

การพัฒนาข้อต่อของหุ่นยนต์โคโบติกแบบของไทย



นายสุภพน จันทรพัฒน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

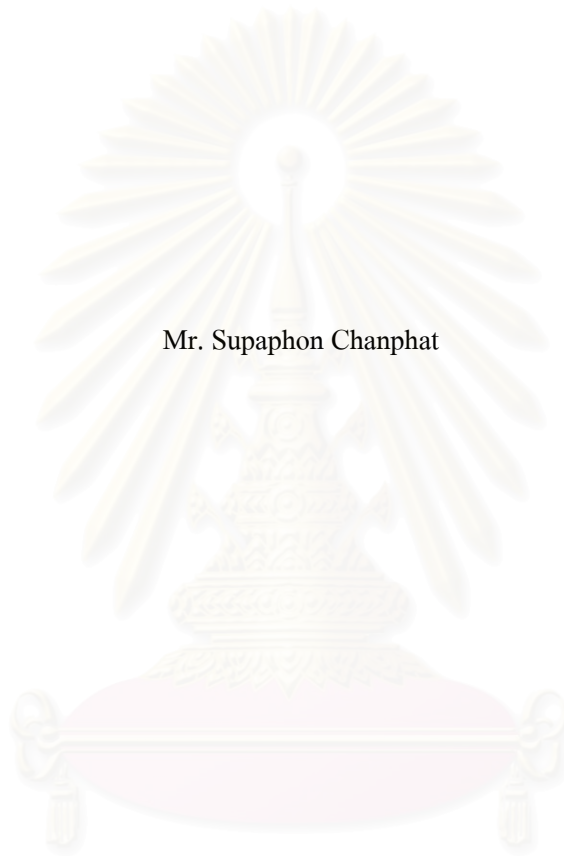
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4340-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A FLUID COBOTIC JOINT DEVELOPMENT



Mr. Supaphon Chanphat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2003  
ISBN 974-17-4340-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การพัฒนาข้อต่อของหุ่นยนต์โคโบริกแบบของไหล  
โดย    นายสุภพน จันทรพัฒน์  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา                          อาจารย์ ดร.วิทยา วันณสุโกประสิทธิ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.วิทยา วันณสุโกประสิทธิ์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์)

ศุภพน จันทรพัฒน์ : การพัฒนาข้อต่อของหุ่นยนต์โคโบติกแบบของไหล. (A FLUID COBOTIC JOINT DEVELOPMENT) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ 162 หน้า. ISBN 974-17-4340-8.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนองงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาข้อต่อโคโบติกด้วยระบบของไหล พร้อมทั้งได้จำลองพฤติกรรมการทำงานของข้อต่อโคโบติกและจัดสร้างหุ่นยนต์โคโบติกที่มีพื้นที่การทำงานในระนาบ x-y ด้วยข้อต่อโคโบติกแบบของไหลเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของข้อต่อโคโบติก

ข้อต่อโคโบติกเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการสร้างหุ่นยนต์โคโบติก ทำหน้าที่ควบคุมอัตราทดระหว่างการเคลื่อนที่ของข้อต่อแต่ละข้อของหุ่นยนต์โคโบติก ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้ระบบนิวแมติกมาใช้เป็นข้อต่อโคโบติก ด้วยการสร้างวาล์วควบคุมการไหลเพื่อควบคุมการไหลระหว่างกระบอกลมของหุ่นยนต์โคโบติกสองกระบอกล ซึ่งกระบอกลมทั้งสองกระบอกลนี้ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนโครงสร้างหุ่นยนต์โคโบติก ส่วนของระบบควบคุมหุ่นยนต์โคโบติกนั้น ถูกเขียนด้วยโปรแกรมที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการสำหรับงานทางด้านเวลาจริง โดยเฉพาะเพื่อให้คาบเวลาในวงรอบการควบคุมมีความแม่นยำ

จากการทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์โคโบติกในการสร้างเส้นทางเดินและกำแพงเสมือนในลักษณะต่างๆ ข้อต่อโคโบติกสามารถสร้างอัตราทดได้ดีในบางอัตราทดทำให้หุ่นยนต์โคโบติกสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดและสร้างกำแพงเสมือนได้ดีในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามสำหรับบางอัตราทดที่ข้อต่อโคโบติกไม่สามารถสร้างได้นั้น ก็ได้ทำการศึกษาหาสาเหตุและสรุปผล เพื่อการพัฒนาในขั้นต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....

ปีการศึกษา ..... 2546 .....

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 4370526721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: COBOT / CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSSMISSION / HAPTIC INTERFACE

SUPAPHON CHANPHAT: A FLUID COBOTIC JOINT DEVELOPMENT. THESIS ADVISOR :  
 PROF. WITAYA WANNASUPHOPRASIT, 162 pp. ISBN 974-17-4340-8

This thesis purposed a development of a fluid cobotic joint. This reseach work includes simulation of the joint characteristics and development of a x-y collaborative robot with a fluid joint. This fluid collaborative robot prototype was built to test and verify the ability of the fluid joint.

A cobotic joint is an essential element of collaborative robot. The cobotic joint controls a transmission relation of each link of collaborative robot structure. In this thesis, a pneumatic system was applied to cobotic joint. A flow rate control valve was designed and constructed to control flow rate between two cylinders of the fluid collaborative robot. The pistons on each cylinders are connected to a linear stroke x-y table via cable transmission. The controller of the fluid collaborative robot was developed on a real time operating system for a precision sample time of control loop.

In the experiment, the collaborative robot was commanded to track some paths and generate some virtual walls. The result shows satisfactory performance in some transmission ratios of cobotic joint. Due to nonlinearity of fluid and stick slip on cylinder, some ratios are limited and recommended for further investigation.



Department Mechanical Engineering

Field of study Mechanical Engineering

Academic year 2003

Student's signature .....

Advisor's signature .....

Co-advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของ อ.ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่านเพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้พร้อมทั้งจัดหาทุนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยและวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบผลสำเร็จได้ หากขาดความช่วยเหลืออย่างเต็มที่จากบิดามารดาในทุกๆ ด้าน ในที่นี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ คณะกรรมการได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. อสิ บุญจิตราคุลย์ และ อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์ สำหรับคำแนะนำและการเอื้อเพื่ออุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ให้โอกาสเข้าร่วมโครงการวิจัย ที่นำมาซึ่งประสบการณ์และทุนการศึกษาแก่ผู้เขียน ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ สำหรับความรู้และเงินสนับสนุนการศึกษามาตลอด และขอขอบคุณสำหรับทุกๆ ท่านที่อยู่แวดล้อมผู้เขียน ไม่ว่าจะเป็นคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิที่เคยถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำ รวมไปถึงเพื่อนนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งยังได้ให้กำลังใจที่ดี แก่กันเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการทำงานของโคบอต.....	2
1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย.....	5
1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนการวิจัย.....	6
1.7 ตารางเวลา.....	9
1.8 ส่วนประกอบของ x-y cobot.....	10
บทที่ 2 ทัศนัวรรณกรรม.....	11
2.1 งานวิจัยทางด้านหุ่นยนต์โคโบติก.....	11
2.2 ข้อต่อโคโบติกแบบล้อ.....	11
2.2.1 ยูนิท ไชเคิลโคบอต.....	12
2.2.2 สตูดเตอร์โคบอต.....	13
2.3 ข้อต่อโคโบติกแบบทรงกลม.....	14
2.3.1 โคบอตแบบอนุกรม.....	15
2.3.2 โคบอตเสริมกำลัง.....	15
2.4 งานวิจัยทางด้านนิวมติก.....	17
2.4.1 งานวิจัยของ Ben-Dov and S.E. Salcucean[5].....	21
2.4.2 งานวิจัยของ N.O. Vaughan and J.B. Gamble[6].....	22
2.4.3 งานวิจัยของ X. Lin, F. Spettel and S. scavarda[7].....	23
2.4.4 งานวิจัยของ E. Richard กับ S.Scavarda[8].....	24
2.4.5 งานวิจัยของ E. Richer and Y. Hurmuzlu[9].....	25

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	26
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบอกกลม.....	26
3.2 แบบจำลองของโซลีนอยด์วาล์ว.....	29
บทที่ 4 ข้อต่อโคโบติกแบบของไหล.....	34
4.1 แนวคิดของข้อต่อโคโบติกแบบของไหล.....	34
4.2 การควบคุมการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง.....	35
4.3 การควบคุมการไหลแบบต่อเนื่อง.....	37
4.4 การจำลองการทำงานของข้อต่อโคโบติกแบบของไหล.....	42
บทที่ 5 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์โคโบติก.....	48
5.1 โครงสร้างของโคบอต.....	48
5.2 โครงสร้างของชุดวาล์วควบคุมอัตราการไหล.....	54
5.2.1 วาล์วปรับอัตราการไหล.....	54
5.2.2 ช่วงการควบคุมของวาล์ว.....	59
บทที่ 6 ระบบวัดและควบคุม.....	64
6.1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งในหุ่นยนต์โคบอต.....	64
6.2 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมในหุ่นยนต์โคบอต.....	65
6.3 การควบคุมวาล์วควบคุมการไหล.....	67
6.4 การวัดสัญญาณความเร็ว.....	69
6.5 การกรองสัญญาณของค่าแรงที่วัดได้.....	69
6.6 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอต.....	71
6.6.1 ระบบควบคุมของยูนิทไฮดรอลิกโคบอต.....	71
6.6.2 ระบบควบคุมแบบควบคุมแรง.....	73
6.6.3 การควบคุมแบบมีการทำนายล่วงหน้า.....	74
บทที่ 7 การทดลอง.....	77
7.1 การทดสอบการทำงานของโคบอตด้วยระบบควบคุมของยูนิทไฮดรอลิกโคบอต.....	77
7.2 การทดสอบการสร้างกำแพงเสมือนของโคบอต.....	78
7.2.1 การสร้างกำแพงในแนวต่างๆขณะดึงด้วยแรงคงที่.....	79
7.2.2 การสร้างกำแพงในแนว 87 องศาและดึงด้วยแรงในแนวต่างๆ.....	81
7.2.3 การสร้างกำแพงในแนวต่างๆองศาและดึงด้วยแรงในแนว normal.....	84



สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
7.3 การสร้างกำแพงให้โคบอลต์.....	85
7.3.1 กำแพงในแนว 90 องศา.....	85
7.3.2 กำแพงในแนว 45 องศา.....	91
7.3.3 กำแพงรูปแปดเหลี่ยม.....	95
บทที่ 8 วิเคราะห์และสรุปผล.....	101
8.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	101
8.2 สรุปผลการทดลอง.....	104
8.3 แนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยในอนาคต.....	106
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์.....	111
ก.1. อุปกรณ์ตรวจรู้แรง FT Mini 45.....	111
ก.2. แผงวงจรนับสัญญาณเอน โคคเตอร์ PCL-833.....	112
ก.3. แผงวงจร multifunction data acquisition PCL-812.....	113
ก.4. แผงวงจรขั้วรีเลย์ SILA EX-RELAY.....	113
ก.5. ระบบปฏิบัติการ QNX.....	114
ก.6. เอน โคคเตอร์ Koyo TRD-S2500VA.....	114
ก.7. โซลินอยด์วาล์ว VT307.....	115
ภาคผนวก ข. แบบเครื่องกลของส่วนประกอบที่สำคัญ.....	116
ภาคผนวก ค. ทฤษฎีเพิ่มเติม.....	136
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	161

