับสูงสุด 130 วัตต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำโพง 13cm 1 คู่
8. DANTEC CTA System
9. ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Controller) ปรับช่วงเวลาหน่วงได้ 2.56 ถึง 51.21ms
10. เครื่องกำเนิดคลื่นไซน์
11. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ
12. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป

3.2.2 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง

-อุณหภูมิของห้องเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

-ความเร็วกระแสอิสระ(Free-Stream Velocity), U_∞ เท่ากับ 90 cm/s

-การติดตั้งมาตรวัดชนิดลวดร้อน ติดตั้งที่ด้านหลังของทรงกระบอกกลมจากจุดศูนย์กลาง ระยะห่างเท่ากับ

$x/d = 2$ (near wake) และอยู่ตรงกึ่งกลางของทรงกระบอก

-ตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = U_\infty \rho d / \mu$

U_∞ = Free-Stream Velocity = 0.9 m/s

ρ = Mass Density of Air = 1.18 kg/m^3

μ = Coefficient of Viscosity = $1.835 \times 10^{-5} \text{ s/m}^2$

d = Circular Cylinder Diameter = $0.321 \times 10^{-2} \text{ m}$

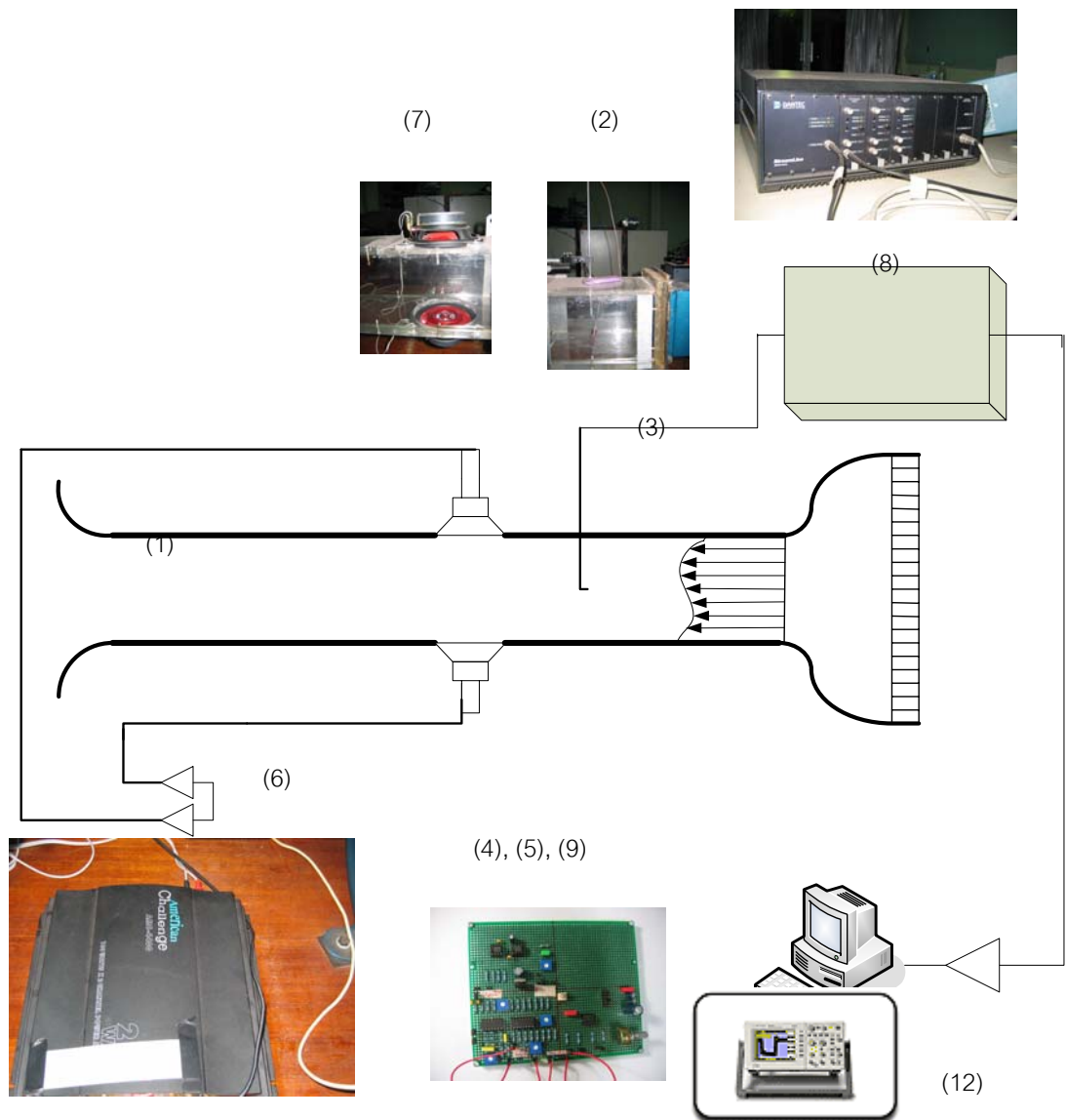
แทนค่าจะได้ $Re = (0.9)(1.18)(0.321 \times 10^{-2}) / (1.835 \times 10^{-5}) = 185.77$