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงความแตกต่างระหว่างหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปกับโคบอต.....	4
ตารางที่ 1.2 แสดงช่วงเวลาในการทำวิจัย.....	9
ตารางที่ 4.1 แสดงการไหลของของไหลผ่าน ออร์ฟิต เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโคบอต.....	41
ตารางที่ 5.1 แสดงการไหลระหว่างกระบอกสูบและการไหลในค้ำวาล์ว.....	59
ตารางที่ 7.1 แสดงเงื่อนไขการเข้าสู่กำแพงและเวกเตอร์ normal และ tangent ของกำแพง.....	96
ตารางที่ ข.1 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูเจาะบนแผ่นฐาน.....	120



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 a) Planar robot.....	2
รูปที่ 1.1 b) Unicycle cobot.....	2
รูปที่ 1.2 ไคอะแกรมแสดงขั้นตอนในการทำวิจัย.....	8
รูปที่ 1.3 โคนอต x-y.....	10
รูปที่ 2.1a) แผนผังของข้อต่อโคโบติกแบบล้อ.....	12
รูปที่ 2.1b) องค์ประกอบของความเร็วของล้อ.....	12
รูปที่ 2.2 ข้อต่อโคโบติกแบบล้อ[1].....	12
รูปที่ 2.3 แสดงหลักการในการสร้างกำแพงเสมือนและเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจริง[1].....	13
รูปที่ 2.4 สกอตเตอร์โคนอต[2].....	14
รูปที่ 2.5 โคนอตในอุตสาหกรรม[4].....	14
รูปที่ 2.6 แสดงหลักการทำงานและส่วนประกอบคร่าวๆ ของข้อต่อโคโบติกแบบทรงกลม [3]....	14
รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของโคนอตแบบอนุกรม[1].....	15
รูปที่ 2.8 แสดงหลักการใช้ข้อต่อแบบทรงกลมในโคนอตเสริมกำลัง[1].....	16
รูปที่ 2.9 โคนอตเสริมกำลังที่ใช้ข้อต่อแบบทรงกลม [1].....	16
รูปที่ 2.10 แกรนท์โคนอต[1].....	17
รูปที่ 2.11 แสดงหลักการทำงานของวาล์วแบ่งอัตราการไหลแบบอริฟิด.....	17
รูปที่ 2.12 แสดงหลักการทำงานของวาล์วแบ่งอัตราการไหลแบบมอเตอร์.....	18
รูปที่ 2.13 เซอร์โววาล์วแบบควบคุมด้วยมอเตอร์.....	19
รูปที่ 2.14 เซอร์โววาล์วแบบควบคุมด้วยวาล์วแฟลปเปอร์.....	19
รูปที่ 2.15 เซอร์โววาล์วแบบควบคุมด้วยหัวฟัน.....	19
รูปที่ 2.16 a)แสดงความเป็นสัมพัทธ์เชิงเส้นของแรงต่อกระแสในขอลวดเหนี่ยวนำ b)แสดงช่วง การทำงานของขอลวดเหนี่ยวนำ.....	20
รูปที่ 2.17 a)แสดงส่วนประกอบคร่าวๆของพรอพโรชั่นนอลวาล์ว.....	20
รูปที่ 2.17 b)ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกระแสในขอลวดเหนี่ยวนำ.....	20
รูปที่ 2.18 การต่ออุปกรณ์นิวเมติกในงานวิจัย D. Ben-Dov , S.E. Salcucean.....	22
รูปที่ 2.19 แสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์.....	22
รูปที่ 2.20 วาล์วแฟลปเปอร์.....	22
รูปที่ 2.21 แสดงแผนผังของอุปกรณ์ในงานวิจัย.....	23
รูปที่ 2.22 แสดงอุปกรณ์ในงานวิจัย และแผนผังอย่างง่ายของการต่ออุปกรณ์.....	25

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนผังของกระบอกสูบ.....	26
รูปที่ 3.2 แสดงการไหลผ่านออริฟิต .....	30
รูปที่ 4.1 การต่อกระบอกสูบเข้าด้วยกัน .....	35
รูปที่ 4.2 การติดตั้งวาล์วควบคุมการไหล.....	35
รูปที่ 4.3 การนำกระบอกสูบมาติดตั้งกับโครงสร้าง x-y เพื่อสร้างโคบอลต์.....	35
รูปที่ 4.4 การควบคุมการไหลเพื่อสร้างอัตราทด 1:0.....	36
รูปที่ 4.5 การควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว 4/2 เพื่อสร้างอัตราทด 1:1.....	36
รูปที่ 4.6 แสดงการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากการควบคุมการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง.....	37
รูปที่ 4.7 การแบ่งจ่ายของไหลด้วยออริฟิต.....	38
รูปที่ 4.8 อัตราส่วนระหว่าง $m_1$ และ $m_2$ ที่ $r_0$ ต่างๆ.....	38
รูปที่ 4.9 แสดงการใช้ออริฟิตเพื่อควบคุมการไหลของลม.....	39
รูปที่ 4.10 การแบ่งช่วงการควบคุม.....	40
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการสร้างเส้นทางเดิน 90 องศา ที่ 1 บาร์.....	43
รูปที่ 4.12 แสดงระยะผิดพลาดในการสร้างเส้นทางเดิน 90 องศาที่ความดัน 1 บาร์.....	44
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการสร้างเส้นทางเดิน 90 องศา ที่ 5 บาร์.....	44
รูปที่ 4.14 แสดงระยะผิดพลาดในการสร้างเส้นทางเดิน 90 องศาที่ความดัน 5 บาร์.....	45
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการสร้างเส้นทางเดิน 45 องศา ที่ 1 บาร์.....	45
รูปที่ 4.16 แสดงระยะผิดพลาดในการสร้างเส้นทางเดิน 45 องศาที่ความดัน 1 บาร์.....	46
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการสร้างเส้นทางเดิน 45 องศา ที่ 5 บาร์.....	46
รูปที่ 4.18 แสดงระยะผิดพลาดในการสร้างเส้นทางเดิน 45 องศาที่ความดัน 5 บาร์.....	47
รูปที่ 5.1 a) ภาพด้านบน โครงสร้างโคบอลต์แบบของไหล.....	49
รูปที่ 5.1 b) ภาพของหุ่นยนต์โคบอลต์แบบของไหลที่จัดสร้างขึ้น.....	49
รูปที่ 5.2 อุปกรณ์วัดแรงที่ติดตั้งด้านบนของด้ามจับ.....	50
รูปที่ 5.3 ส่วนประกอบของสไลด์บล็อก.....	50
รูปที่ 5.4 แสดงการแขวนด้ามจับบนเพลาสไลด์เคลื่อนที่สองเส้น.....	51
รูปที่ 5.5 การยึดเพลาสไลด์ยึดกับแผ่นฐาน.....	51
รูปที่ 5.6 ภาพด้านล่างของโคบอลต์แบบของไหล.....	52
รูปที่ 5.7 แผนผังการร้อยสายเคเบิล.....	53
รูปที่ 5.8 ชุดพู่เล่เปลี่ยนระดับชุดที่ 1.....	53

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.9 ชุดพู่เล่เปลี่ยนระดับชุดที่ 2.....	53
รูปที่ 5.10 ชุดพู่เล่ในแนวราบ.....	53
รูปที่ 5.11 a) แสดงส่วนประกอบของชุดขับวาล์ว.....	54
รูปที่ 5.11 b) แสดงชุดวาล์วที่ได้สร้างขึ้นจริง.....	55
รูปที่ 5.12 แสดงวงจรสมบูรณข์ของชุดวาล์วควบคุมอัตราการไหล.....	56
รูปที่ 5.13 แสดงรายละเอียดของวาล์วควบคุมการไหล.....	57
รูปที่ 5.14 พื้นที่การไหล.....	57
รูปที่ 5.15 แสดงส่วนควบคุมการไหลของวาล์ว.....	57
รูปที่ 5.16 แสดงอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของการไหลในช่วง 1:0 ถึง 0:1.....	63
รูปที่ 5.17 แสดงอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของการไหลในช่วง 0:1 ถึง -1:0.....	63
รูปที่ 6.1 แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมโคบอด.....	66
รูปที่ 6.2 แผนผังระบบควบคุมของวาล์ว.....	68
รูปที่ 6.3 แสดงผลตอบสนองของวาล์วควบคุมการไหลต่อคำสั่งแบบขั้นให้เคลื่อนที่จาก 0-10 มม. .....	69
รูปที่ 6.4 แสดงกราฟโบดิของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้กับสัญญาณแรง.....	70
รูปที่ 6.5 แสดงค่าแรงที่วัดได้และหลังจากผ่านการกรอง.....	70
รูปที่ 6.6 การอธิบายลักษณะของกำแพงด้วยเวกเตอร์ tangent และ normal.....	71
รูปที่ 6.7 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่จริงเทียบกับเส้นทางที่กำหนด.....	72
รูปที่ 6.8 แผนภาพแสดงการควบคุมการเคลื่อนที่ของโคบอด.....	75
รูปที่ 6.9 แสดงองค์ประกอบของแนวที่กระทำกับแนวกำแพง.....	76
รูปที่ 6.10 การสร้างกำแพงก่อนกำแพงที่ต้องการ.....	76
รูปที่ 7.1 แสดงผลของระบบควบคุมแบบยูนิตไซเคิลโคบอด.....	78
รูปที่ 7.2 a) แผนผังการทดลองที่ 1 เปลี่ยน $\theta_p$ จาก 45 ถึง 90 แรง $F_x$ คงที่.....	79
รูปที่ 7.2 b) การดึง handle ด้วยสายเคเบิล.....	79
รูปที่ 7.2 c) คู่มือน้ำหนักที่ใช้ดึงสายเคเบิล.....	79
รูปที่ 7.3 แสดงผลการตอบสนองของกำแพงในแนวต่างๆ ต่อแรงขนาด 20 ก.ก. ในทิศทาง +x แนว กำแพงที่มีการตอบสนองได้แก่ 90, 87, 50, และ 45 โดยในแนว 90 และ 45 มีการตอบสนองจะเกิด ความผิดพลาดเนื่องจากการอัดตัวได้ของลมเพียงอย่างเดียว.....	80
รูปที่ 7.4 แผนผังการทดลองที่ 2 $\theta_p=87$ องศา เปลี่ยนแนวแรง $F_x$ .....	81

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.5 ตัวอย่างแรงที่วัดได้.....	83
รูปที่ 7.6 ขนาดของแรงต้านเมื่อสร้างกำแพงแนว 87 องศา.....	83
รูปที่ 7.7 แผนผังการทดลองที่ 3 $F_x$ normal กับเส้นทางเดินและเปลี่ยน $\theta_p$ .....	84
รูปที่ 7.8 แสดงแรงต้านในแนว normal ของกำแพงในแนวต่างๆ.....	85
รูปที่ 7.9 แสดงแนวกำแพงที่ $x = 0$ .....	86
รูปที่ 7.10 ผลการสร้างกำแพง 90 องศาที่ความดัน 1 บาร์.....	88
รูปที่ 7.11 แสดงผลการสร้างกำแพง 90 องศา ที่ความดัน 4 บาร์.....	89
รูปที่ 7.12 แสดงผลการสร้างกำแพง 90 องศา ที่ความดัน 4 บาร์และมีการทำนายการชน.....	90
รูปที่ 7.13 แสดงแนวกำแพง 45 องศา.....	91
รูปที่ 7.14 แสดงผลการสร้างกำแพง 45 องศา ที่ความดัน 1 บาร์.....	92
รูปที่ 7.15 แสดงผลการสร้างกำแพง 45 องศา ที่ความดัน 4 บาร์.....	93
รูปที่ 7.16 แสดงผลการสร้างกำแพง 45 องศา ที่ความดัน 4 บาร์และมีการทำนายการชน.....	94
รูปที่ 7.17 แสดงส่วนประกอบของกำแพงแปลดเหลี่ยม.....	95
รูปที่ 7.18 แสดงผลการสร้างกำแพงแปลดเหลี่ยม ที่ความดัน 1 บาร์.....	97
รูปที่ 7.19 แสดงผลการสร้างกำแพงแปลดเหลี่ยม ที่ความดัน 4 บาร์.....	98
รูปที่ 7.20 แสดงผลการสร้างกำแพงแปลดเหลี่ยม ที่ความดัน 4 บาร์พร้อมการทำนายการเข้าชน.....	99
รูปที่ 7.21 แสดงผลการสร้างกำแพงแปลดเหลี่ยม ที่ความดัน 4 บาร์พร้อมการทำนายการเข้าชน.....	100
รูปที่ 8.1 a) การไหลที่เกิดขึ้นวาล์วควบคุมการไหล.....	101
รูปที่ 8.1 b) แสดงแผนผังการไหลในวงจรสมมูล, เส้นทึบแสดงการไหลที่ถูกต้อง, เส้นประแสดงการไหลที่เกิดความผิดพลาด.....	102
รูปที่ 8.2 แสดงทิศของแรงในช่วงการเคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพง.....	103
รูปที่ 8.3 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในขณะโคบอดเริ่มเคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพง.....	103
รูปที่ ก.1 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงรุ่น FT Mini 45.....	111
รูปที่ ก.2 ส่วนประกอบในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	111
รูปที่ ก.3 แผงวงจรนับเอนโคดเดอร์.....	112
รูปที่ ก.4 แผงวงจร multifunction data acquisition PCL-812.....	113
รูปที่ ก.5 แผงวงจรขั้วรีเลย์.....	113
รูปที่ ก.6 เอนโคดเดอร์ Koyo TRD-S2500VA.....	114
รูปที่ ก.7 โซลินอยด์วาล์ว VT307.....	115



## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.1 แผ่นฐานของโคบอต.....	117
รูปที่ ข.1 a) แสดงรูเจาะบนส่วนบนของแผ่นฐาน.....	118
รูปที่ ข.1 b) แสดงรูเจาะบนส่วนล่างของแผ่นฐาน.....	119
รูปที่ ข.2 พู่เล่ต่อเข้ากับเพลลาของเอน โคคเคอร์.....	121
รูปที่ ข.3 เสาของพู่เล่ซึ่งมีความสูง L สามระดับแสดงในตาราง.....	121
รูปที่ ข.4 พู่เล่ร้อยสายเคเบิลเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ม.ม.....	122
รูปที่ ข.5 พู่เล่ร้อยสายเคเบิลเส้นผ่านศูนย์กลาง 77 ม.ม.....	123
รูปที่ ข.6 พู่เล่ของกระบอกลูกสูบ.....	124
รูปที่ ข.7 เพลลาของพู่เล่ 77 ม.ม.....	125
รูปที่ ข.8 Handle ของโคบอต.....	126
รูปที่ ข.9 กานเปลี่ยนระดับสายเคเบิล.....	127
รูปที่ ข.10 กานของพู่เล่ 77 ม.ม.....	128
รูปที่ ข.11 Slide block.....	129
รูปที่ ข.12 หมุดสำหรับร้อยสายเคเบิล.....	130
รูปที่ ข.13 แผ่นประกบอุปกรณ์วัดแรงดันล่าง.....	131
รูปที่ ข.14 แผ่นประกบอุปกรณ์วัดแรงดันบน.....	132
รูปที่ ข.15 แผ่นเชื่อมระหว่างแผ่นประกบอุปกรณ์วัดแรงทางด้านล่างกับ handle.....	133
รูปที่ ข.16 เรือนวาล์วควบคุมการไหล.....	134
รูปที่ ข.17 แกนวาล์วควบคุมอัตราการไหล.....	135
รูปที่ ค.1 แสดงปริมาตร $ds$ ของการไหลแบบอัดตัวได้ในท่อ.....	136
รูปที่ ค.2 แสดงการไหลในท่อโดยมีรูปแบบการไหลที่ทางเข้า $m_t = h(t)$ , พื้นที่หน้าตัดท่อ $A_t$ , ท่อยาว $L_t$ .....	139

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย หุ่นยนต์ในรูปแบบต่างๆ ถูกนำมาทำงานในอุตสาหกรรมหลายๆด้าน การนำหุ่นยนต์มาใช้นั้นให้ประโยชน์ในอย่างมาก เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต การทำงานที่อันตรายแทนมนุษย์ ฯลฯ หุ่นยนต์อุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะถูกโปรแกรมคำสั่งและปล่อยให้ทำงานโดยอัตโนมัติ มนุษย์จะควบคุมอยู่นอกขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์กับงานบางอย่างยังไม่สามารถทำได้ เช่น งานประกอบที่ต้องการความละเอียดสูงในการประกอบ ทำให้งานเหล่านี้จึงตกเป็นหน้าที่ของมนุษย์ แต่ในสภาวะที่มีการแข่งขันสูงเช่นปัจจุบันทำให้การผลิตต้องเป็นไปอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความสามารถในการทำงานของมนุษย์มีจำกัด ความเมื่อยล้าจากการทำงาน ส่งผลให้การทำงานมีข้อผิดพลาดมากขึ้น ทำงานได้ช้า และเป็นอันตรายต่อตัวมนุษย์เอง ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะทำการพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อนำมาใช้งานร่วมกับมนุษย์โดยที่มนุษย์และหุ่นยนต์สัมผัสกันโดยตรงระหว่างการทำงาน เพื่อนำความสามารถในการทำงานของหุ่นยนต์มารวมเข้ากับความสามารถในการทำงานของมนุษย์ ทว่าหุ่นยนต์ที่จะนำมาทำงานร่วมกับมนุษย์นั้นจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยระหว่างการทำงาน ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี เช่น การจำกัดกำลังงานที่ใช้ให้ต่ำจนไม่สามารถทำอันตรายกับผู้ใช้ได้, ใช้อุปกรณ์ safety limit หรือการออกแบบให้หุ่นยนต์หลุดออกจากผู้ใช้ ถ้าการเคลื่อนไหวกำลังก่อให้เกิดอันตรายกับมนุษย์ ตัวอย่างของหุ่นยนต์ประเภทนี้ได้แก่ระบบแอสติกอินเทอร์เฟซ แต่การจำกัดให้หุ่นยนต์ใช้พลังงานต่ำนี้ทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานที่ต้องรับภาระสูงๆได้ แนวคิดหนึ่งที่น่าสนใจและมีประสิทธิภาพกว่าได้ถูกเสนอขึ้นโดยคณะวิจัยจากมหาวิทยาลัยออร์สเตทเธิร์น คือ โคบอต

โคบอต (Cobot หรือ Collaborative Robot) คือ หุ่นยนต์รูปแบบใหม่ที่มีแนวคิดให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้โดยตรง โคบอตถูกออกแบบให้เป็นอุปกรณ์ประเภทเพสซีฟ ซึ่งหมายถึงโคบอตจะไม่ส่งกำลังออกจากตัวเอง (ยกเว้นในกรณีของโคบอตแบบเสริมกำลัง ซึ่งไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้) ในการทำงานร่วมกันของมนุษย์และโคบอต โคบอตทำหน้าที่ในการสร้างพื้นผิวเสมือนจริงเพื่อควบคุมขอบเขตหรือเส้นทางการเคลื่อนที่ของมนุษย์ โดยที่มนุษย์จะเป็นผู้ออกแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ในขณะที่โคบอตทำหน้าที่ในการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่เท่านั้นและไม่เคลื่อนที่ด้วยตัวเองซึ่งทำให้โคบอตมีความปลอดภัยสูง การทำงานของโคบอตอาจเปรียบได้กับการใช้ไม้บรรทัดช่วยในการขีดเส้น ตัวอย่างการใช้งานในอุตสาหกรรมของโคบอต ก็คือการนำโคบอตเข้าไปช่วยในการประกอบประตูรถเข้ากับตัวถังรถยนต์ระหว่างที่ตัวถังรถเคลื่อนที่ไปตามสายการผลิต ประตูต้องถูกเคลื่อนที่จากบริเวณด้านข้างของสายการผลิตมาประกอบกับตัวถังรถ โคบอตจะทำงานร่วมกับมนุษย์ด้วยการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่และรับน้ำหนักของประตู เพื่อนำประตูเข้ามาประกอบใน



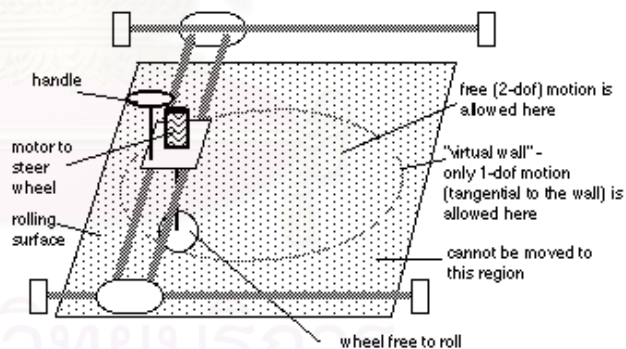
ตำแหน่งที่ถูกต้อง ส่วนมนุษย์นั้นจะเป็นผู้ควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าประกอบประตู่ เพื่อป้องกันไม่ให้ประตูกระแทกกับตัวถังรถ

### 1.1 หลักการทำงานของโคบอต

ความแตกต่างระหว่างหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยทั่วไปกับโคบอต คือ หุ่นยนต์ที่ใช้ทั่วไปจะใช้อุปกรณ์ต้นกำลังขับเคลื่อนที่ข้อต่อของหุ่นยนต์ การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เกิดขึ้นจากการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ต้นกำลังเหล่านี้ ถ้าต้องการให้หุ่นยนต์รับภาระได้สูง จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต้นกำลังขนาดใหญ่และกำลังสูง ถ้าระบบควบคุมเกิดการผิดพลาด หุ่นยนต์อาจเคลื่อนที่ไปกระทบสิ่งที่อยู่ในขอบเขตการทำงาน ก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้ ในทางตรงกันข้ามหลักการของโคบอตจะไม่ใช้อุปกรณ์ต้นกำลังในการขับเคลื่อน แต่ทว่าโคบอตใช้การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อเพื่อกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ ในกรณีง่ายที่สุด คือ การสร้างเส้นทางในระนาบ 2 มิติ ในระนาบ 2 มิติ ถ้าไม่ถูกควบคุมการเคลื่อนที่ของโคบอตจะมีระดับความเร็ว 2 ชั้น โคบอตจะสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ด้วยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแกนเนอรัลไลซ์ทั้งสองแกน ซึ่งเป็นการลดระดับความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหลือเพียง 1 ชั้น ก็คือการบังคับให้การเคลื่อนที่ที่อยู่ในเส้นทางที่กำหนดนั่นเอง เพื่อให้เข้าใจหลักการการทำงานของโคบอตได้ง่ายขึ้น ขอยกตัวอย่างโคบอตที่ง่ายที่สุดคือ ยูนิไซเคิลโคบอต ดังแสดงไว้ในรูป 1.1 b)