$f_s = S U_\infty / d$

S = Strouhal Number = 0.2

แทนค่าจะได้ $f_s = (0.2)(0.9) / (0.321 \times 10^{-2}) = 56.07 \text{ เฮิรตซ์}$

3.2.3 การจัดเตรียมการทดลอง

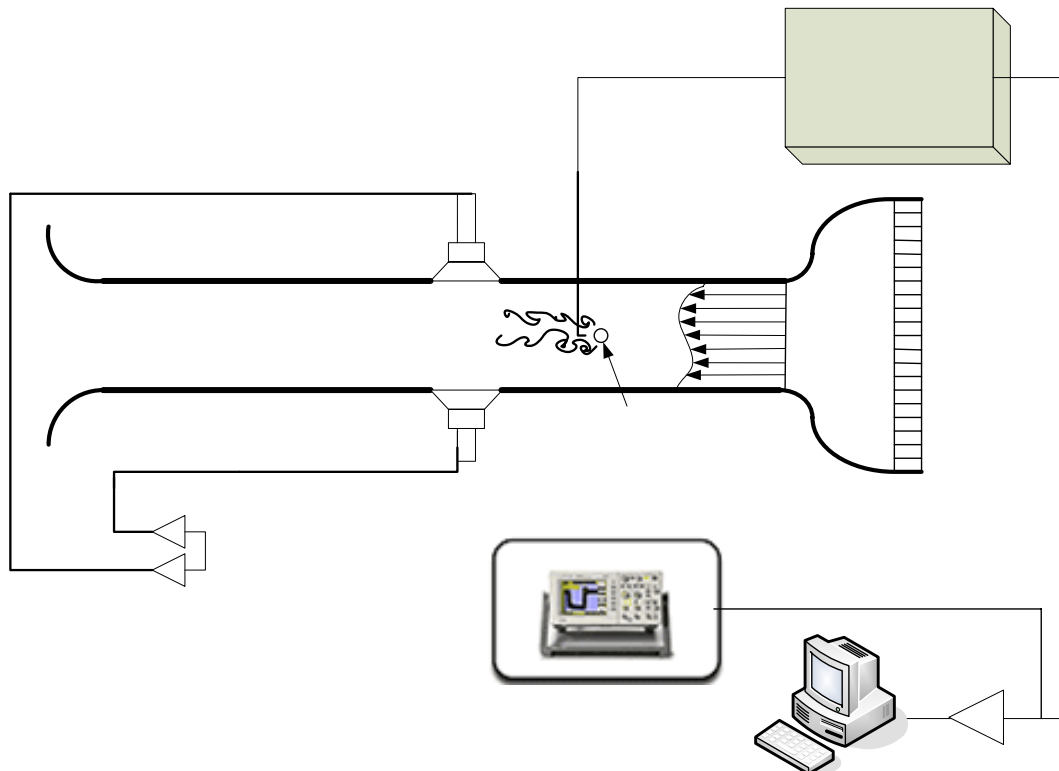


รูปที่ 3.5 แผนภาพการทดลอง

การเตรียมการทดลองตามรูปที่ 3.5 แผนภาพจะแสดงส่วนต่างๆที่ต่อเข้าด้วยกันเริ่มจากการต่อเครื่องขยายเสียงไปยังลำโพงต้องระวังไม่ให้ต่อสายที่ขั้วลำโพงผิด การต่อผิดจะทำให้เฟสของสัญญาณหักล้างทำให้การควบคุมไม่ได้ตามที่ต้องการ ต่อไปเปิดอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วลมพร้อมเปิดคอมพิวเตอร์ต้องเปิดเตรียมไว้เพื่อตั้งค่าระบบโดยอ่านค่าความเร็วของลมที่ไหลผ่านตั้งค่าความเร็วลมที่

ไหลผ่านมาตรวัดความเร็วที่ความเร็วเท่ากับ 90 cm/s ถ้าความเร็วมากน้อยเกินไปให้ปรับความเร็วที่อินเวอร์เตอร์ให้ได้ค่าที่ต้องการ ตั้งค่าของเครื่องปรับอากาศไว้ที่ 25 องศาเซลเซียสแล้วจดค่าบันทึก