รูปที่ 1.1 a) Planar robot



รูปที่ 1.1 b) Unicycle cobot

ยูนิไซเคิลโคบอตประกอบด้วยล้อ, โครงสร้าง x-y, และอุปกรณ์วัดแรง เมื่อมนุษย์ต้องการเคลื่อนที่ โคบอตจะวัดแรงที่มนุษย์ต้องการไปและหมุนล้อให้ไปในทิศทางที่นั้น ทำให้มนุษย์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระนาบ x-y และเมื่อต้องการให้มนุษย์เคลื่อนที่ในเส้นทางที่กำหนดไว้ โคบอตจะบิดล้อให้อยู่ในแนวสัมผัสของเส้นทางเคลื่อนที่ ถ้าปรับการเลี้ยวของล้ออย่างเหมาะสมก็สามารถบังคับให้ล้อกลิ้งไปตามเส้นทางที่เราต้องการ (เปรียบเทียบหุ่นยนต์ เช่น Planar robot ในรูปที่ 1.1a การเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด จะทำโดยการสร้างแรงจะอุปกรณ์ต้นกำลังชนิดต่างๆ สร้างแรงขับเคลื่อนให้ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด) ในกรณียูนิไซเคิลโคบอต มุมบิด

ของล้อย คือ ตัวกำหนดอัตราครระหว่างความเร็วในแกน  $x$  และแกน  $y$  บนพื้นราบนั่นเองและจะเห็นได้ว่าอัตราครระหว่างความเร็วในแกน  $x$  และแกน  $y$  จะสามารถปรับอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องโดยอาศัยการบิดมุมเกลียวของล้อย ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่า ล้อยเป็นระบบส่งกำลังแบบปรับอัตราทดต่อเนื่อง (Continuously Variable Transmission; CVT) ชนิดหนึ่ง ชีวิตที่นำมาใช้กับโคบอดเรียกอีกอย่างว่า ข้อต่อโคโบติก ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของหุ่นยนต์โคบอด ชีวิตที่นำมาใช้ในโคบอด จะทำหน้าที่ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแกนเจเนอเรตไลซ์ของโคบอด ทำให้โคบอดเหลือระดับความเร็วเพียง 1 ชั้นเท่านั้น การเคลื่อนที่ของโคบอดจะเคลื่อนที่ตามแรงของผู้ใช้ ในทิศทางนี้เท่านั้น การสร้างแรงต้านของยูนิตไซเคิลโคบอด เพื่อบังคับให้ผู้ใช้งานในเส้นทางที่กำหนด นั้น จะได้จากแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างล้อยกับพื้นผิว ซึ่งไม่ใช่การสร้างแรงจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนโดยตรงเช่นหุ่นยนต์ทั่วไป ข้อแตกต่างระหว่างโคบอดและหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปจะสรุปไว้ในตารางที่ 1.1



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	หุ่นยนต์อุตสาหกรรม	หุ่นยนต์โคโบริค
แนวคิด	ออกแบบเพื่อให้ทำงานในอุตสาหกรรม โดยไม่มีมนุษย์อยู่ในขอบเขตการทำงาน	ออกแบบให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ ในขณะที่ยังรับภาระได้สูง
ประเภทของหุ่นยนต์	ระบบแอคทีฟ สามารถให้กำลังงานออกจากตัวเองได้	ระบบแพสซีฟ ไม่สามารถให้กำลังจากตัวเองได้ (ยกเว้นในกรณีของโคบอตเสริมกำลัง)
รูปแบบของข้อต่อ	แต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์จะติดตั้งอุปกรณ์ต้นกำลังแบบต่างๆ ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ เช่นมอเตอร์	ใช้ระบบส่งกำลังปรับอัตราทดต่อเนื่อง ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของโคบอต
แรงที่ปลายแขนหุ่นยนต์	เกิดจากอุปกรณ์ต้นกำลังตามข้อต่อต่างๆ เช่น แรงบิดของมอเตอร์	เกิดจากแรงปฏิกิริยา เช่น แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ในระบบส่งกำลังแบบอัตราทดต่อเนื่อง
การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่	ใช้แรงที่เกิดจากอุปกรณ์ต้นกำลังในการสร้างที่เกิดขึ้นบนปลายแขนเพื่อบังคับทิศทางเคลื่อนที่	ใช้การเปลี่ยนทิศทางของแรงของผู้ใช้ให้ไกลไปตามเส้นทางการเคลื่อนที่
กรณีที่เกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระบบ	สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเอง อาจเคลื่อนที่ไปทำอันตรายต่อสิ่งที่อยู่ในขอบเขตการทำงาน	ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตนเอง จึงไม่เป็นอันตราย
กำลังที่ใช้ในการขับ	ใช้กำลังในการขับสูงตามภาระที่ใช้งาน เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ต้นกำลังสร้างแรงขับโดยตรง	ใช้กำลังต่ำเนื่องจากใช้กำลังในการเปลี่ยนทิศทางของแรงจากผู้ใช้เท่านั้น

ตารางที่ 1.1 แสดงความแตกต่างระหว่างหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปกับโคบอต

## 1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

จากหลักการทำงานของโอบอดดั่งที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าโอบอดจะใช้ข้อต่อโคโบติกในการควบคุมการเคลื่อนที่ ในปัจจุบันการเชื่อมต่อของข้อต่อแต่ละข้อต่อของโอบอด จะใช้ชิ้นส่วนคงรูป เช่น เพลหรือพื้นที่มีความเสียดทานกับล้อ ทำให้เกิดข้อจำกัดในการออกแบบโอบอดเนื่องจากขนาดและน้ำหนัก และวิธีการเชื่อมต่อระบบส่งกำลังระหว่างแต่ละข้อต่อของโอบอด ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการศึกษาข้อต่อโคโบติกรูปแบบใหม่ที่มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบโอบอดที่ซับซ้อน โดยการสร้างข้อต่อโคโบติกด้วยระบบของไหล

## 1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพัฒนาข้อต่อโคโบติกรูปแบบใหม่ด้วยระบบของไหลที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานและการเชื่อมต่อระหว่างแต่ละข้อต่อของโอบอดมากกว่าการใช้ชิ้นส่วนคงรูปและสร้าง x-y โอบอดเพื่อศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อโคโบติก

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการศึกษาพัฒนาและสร้างข้อต่อโคโบติกด้วยระบบของไหล และนำมาประกอบสร้างโอบอด x-y โดยจะศึกษาและทดสอบการทำงานในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อโคโบติกทางทฤษฎีโดยการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อดูพฤติกรรมของข้อต่อโคโบติกก่อนนำไปสร้างจริง
  2. ทำการทดสอบข้อต่อโคโบติกแบบของไหลกับโอบอด x-y ที่สร้างขึ้น โดยการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ รูปแบบต่างๆ เช่น เส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงมีมุมต่างๆ
- สำหรับความแม่นยำยังไม่สามารถกำหนดลงไปได้เนื่องจาก ความแม่นยำขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายๆด้าน เช่น แรงทำกระทำจากมนุษย์ และแรงเฉื่อยที่เกิดจากน้ำหนักของอุปกรณ์ ฯลฯ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

จากผลของงานวิจัยนี้ จะทราบถึงพฤติกรรมของข้อต่อโคโบติกแบบของไหลและสามารถนำข้อต่อโคโบติกแบบของไหลไปพัฒนาสร้างโอบอดที่มีความหลากหลายหรือซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งคาดหวังว่าจะมีประโยชน์ต่อการพัฒนาทางด้านหุ่นยนต์, เทคโนโลยีการผลิตในอุตสาหกรรม, เทคโนโลยีที่ต้องใช้มนุษย์ต้องการทำงานร่วมกับหุ่นยนต์โดยตรง และเพื่อเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับพัฒนาข้อต่อโคโบติกต่อไป

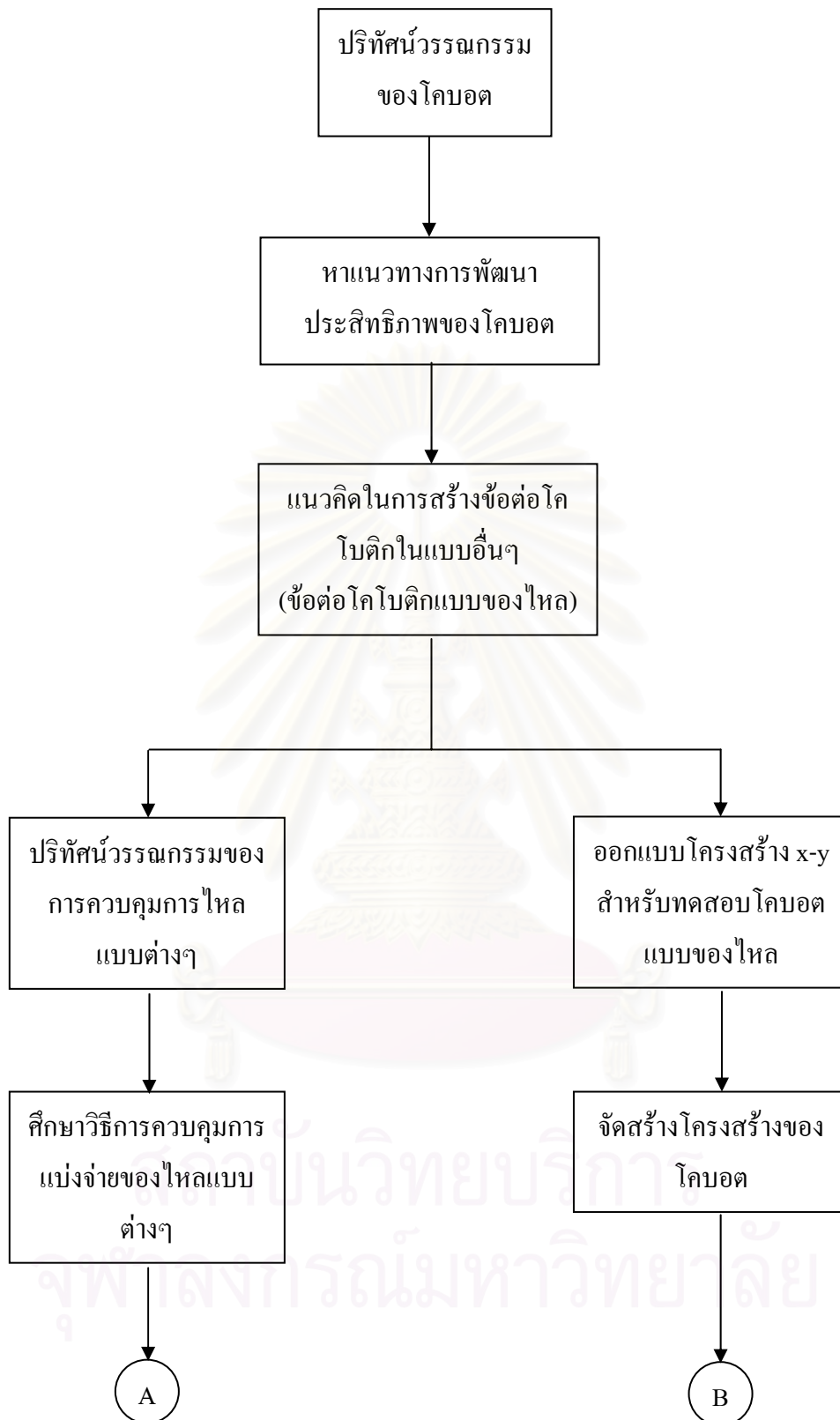
## 1.6 ขั้นตอนการวิจัย

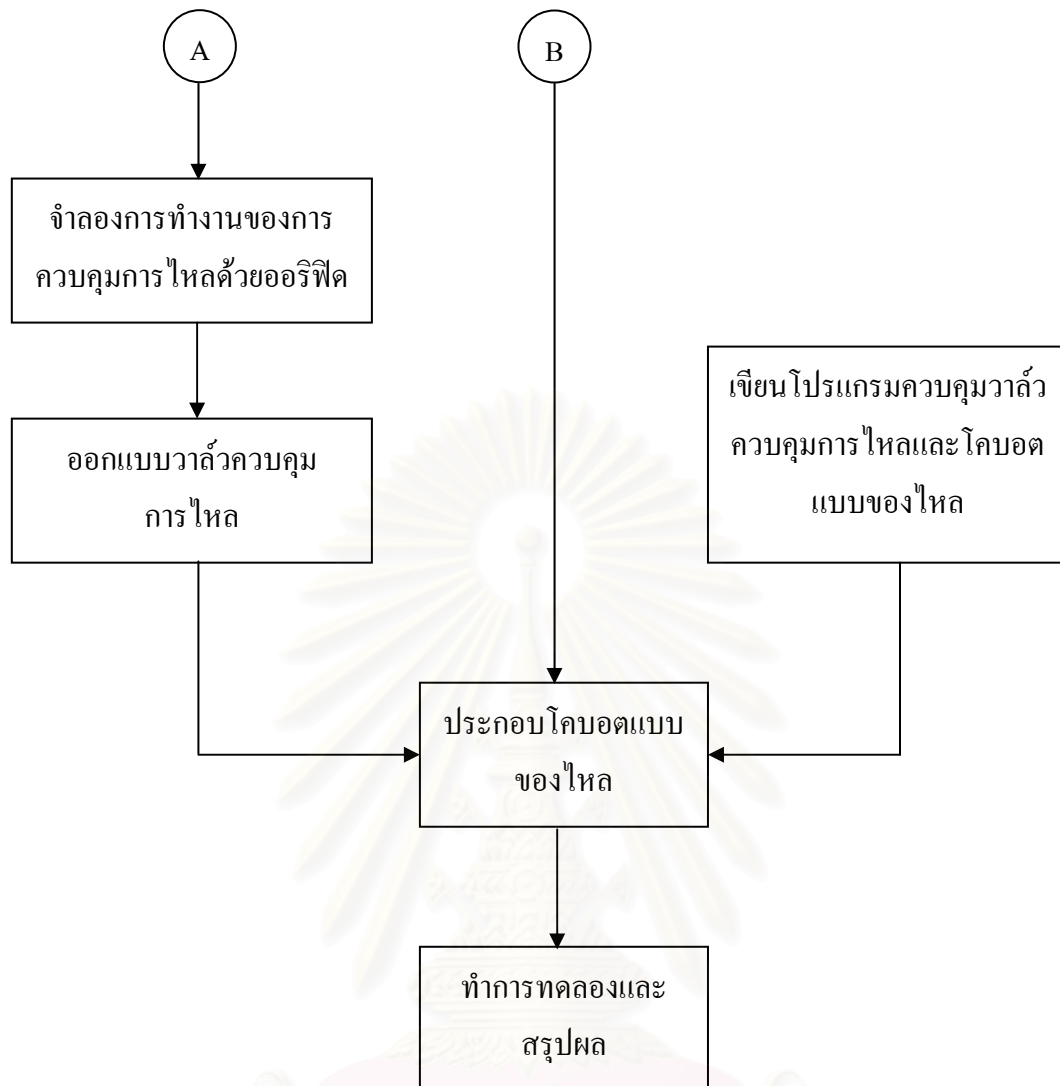
การวิจัยจะแบ่งเป็นส่วนหลักๆ คือ

- 1) ศึกษาการทำงานของโคบอลต์และข้อต่อโคบอลต์
  - 2) ออกแบบรูปแบบของข้อต่อโคบอลต์ด้วยระบบของไหลที่เหมาะสม
  - 3) ศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อโคบอลต์ด้วยระบบของไหลที่ทำการออกแบบ
  - 4) สร้างโคบอลต์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของข้อต่อโคบอลต์
- ลำดับขั้นตอนต่างๆจะแสดงในไดอะแกรมดังนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 1.2 ไลอะแกรมแสดงขั้นตอนในการทำวิจัย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



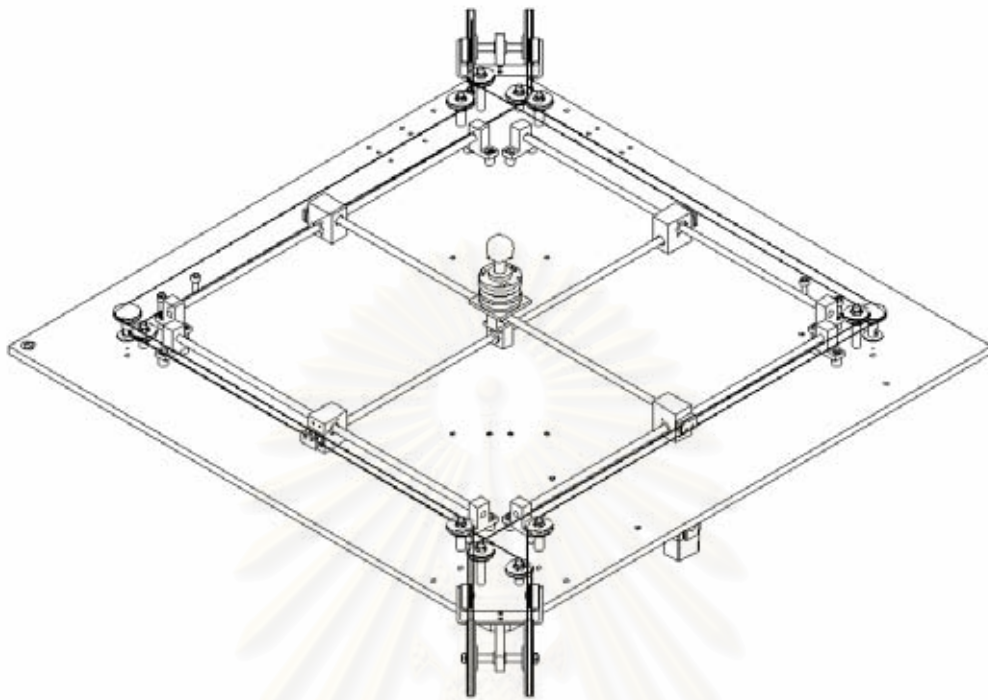
### 1.7 ตารางเวลา

งาน	เดือนที่										
	1-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	27-30	31
พิธีศันวรดกรรม	●	●									
ศึกษาแนวทางพัฒนาข้อต่อโคโบติก	●	●									
ศึกษาแนวการสร้างข้อต่อโคโบติกด้วยระบบของไหล		●		●							
ศึกษาทฤษฎีของระบบนิวเมติกและทำการจำลองระบบ		●	●								
เสนอโครงร่างวิทยานิพนธ์		●	●								
ออกแบบและสร้างโครงสร้างของหุ่นยนต์โคโบติก			●			●					
ออกแบบและจัดสร้างวาล์วควบคุมการไหล						●	●				
ปรับปรุงโครงสร้างหุ่นยนต์โคโบติก							●	●			
สร้างระบบควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคโบติก					●				●		
ทดลองและสรุปผล								●	●		
เรียบเรียงเอกสารวิทยานิพนธ์									●	●	
สอบวิทยานิพนธ์										●	●

ตารางที่ 1.2 แสดงช่วงเวลาในการทำวิจัย



### 1.8 ส่วนประกอบของโคบอด x-y



รูปที่ 1.3 โคบอด x-y

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 ปริศน์วรรณกรรม

### 2.1 งานวิจัยทางด้านหุ่นยนต์โคโบริก

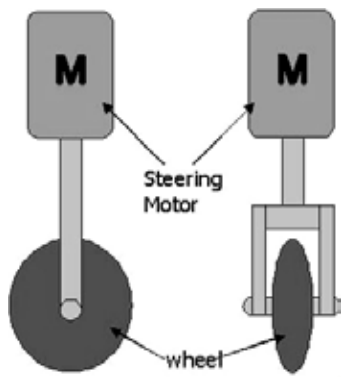
ในปีค.ศ. 1996 คณะวิจัยจากมหาวิทยาลัยนอร์ทเวสเทิร์น ได้นำเสนอรูปแบบใหม่ของหุ่นยนต์ขึ้น นั่นก็คือโคบอต[1] โคบอตถูกออกแบบเพื่อความปลอดภัยในการทำงานร่วมกันระหว่างโคบอตกับมนุษย์ ในปัจจุบันโคบอตได้ถูกพัฒนาขึ้นในหลายๆรูปแบบ แต่โคบอตจะใช้รูปแบบข้อต่อของโคบอตอยู่เพียง 2 รูปแบบเท่านั้น คือ ข้อต่อโคโบริกแบบล้อ และข้อต่อโคโบริกแบบทรงกลม การอธิบายลักษณะของโคบอตในรูปแบบต่างๆ จะขอแบ่งรูปแบบตามรูปแบบของข้อต่อของโคบอต

### 2.2 ข้อต่อโคโบริกแบบล้อ

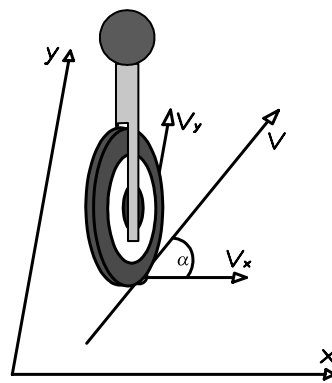
ข้อต่อแบบล้อในรูปที่ 2.1 a) ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญคือล้อและมอเตอร์ปรับมุมเลี้ยวตามรูป การทำงานของข้อต่อแบบล้อนี้อาศัยหลักการทำงานดังในรูปที่ 2.1 b) พิจารณาล้อที่มีความเร็ว  $u$  เคลื่อนที่อยู่ที่ในโคออดิเนต  $x$ - $y$  ความเร็ว  $u$  จะมีองค์ประกอบในแนวแกน  $x$  และ  $y$  เป็น  $u_x$  และ  $u_y$  ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่างความเร็ว  $u_x$  และ  $u_y$  จะถูกกำหนดด้วยมุม  $\alpha$  ของล้อ ตามสมการ

$$\tan \alpha = \frac{u_x}{u_y} \quad (2.1)$$

มุม  $\alpha$  ดังกล่าวนี้ยังสามารถปรับได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถควบคุมอัตราทดได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถสร้างอัตราทดได้ตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  หรืออาจกล่าวได้ว่าล้อทำหน้าที่เป็นระบบส่งกำลังปรับอัตราทดต่อเนื่องในการปรับอัตราทดระหว่างความเร็ว  $u_x$  และ  $u_y$  ซึ่งนำไปใช้เป็นข้อต่อโคโบริกแบบล้อ



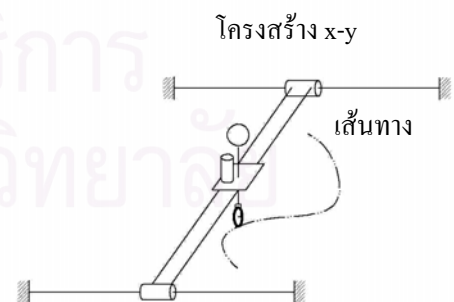
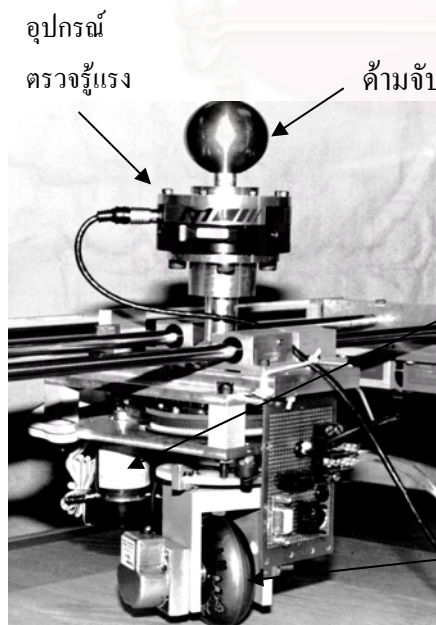
รูปที่ 2.1 a) แผนผังของข้อต่อโคโบติกแบบล้อ