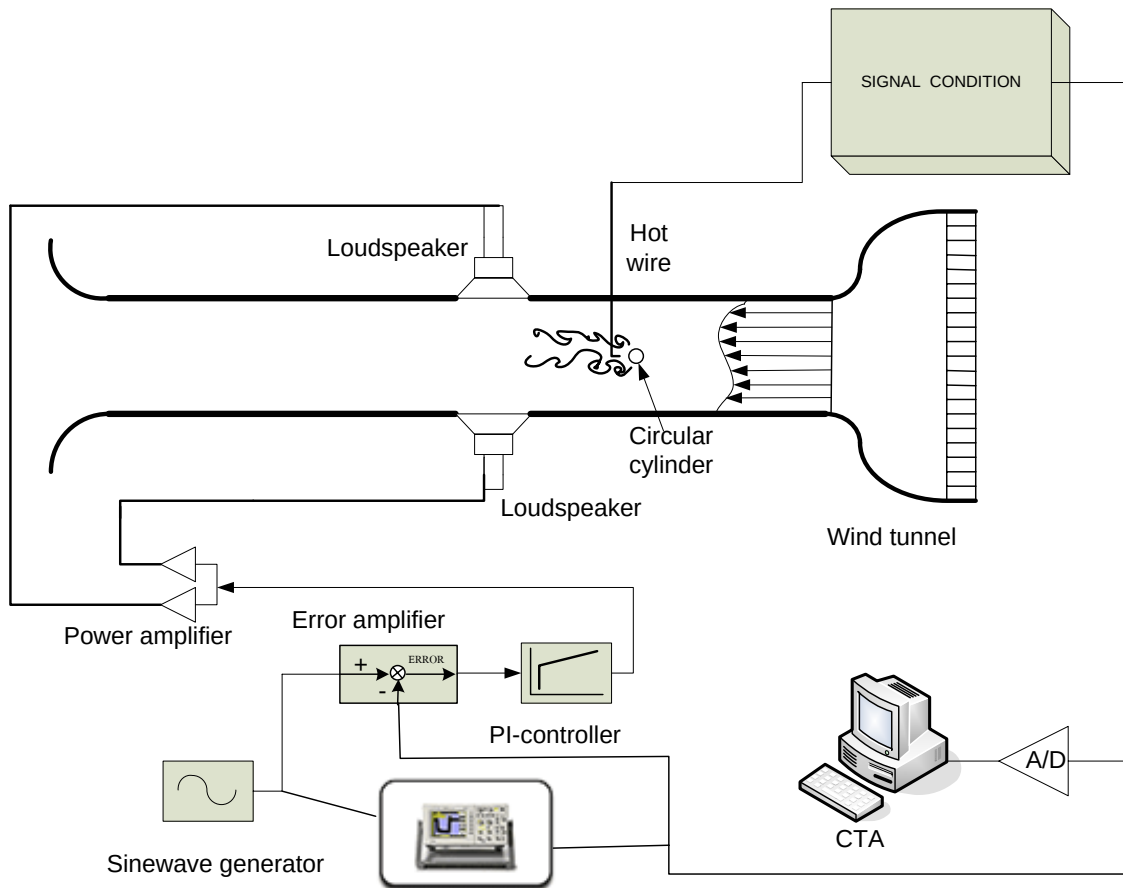
- การทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก (ไม่มีการควบคุม)



รูปที่ 3.6 แผนภาพการทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก (ไม่มีการควบคุม)

การทดลองนี้ให้ต่อวงจรตามรูปที่ 3.6 หลังจากตั้งค่าคอมพิวเตอร์ที่จะวัดความเร็วลมแล้วต้องควบคุมว่าอุณหภูมิให้มีค่าที่ 25 องศาเซลเซียส ปรับความเร็วลมให้เท่ากับ 90 cm/s ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าประมาณ 185.77 ซึ่งค่าอยู่ในช่วงTransition โดยดูจากคอมพิวเตอร์ จากนั้นใส่วัตถุรูปทรงกระบอกไปที่ช่องใส่ วัดสัญญาณเอาต์พุตด้วย Digital Storage Oscilloscope (DSO) ของบริษัทAgilent เราใช้ DSO ช่องที่2(CH2) ตั้งค่าที่ DSO ให้เหมาะสมเพื่อบันทึกผล