รูปที่ 2.1 b) องค์ประกอบของความเร็วของล้อ

2.2.1 ยูนิตไชเคิลโคบอต

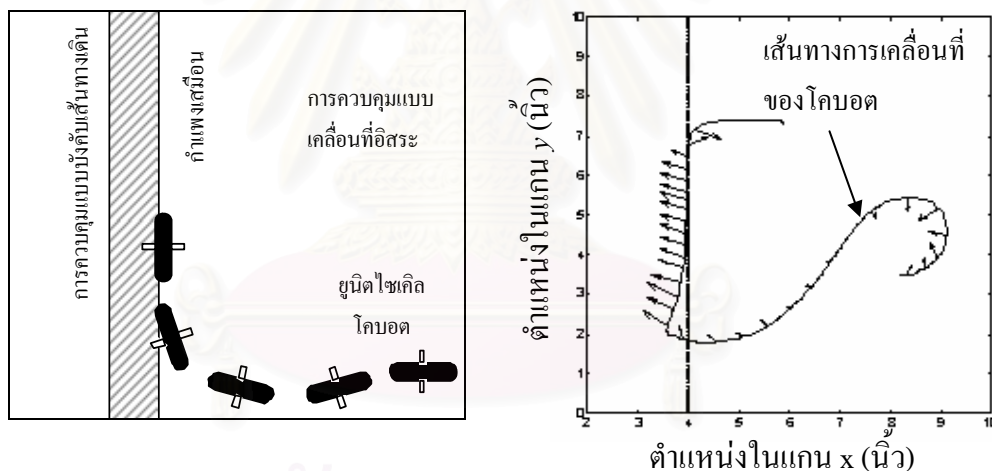
สำหรับโคบอตที่สร้างจากข้อต่อโคโบติกแบบล้อที่มีรูปแบบง่ายที่สุด คือ ยูนิตไชเคิลโคบอต เป็นโคบอตแบบล้อมีพื้นที่การทำงานอยู่ในระนาบ x-y ตัวโคบอตประกอบด้วยโมดูลของล้อที่ถูกยึดอยู่บนโครงสร้าง x-y ตามรูปที่ 2.2 การควบคุมมุมเลี้ยวของล้อจะควบคุมโดยการใช้มอเตอร์ซึ่งติดตั้งอยู่บนโมดูลของล้อ มอเตอร์ที่ติดตั้งเข้าไปนี้จะไม่ส่งผลใด ๆ ต่อการกลิ้งของล้อ แต่ทำหน้าที่เพียงควบคุมมุมเลี้ยวของล้อ  $\alpha$  , เพื่อปรับอัตราเร็วระหว่างความเร็ว  $u_x$  และ  $u_y$  เท่านั้น ส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของโคบอตถูกบังคับด้วยมุม  $\alpha$  นี้



รูปที่ 2.2 ข้อต่อโคโบติกแบบล้อ[1]

การทำงานของยูนิทไซเคิลโคบอตแบ่งเป็นสองแบบ คือ แบบเคลื่อนที่อิสระและแบบเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด ในการเคลื่อนที่แบบอิสระ ระบบควบคุมของโคบอต จะปรับมุมเลี้ยวให้อยู่ในทิศทางเดียวกับแรงที่ผู้ใช้กระทำ ทิศทางของแรงจะวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดอยู่กับค้ำจับ ในการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด ระบบควบคุมจะปรับมุมเลี้ยวให้ล้อกลิ้งไปตามเส้นทางที่ต้องการ

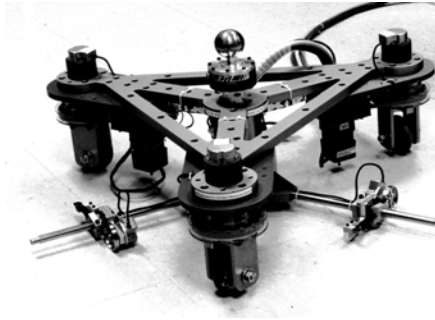
การใช้งานโคบอตแบบหนึ่งที่เป็นประโยชน์มาก คือ การสร้างกำแพงเสมือน กำแพงเสมือนจะสร้างจากการทำงานในแบบเคลื่อนที่อิสระ และแบบเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดร่วมกัน เมื่อโคบอตอยู่นอกกำแพงเสมือน โคบอตจะสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระในการทำงานแบบเคลื่อนที่อิสระ แต่เมื่อโคบอตเคลื่อนที่เข้ามาถึงแนวกำแพง ระบบควบคุมจะเปลี่ยนการควบคุมเป็นแบบการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด จนกระทั่งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงวัดได้ว่า แรงที่ผู้ใช้กระทำมีทิศทางตั้งออกจากกำแพง ตัวควบคุมจะเปลี่ยนการควบคุมจากการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด ไปเป็นการเคลื่อนที่อิสระยอมให้ผู้ใช้ดึง โคบอตออกจากแนวกำแพง ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการในการสร้างกำแพงเสมือนและเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจริง[1]

### 2.2.2 สกูดเตอร์โคบอต

หลังจากยูนิทไซเคิลโคบอต สกูดเตอร์โคบอต[2] ได้ถูกพัฒนาขึ้น สกูดเตอร์โคบอตจะมีหลักการทำงานคล้ายกับ ยูนิทไซเคิลโคบอตแต่จะเพิ่มล้อขึ้นมาอีก 2 ล้อ ดังภาพที่ 2.4 ทำให้โคบอตสามารถทรงตัวได้เอง และสามารถเคลื่อนที่ในพื้นที่ราบได้อย่างอิสระพื้นที่การทำงานของสกูดเตอร์โคบอตจะกลายเป็น  $x-y-\theta$  คือ สามารถเคลื่อนที่ในระนาบ  $x-y$  และสามารถหมุนตัวได้ โคบอตตัวนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริงโดยบริษัท เชนเนอร์รัลมอเตอร์ เพื่อใช้ในการประกอบประตูดึงเข้ากับตัวถังรถ ในรูปที่ 2.5



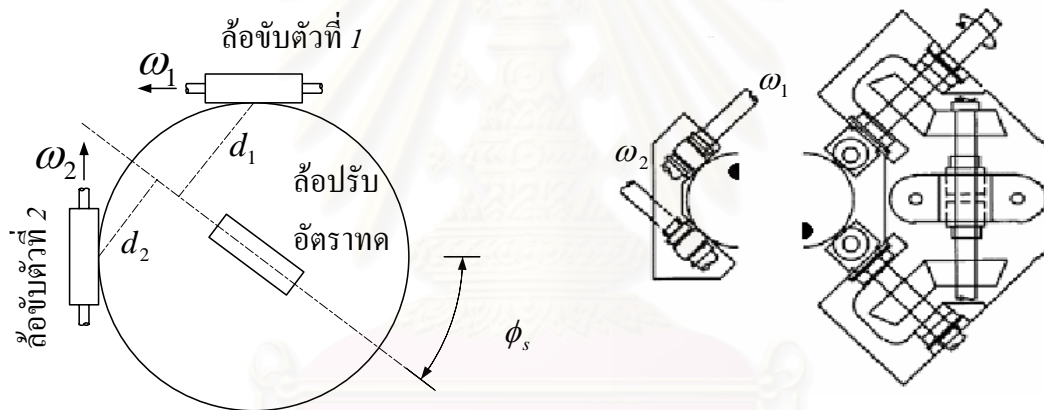
รูปที่ 2.4 สกูดเตอร์โคบอต[2]



รูปที่ 2.5 โคบอตในอุตสาหกรรม[4]

### 2.3 ข้อต่อโคโบติกแบบทรงกลม

ข้อต่อโคโบติกแบบทรงกลมหรือซีวีทีทรงกลมถูกพัฒนาโดย C. Moore [3]. ข้อต่อทรงกลมจะเหมาะสมในกรณีที่ โคบอตมีลักษณะเป็นแขนกล ข้อต่อทรงกลมเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้ายกับล้อใน ยูนิคไซเคิลโคบอตแต่เป็นการปรับอัตราทดเชิงมุมแทน



รูปที่ 2.6 แสดงหลักการทำงานและส่วนประกอบคร่าวๆ ของข้อต่อโคโบติกแบบทรงกลม [3]

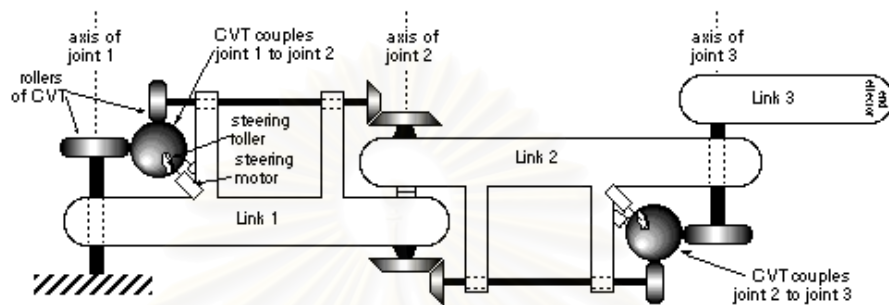
จากรูปที่ 2.6 ข้อต่อทรงกลมจะประกอบไปด้วยล้อขับ ซึ่งเป็นล้อที่ต่อเพลาออกไปใช้ในงาน ล้อตามเป็นล้อที่ใช้ประกอบทรงกลมให้ยึดอยู่กับที่ และล้อปรับอัตราทด 2 ตัวทางด้านหน้า (ล้อตรงกลาง) และด้านหลังทำหน้าที่ในการปรับแกนหมุนของทรงกลม อัตราทดระหว่าง  $\omega_1$  กับ  $\omega_2$  จะขึ้นอยู่กับค่า  $d_1$  และ  $d_2$  ซึ่งจะแปรผันกับมุมเลี้ยวของล้อปรับมุมเลี้ยว  $\phi_s$  ตามความสัมพันธ์ (2.1)

$$\frac{d_2}{d_1} = \tan(\phi_s) \Rightarrow \frac{\omega_2}{\omega_1} = \tan(\phi_s) \quad (2.1)$$



ดังนั้นการปรับอัตราทดของข้อต่อโคโบริคแบบทรงกลมทำได้โดยการปรับมุมเลี้ยว  $\phi$  ซึ่งก็คือการบิดล้อปรับอัตราทดนั่นเอง ในการสร้างข้อต่อโคโบริคแบบทรงกลมชุดล้อปรับอัตราทด จะถูกออกแบบให้ทำหน้าที่ยึดทรงกลมไปด้วย ทำให้ดัดล้อตามออกไปได้ตามรูปที่ 2.6 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของข้อต่อทรงกลม ได้แก่