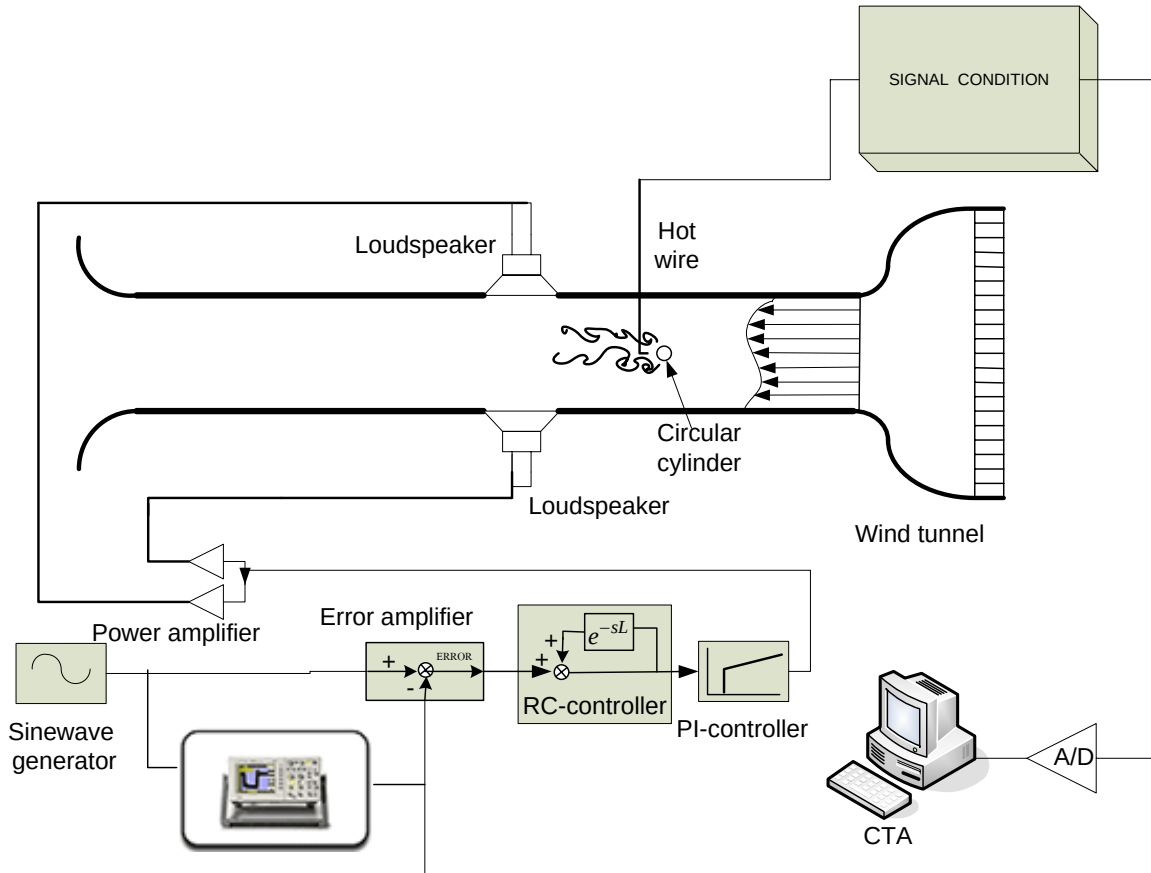
- การทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

การทดลองนี้จะควบคุมการไหลที่ผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยวิธีพีไอโดยการต่อตัวขยายความผิดพลาด ตัวควบคุมแบบพีไอ สัญญาณอ้างอิงมีค่า Desired Trajectory $y_d = 200 \sin(\omega t)$ ใส่ที่ขั้วบวกของวงจรขยายความผิดพลาดโดยจะปรับความถี่ไปตามค่า $\omega = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ เฮิรตซ์ตามลำดับส่วนสัญญาณป้อนกลับที่มาจากมาตรวัดความเร็วลมที่ขาลบ เอาต์พุตสัญญาณที่ได้จากการลบกันของสัญญาณทั้งสองออกจากวงจรขยายความผิดพลาดนั้นจะส่งออกไปที่อินพุตตัวควบคุมพีไอควบคุมโดยส่งสัญญาณเอาต์พุตไปที่วงจรขยายเสียงแล้วออกลำโพงดังแสดงในรูปที่ 3.7

-การทดลองควบคุมของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ



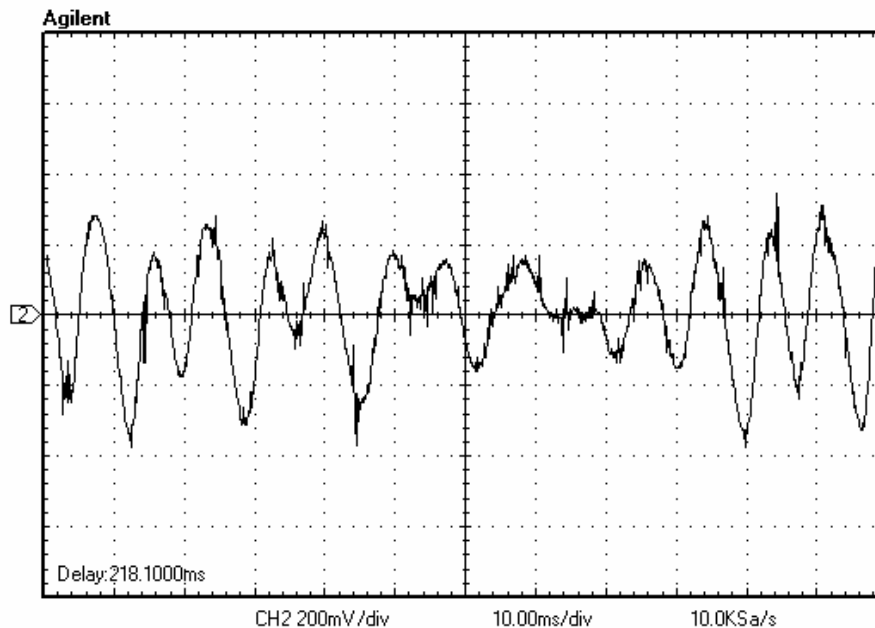
รูปที่ 3.8 แผนภาพการทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

การทดลองนี้จะควบคุมการไหลที่ผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยวิธีการควบคุมแบบทำซ้ำโดยการต่อตัวขยายความผิดพลาด ตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบทำซ้ำเป็นระบบเดียวกัน โดยใช้สัญญาณอ้างอิงมีค่าเป็น $y_d = 200\sin(\omega t)$ ใส่ที่ขั้วบวกของวงจขยายความผิดพลาดโดยค่า $\omega = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ เฮิร์ตซ์ ตามลำดับส่วนสัญญาณป้อนกลับที่มาจากมาตรวัดความเร็วที่ไหลบตามสัญญาณที่ออกจากวงจขยายความผิดพลาดนั้นจะส่งออกไปที่อินพุตตัวควบคุมแบบทำซ้ำต่อไปออกจากเอาต์พุตเข้าที่อินพุตตัวควบคุมพีไอควบคุมโดยส่งสัญญาณออกเอาต์พุตไปที่วงจขยายเสียงแล้วออกลำโพงดังแสดงในรูปที่ 3.8

3.3 ผลการทดลอง

3.3.1 การทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก (ไม่มีการควบคุม)

การทดลองนี้มีความเร็วของของไหลก่อนที่จะใส่วัตถุรูปทรงกระบอกเท่ากับ 0.9 m/s การคำนวณค่าของตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าประมาณ 185 ซึ่งค่านี้จะอยู่ในช่วง Transition จากนั้นใส่วัตถุรูปทรงกระบอกกลมเข้าที่ช่องเพื่อขวางการไหล ใช้มาตรวัดชนิดลวดร้อนวัดที่ด้านหลัง การวัดค่าของสัญญาณใช้ Digital Storage Oscilloscope (DSO) ของบริษัท Agilent เราใช้ DSO ช่องที่2(CH2) จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.9

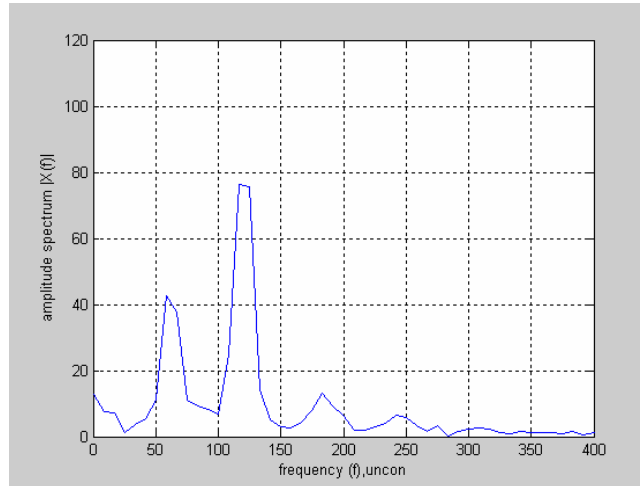


รูปที่ 3.9 ผลการทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก (ไม่มีการควบคุม) ซึ่งเกิด Transition ขึ้น