### 2.3.1 โบริคแบบอนุกรม

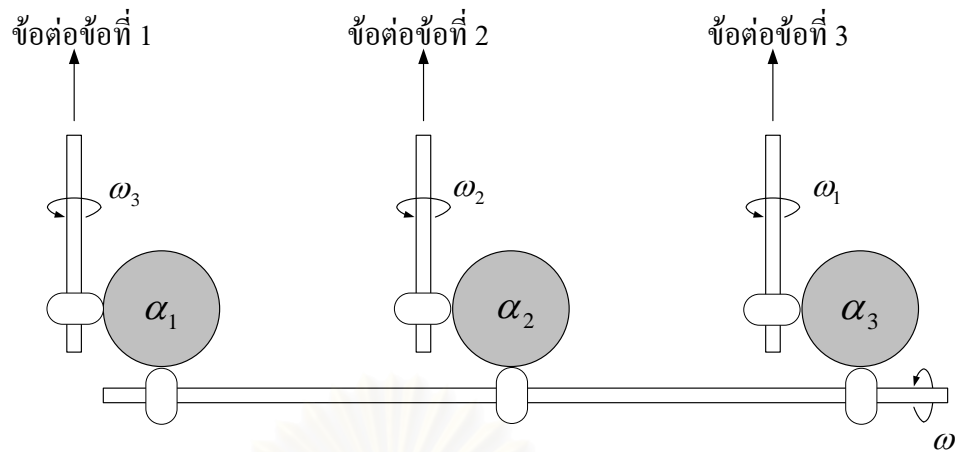


รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของโบริคแบบอนุกรม[1]

ในภาพ 2.7 เป็นการประยุกต์ข้อต่อทรงกลม มาสร้างโบริคแบบอนุกรมซึ่งยังไม่ได้มีการสร้างขึ้น ตามรูปที่ 2.7 ซีวีทีหนึ่งชุดทำหน้าที่สร้างอัตราทดระหว่างข้อต่อโคบริค ข้อต่อทรงกลมตัวที่ 1 ทำหน้าที่สร้างอัตราทดระหว่างข้อต่อที่ 1 กับข้อต่อที่ 2 ข้อต่อทรงกลมตัวที่ 2 ทำหน้าที่สร้างอัตราทดระหว่างข้อต่อ 2 กับข้อต่อ 3 ดังนั้นความเร็วเชิงมุมของทั้ง 3 ข้อต่อจะมีอัตราทดต่อกันทั้งหมด ดังนั้นโบริคแบบอนุกรมจะมีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับ 1

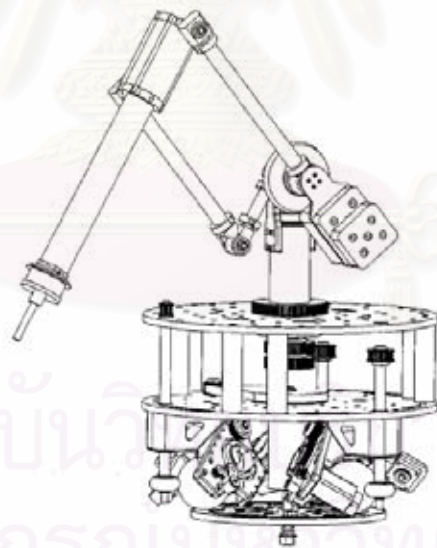
### 2.3.2 โบริคเสริมกำลัง

ถ้านำข้อต่อทรงกลมมาต่อขนานกันดังรูปที่ 2.8 แล้วนำมอเตอร์มาต่อเข้ากับเพลาคู่ต่อขนานกัน และกำหนดให้มอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยความเร็ว  $\omega_0$  เนื่องจากข้อต่อทรงกลมแต่ละชุดสามารถปรับอัตราทดได้อิสระ ดังนั้นความเร็วเชิงมุม  $\omega_1, \omega_2$  และ  $\omega_3$  ไปต่อกับข้อต่อของโบริคก็จะสามารถขับเคลื่อนโบริคได้ โดยใช้มอเตอร์เพียงตัวเดียว การควบคุมโบริคก็จะควบคุมที่อัตราทด ( $\alpha$ ) ของ ซีวีที แต่ละชุด ตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงหลักการใช้ข้อต่อแบบทรงกลมในโคบอลตเสริมกำลัง[1]

ตัวอย่างของโคบอลตเสริมกำลังอยู่ในรูปที่ 2.9 เป็นโคบอลตที่มี 3 ข้อต่อ มีปริมาตรการทำงานใน x-y-z ชุดข้อต่อทรงกลมทั้งสามชุดจะติดตั้งอยู่ทางด้านล่างไม่เคลื่อนที่ ส่งกำลังผ่านเฟืองทดขึ้นไปให้กับข้อต่อต่าง ๆ ของโคบอลตที่อยู่ทางด้านบน สำหรับโคบอลตตัวอยู่ระหว่างดำเนินการสร้าง



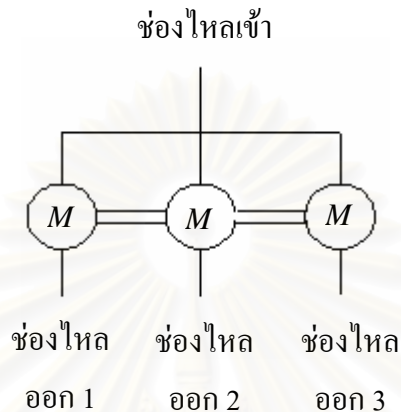
รูปที่ 2.9 โคบอลตเสริมกำลังที่ใช้ข้อต่อแบบทรงกลม [1]

อีกตัวอย่างหนึ่งของโคบอลตเสริมกำลัง คือ แกรนทีโคบอลตตามลักษณะดังรูปที่ 2.10 โคบอลตตัวนี้จะใช้วิธีที่สองชุดขับเคลื่อนผ่านสายเคเบิลตามภาพ ถ้า  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  หมุนตามกันโคบอลตจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน y ถ้า  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  มีทิศทางตรงข้ามกันโคบอลตจะเคลื่อนที่ตามแกน x ภาพข้างล่างจะเป็นภาพแสดงการติดตั้งข้อต่อทรงกลมทั้งสองชุด



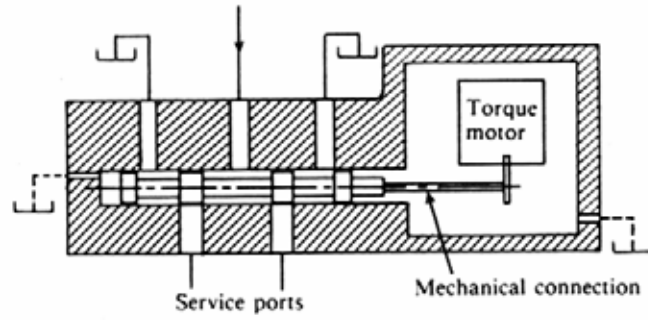


เท่ากัน ดังนั้นอัตราการไหลที่ได้จากมอเตอร์แต่ละตัวจะเท่ากัน หรือในกรณีที่ต้องการอัตราการไหลเป็นอัตราส่วนกันก็สามารถนำเกียร์ทดมาต่อระหว่างเพลลาของมอเตอร์ได้ ข้อเสียของวิธีการนี้คือการรั่วของของไหลที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขึ้นอยู่กับความดันในแต่ละสาย ที่ความดันสูงๆการรั่วของของไหลจะมากขึ้นตามไปด้วย แต่จะมีข้อดีคือสามารถแบ่งจ่ายอัตราการไหลได้หลายท่อ เนื่องจากความดันตกคร่อมมีน้อยกว่าแบบออริฟิต

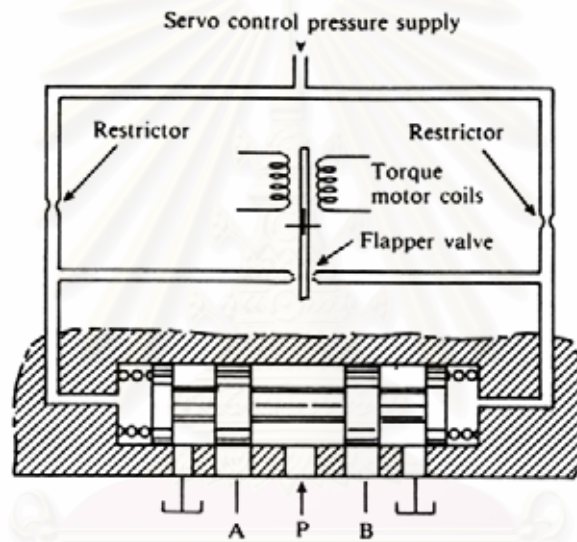


รูปที่ 2.12 แสดงหลักการการทำงานของวาล์วแบ่งอัตราการไหลแบบมอเตอร์[14]

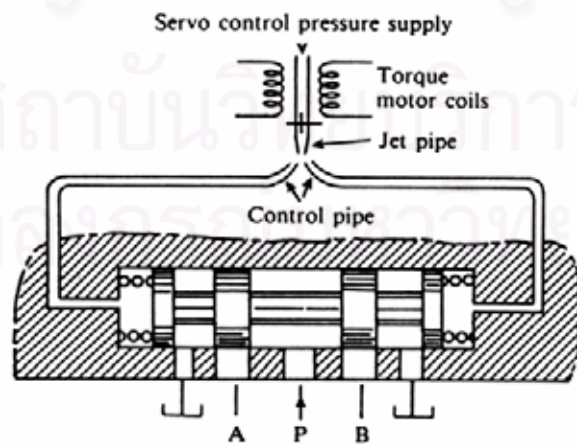
หลักการของการแบ่งจ่ายของไหลนี้ เป็นหลักการที่นำไปใช้ในเซอร์โววาล์ว ที่เป็นวาล์วสำหรับควบคุมการเปิด/ปิดวาล์วให้มากหรือน้อยได้ตามต้องการ แตกต่างจากวาล์วเปิดปิดทั่วไปที่มีเพียงจังหวะเปิดเต็มที่หรือปิดสนิทเท่านั้น เซอร์โววาล์วโดยทั่วไปจะใช้เพื่อลดการกระชากของของไหลในระบบ การทำงานของเซอร์โววาล์วจะใช้อุปกรณ์ต้นกำลังต่างๆ มาสร้างแรงดันแกนวาล์วของวาล์วให้เคลื่อนที่ให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ส่วนประกอบของเซอร์โววาล์วชนิดต่างๆจะแสดงในรูปที่ 2.13 ถึงรูปที่ 2.15 ในรูปที่ 2.13 เป็นการใช้มอเตอร์มาขับเคลื่อนแกนวาล์วโดยผ่านระบบทางกล ในรูปที่ 2.14 แกนวาล์วของเซอร์โวจะถูกดันด้วยความดันจากของไหลส่งแรงผ่านไปให้กับสปริงที่อยู่ด้านตรงข้าม สปริงก็จะยุบตัวตามแรงที่กระทำแกนวาล์วก็จะเคลื่อนที่เท่ากับระยะยุบตัวของสปริง ความดันของของไหลถูกควบคุมด้วยวาล์วแฟลปเปอร์[14] ในรูปที่ 2.15 มีหลักการทำงานคล้ายกับแบบวาล์วแฟลปเปอร์ของไหลจากหัวพ่น จะถูกพ่นเข้าสู่ท่อที่ส่งลมไปดันแกนวาล์ว การปรับทิศทางของการพ่นจะควบคุมด้วยมอเตอร์



รูปที่ 2.13 เซอร์โววาล์วแบบควบคุมด้วยมอเตอร์[14]

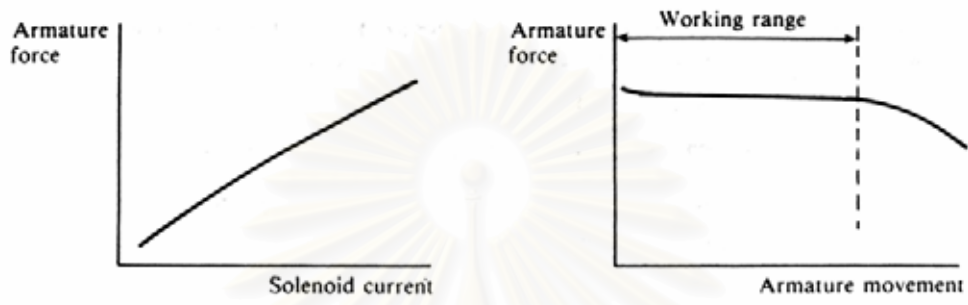


รูปที่ 2.14 เซอร์โววาล์วแบบควบคุมด้วยวาล์วแฟลปเปอร์ [14]