ในรูปที่ 3.9 ขนาดของสเกลทั้งในแนวแกนตั้งจะเป็นค่าของแรงดันซึ่งหนึ่งช่องใหญ่มีค่าเท่ากับ 200 มิลลิโวลต์ ส่วนแนวนอนจะเป็นค่าของเวลาซึ่งหนึ่งช่องใหญ่มีค่า 10 มิลลิวินาที ในการทดลองนี้ ช่วงเวลาที่เกิด Transition มีระยะเวลาประมาณ 10 มิลลิวินาที รูปคลื่นจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีหลายความถี่ปนกันไป เราสามารถที่จะหาความถี่ของสัญญาณที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการประมวลสัญญาณดิจิทัลซึ่งใช้เทคนิคการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform, FT) เพื่อความรวดเร็วในการแปลงจะใช้อีก

แบบหนึ่งคือ Fast Fourier Transform ซึ่งจะทำให้ได้ความถี่ของสัญญาณที่ต้องการ เราจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

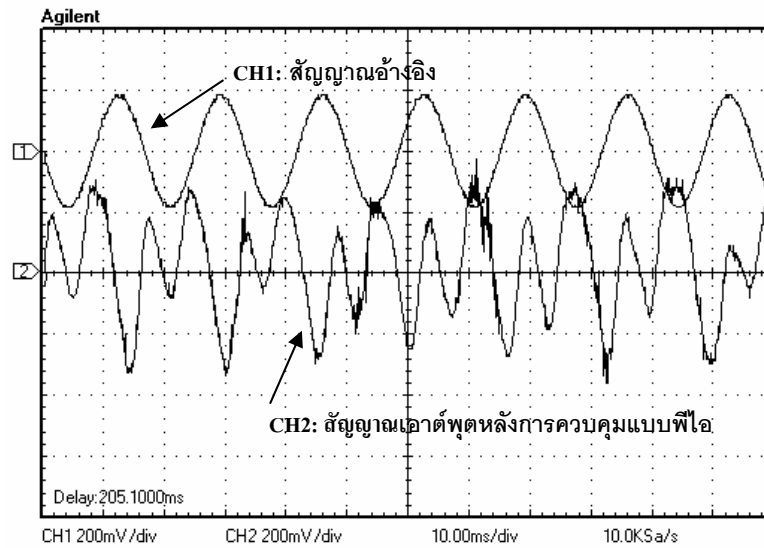
การวิเคราะห์หาความถี่โดยแปลงสัญญาณในรูปที่ 3.9 โดยใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT) จะได้สัญญาณ Spectrum ที่มีความถี่ที่เด่นออกมาสองค่าคือ 60 เฮิร์ตซ์และ 120 เฮิร์ตซ์ มีขนาดแอมพลิจูดเป็น 40 และ 76 หน่วยตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.10



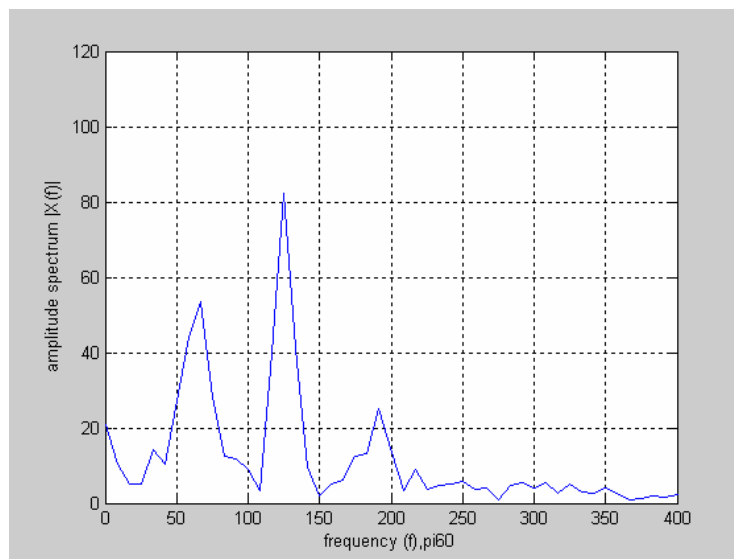
รูปที่ 3.10 ผลการแปลงFFT ของรูปที่ 3.9 การทดลองที่มีของไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก

3.3.2 ผลการทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

การทดลองในส่วนนี้จะใช้สัญญาณอ้างอิง (Desired Trajectory) เป็น $y_d = 200\sin(\omega t)$ ที่ความถี่ $\omega = 60$ เฮิร์ตซ์ และการวัดค่าของสัญญาณจาก Digital Storage Oscilloscope (DSO) เราใช้ DSO ช่องที่ 1 (CH1) วัดสัญญาณอ้างอิง ส่วนช่องที่ 2 (CH2) วัดค่าเอาต์พุต ผลของการทดลองสำหรับตัวควบคุมพีไอนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 จะสังเกตได้ว่าเอาต์พุตมีความถี่สูงกว่าสัญญาณอ้างอิงและไม่มีการเกิด Transition เมื่อวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตในรูปที่ 3.12 ด้วย FFT จะพบว่ามีความถี่ที่เด่นออกมาที่มีความถี่ประมาณ 66, 134 และ 190 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ แต่ความถี่ที่มีขนาดสูงสุดคือที่ความถี่ 134 เฮิร์ตซ์ มีขนาดประมาณ 80 หน่วย ดังแสดงในรูปที่ 3.12



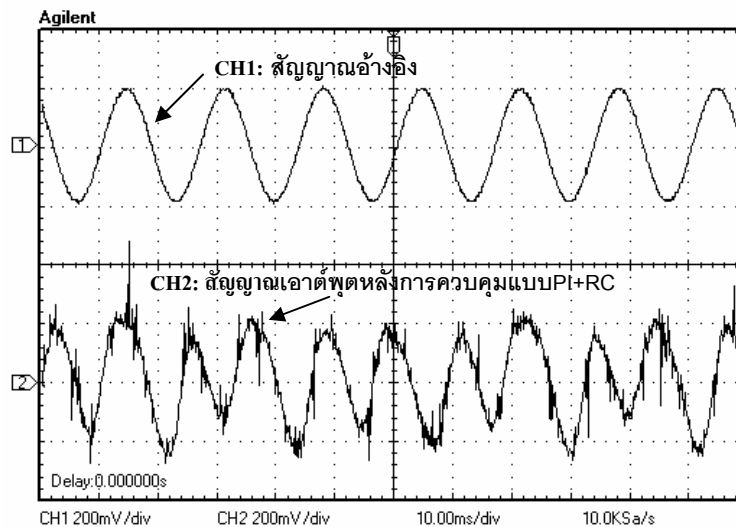
รูปที่ 3.11 การตอบสนองของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบฟีดแบ็ก
ใช้สัญญาณอ้างอิง $y_d = 200\sin(\omega t)$ ที่ความถี่ $\omega = 60$ เฮิรตซ์



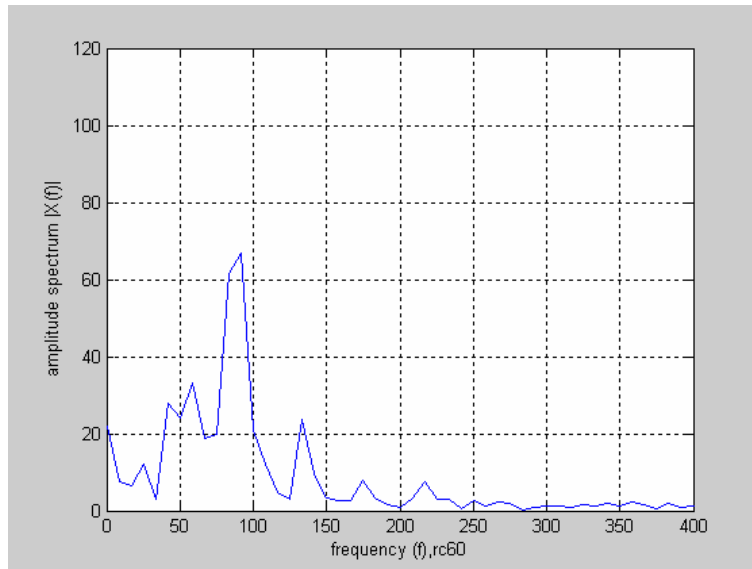
รูปที่ 3.12 การแปลงFFT ของสัญญาณเอาต์พุตในรูปที่ 3.11

3.3.3 ผลการทดลองควบคุมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

การทดลองในส่วนนี้จะใช้สัญญาณอ้างอิง (Desired Trajectory) เป็น $y_d = 200\sin(\omega t)$ ที่ความถี่ $\omega = 60$ เฮิร์ตซ์เช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่ผ่านมาเพื่อเปรียบเทียบกัน การวัดค่าของสัญญาณจาก Digital Storage Oscilloscope (DSO) ทำนองเดียวกันเราใช้ DSO ช่องที่ 1(CH1)วัดสัญญาณอ้างอิง ส่วนช่องที่2(CH2)วัดค่าเอาต์พุต ผลของการทดลองแสดงในรูปที่ 3.13 จะสังเกตได้ว่าเอาต์พุตเข้าใกล้อินพุตซึ่งมีความถี่สูงกว่าสัญญาณอ้างอิงและไม่มีการเกิด Transition เมื่อวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตในรูปที่ 3.14 ด้วยFFT จะพบว่ามีความถี่ที่เด่นออกมาเป็นความถี่ประมาณ 58, 67, 133 Hz ตามลำดับ แต่ความถี่ที่มีขนาดสูงสุดคือที่ความถี่ 67 Hz มีขนาดประมาณ 92 หน่วย ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำสามารถบังคับให้สัญญาณเอาต์พุตมีรูปแบบและค่าใกล้เคียงได้กับการควบคุมด้วยพีไอเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.13 การตอบสนองของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ ใช้สัญญาณอ้างอิง $y_d = 200\sin(\omega t)$ ที่ความถี่ $\omega = 60$ เฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.14 การแปลงFFT ของสัญญาณเอาต์พุตในรูปที่ 3.13

บทที่ 4 บทสรุป

4.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมแบบทำซ้ำซึ่งคลื่นเสียงเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อประยุกต์ใช้กับการสลับของกระแสหมุนวนของอากาศข้างหลังทรงกระบอกเดี่ยวในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วนในการทดลองใช้ทรงกระบอกกลมเดี่ยวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.21 มิลลิเมตร และให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็ว 0.9 เมตรต่อวินาที ที่สภาวะอากาศซึ่งทำให้ได้ค่าเลขเรย์โนลด์ประมาณ 185 โดยอยู่ในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน จุดประสงค์ในการควบคุมการไหลก็คือต้องการให้การไหลกลับเป็นลักษณะเป็นคาบ และมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับช่วงการไหลแบบราบเรียบเพื่อที่จะลดแรงหน่วงที่เกิดขึ้นในช่วงรอยต่อ

การทดลองควบคุมการไหลมีการใช้สองรูปแบบการควบคุมอย่างแรกเป็นการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยลำพังส่วนอย่างหลังจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ โดยการทดลองทั้งคู่นั้นจะใช้ค่าสัญญาณอ้างอิงเดียวกันคือ $y_d = 200 \sin(\omega t)$ ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์ การควบคุมด้วยวิธีพีไอสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วนให้ลดลงได้คล้ายกับการไหลในช่วงราบเรียบ และเมื่อใช้การควบคุมด้วยวิธีพีไอร่วมกับตัวควบคุมแบบทำซ้ำ ยังผลให้การตอบสนองเป็นคาบคล้ายกับสัญญาณอ้างอิงขึ้นลดสภาพในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วนลงได้ดียิ่งกว่าการใช้การควบคุมด้วยวิธีพีไอแต่เพียงลำพัง ซึ่งจากงานวิจัยนี้เป็นหลักฐานที่สำคัญแสดงถึงแนวทางในการหาค่าเลขเรย์โนลด์ในการเกิดช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน และเป็นงานวิจัยแรกที่มีการใช้การควบคุมแบบทำซ้ำประยุกต์ใช้กับการไหลในช่วงรอยต่อของการไหลแบบปั่นป่วน

4.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยนี้หากมีฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์เก็บข้อมูลและเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมและสามารถหาค่าต่างๆเช่น FFT, RMS, Average เป็นต้น ได้โดยอัตโนมัติ จะมีความคล่องตัวในการทำงานที่ดีกว่านี้ เนื่องจากในการหาค่า FFT จะต้องนำข้อมูลจาก DSO มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมข้างนอกทำให้เกิดความไม่แม่นยำ และมีความยากในการแปลงข้อมูลไปมา ตัวควบคุมแบบพีไอในการทดลองไม่สามารถตั้งค่าที่แน่นอนได้ทำให้ไม่รู้ค่าเกณฑ์แท้จริงที่นำไปควบคุมระบบ อนึ่งการทดลองไม่สามารถให้ค่าเริ่มต้นของการทดลองทั้งหลายที่ใกล้เคียง เนื่องจากระบบมีเงื่อนไขที่มาก มีความซับซ้อนเนื่องจากระบบเป็นการไหลของอากาศที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Leyva-Ramos, J., Escobar, Martínez, G., and Mattavelli, P.R., 2005, “Analog Circuits to Implement Repetitive Controllers for Tracking and Disturbance Rejection of Periodic Signals”, **IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—II: EXPRESS BRIEFS**, VOL. 52, NO. 8, pp.466-470
- [2] Tritton, D.J., 1988 , **Physical Fluid Dynamics**, 2nd ed, Clarendon Press, Oxford.
- [3] Blevins, R. D., 1990, **Flow-induced vibration**, 2nd ed, Van Nostrand Reinhold, New York.
- [4] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ , 2547, **กลศาสตร์ของไหล (FLUID MACHANICS)**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.