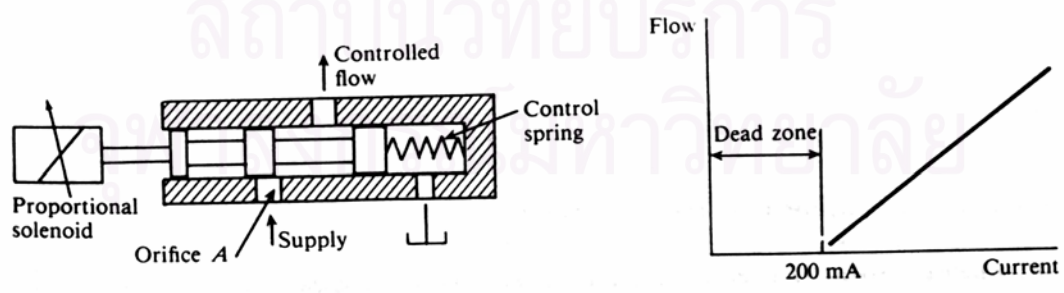
รูปที่ 2.15 เซอร์โววาล์วแบบควบคุมด้วยหัวพ่น[14]

นอกจากเซอร์โวแล้ว พรอพโพชั่นนอลวาล์วเป็นวาล์วควบคุมการไหลที่มีประสิทธิภาพสูงอีกแบบหนึ่ง พรอพโพชั่นนอลวาล์วแตกต่างจากเซอร์โววาล์วตรงที่ใช้ขดลวดเหนี่ยวนำสร้างแรงดันให้กับแกนวาล์วของวาล์ว ซึ่งแรงที่ได้จากขดลวดเหนี่ยวนำนี้แปรผันตรงกับกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ และไม่ขึ้นกับระยะการเคลื่อนที่ของแกนวาล์วในช่วงการทำงาน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 a) แสดงความเป็นสัมพัทธ์เชิงเส้นของแรงต่อกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ b) แสดงช่วงการทำงานของขดลวดเหนี่ยวนำ[14]

การควบคุมพรอพโพชั่นนอลวาล์วใช้การเปลี่ยนแปลงกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ และใช้แรงจากขดลวดเหนี่ยวนำกดให้สปริงที่ต่ออยู่กับแกนวาล์วของวาล์วยุบตัว แกนวาล์วของวาล์วก็จะเคลื่อนที่เปิดออริฟิตให้ของไหลไหลผ่านไปได้ ส่วนประกอบคร่าวๆของพรอพโพชั่นนอลแสดงในรูปที่ 2.17.a และอัตราการไหลแปรผันกับกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำตามรูปที่ 2.17.b จากรูปที่ 2.17.b แสดงช่วง Dead zone ของอัตราการไหลซึ่งเกิดขึ้นจากการเสียดสีของแกนวาล์วกับช่องจ่ายลมออก



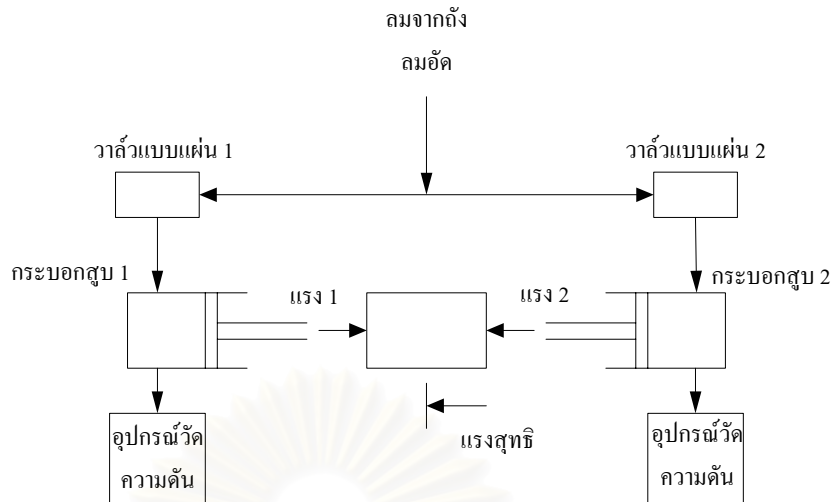
รูปที่ 2.17 a) แสดงส่วนประกอบคร่าวๆของพรอพโพชั่นนอลวาล์ว[14]

รูปที่ 2.17 b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ[14]

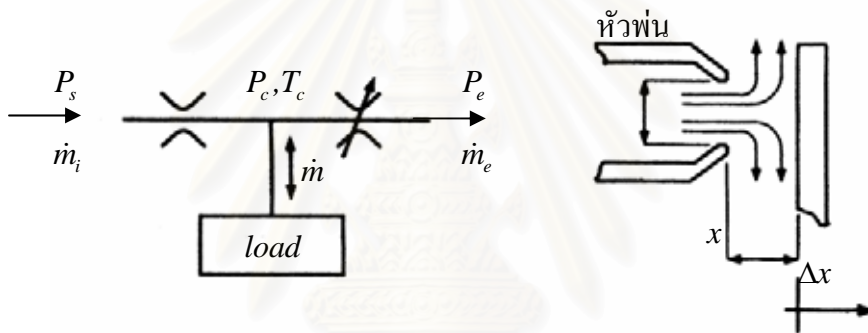
จากหลักการและอุปกรณ์สำหรับควบคุมอัตราการไหลข้างต้น ได้มีนักวิจัยหลายท่านนำไปใช้ในการพัฒนาการควบคุมอุปกรณ์นิวเมติกที่มีความแม่นยำสูง เพื่อใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมควบคุม ซึ่งมีรูปแบบที่หน้าสนใจและสามารถนำมาเป็นแนวคิดในการวิจัยนี้ได้อย่างดี ตัวอย่างของงานวิจัยเหล่านี้ได้แก่

#### 2.4.1 งานวิจัยของ Ben-Dov and S.E. Salcucean [5]

งานวิจัยของ D. Ben-Dov and S.E. Salcucean นำเสนอเรื่องการพัฒนาอุปกรณ์ต้นกำลังในระบบนิวเมติกสำหรับการควบคุมระยะไกล อุปกรณ์ดังกล่าวใช้วาล์วแฟลปเปอร์ ซึ่งเป็นวาล์วปรับอัตราการไหลชนิดหนึ่ง ร่วมกับกระบอกสูบความเสียดทานต่ำ แรงที่เกิดจากกระบอกสูบถูกควบคุมโดยการปรับความแตกต่างของความดันในห้องสูบแต่ละห้อง โดยใช้วาล์วแฟลปเปอร์ อุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย กระบอกสูบนิวเมติกสองกระบอก แต่ละกระบอกจะติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันและมีวาล์วแฟลปเปอร์ควบคุมแยกกัน ลูกสูบของกระบอกสูบยึดติดกับตัวยึดลูกสูบเป็นเชิงเส้น มีภาระติดตั้งไว้อีกหนึ่ง แรงสุทธิที่ได้แปรผันตรงกับความแตกต่างของความดันในกระบอกสูบทั้งสองตัว แผนผังของอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงในผังรูปที่ 2.18 วาล์วควบคุมความดันที่ใช้ควบคุมความดันในกระบอกสูบมีแผนผังคร่าว ๆ ตามรูปที่ 2.19 ลมอัดที่มีความดัน  $P_s$  จากเครื่องอัดลม จะจ่ายผ่านออริฟิตแบบปรับค่าไม่ได้แล้วจึงแยกไหลเข้าสู่กระบอกสูบที่ความดัน  $P_c$  และไหลสู่วาล์วแฟลปเปอร์ที่ทำหน้าที่เป็นออริฟิตแบบปรับค่าได้ก่อนผ่านสู่บรรยากาศภายนอกที่ความดัน  $P_c$  ตามรูปที่ 2.20 ออริฟิตแบบปรับค่าได้ตัวนี้จะทำหน้าที่ในการควบคุมความดันในกระบอกสูบ ถ้าต้องการให้ความดันในกระบอกสูบลดลงก็จะเปิดออริฟิตให้กว้างมากขึ้น ในทางกลับกัน การปิดออริฟิตให้แคบลงจะเป็นการเพิ่มความดันกระบอกสูบให้มากขึ้น ด้วยวิธีการเช่นนี้จะสามารถควบคุมแรงที่ได้จากกระบอกสูบสมการแสดงการไหลเชิงมวลผ่านวาล์วแฟลปเปอร์ D. Ben-Dov , S.E. Salcucean จะใช้ตามสมการ (3.66) และ (3.67) ที่จะกล่าวถึงโดยละเอียดในบทที่ 3 ในสมการนี้อัตราการไหลเชิงมวลจะสัมพันธ์กับความดันก่อนผ่านออริฟิตและหลังผ่านออริฟิต นำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุม จากผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์หลักการควบคุมแรงของกระบอกสูบโดยใช้วาล์วแฟลปเปอร์สามารถให้ผลตอบสนองที่น่าพอใจ



รูปที่ 2.18 การต่ออุปกรณ์ Pneumatic ในงานวิจัย D. Ben-Dov , S.E. Salcucean[6]



รูปที่ 2.19 แสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์[6]

รูปที่ 2.20 วาล์วแฟลปเปอร์[6]

2.4.2 งานวิจัยของ N.O. Vaughan and J.B. Gamble[6]

ในปี 1996 N.O. Vaughan และ J.B. Gamble ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพรอพโพรชันนอลโซลินอยด์วาล์วเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แทนที่วาล์วแฟลปเปอร์แบบเดิมที่ใช้สำหรับควบคุมระบบพลศาสตร์ที่ต้องการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนประกอบของพรอพโพรชันนอลวาล์วที่ใช้ในงานวิจัยจะมีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ ตัววาล์วควบคุมการไหลที่มีแกนวาล์วทำหน้าที่ควบคุมการไหล, ชุดขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับสร้างแรงดันให้แก่แกนวาล์วเคลื่อนที่ และ LVDT ทำหน้าที่วัดตำแหน่งของแกนวาล์วเพื่อมาใช้ในการควบคุม การสร้างแบบจำลองของพรอพโพรชันนอลวาล์วแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สมการพลศาสตร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ และสมการพลศาสตร์ของวาล์วควบคุมการไหล ในส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนสำคัญในงานวิจัยของ N.O. Vaughan คือ การแสดงการสร้างแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นของขดลวดเหนี่ยวนำและการทดลองหาพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของขดลวดเหนี่ยวนำ ในการสร้าง

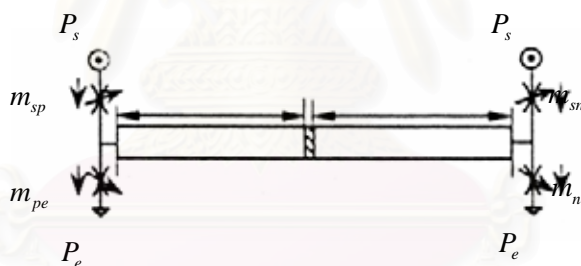


สมการแบบจำลองจะพิจารณาเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ กระแสที่ไหลในขดลวดเป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากผลของฮิสเทอรีซิสและสนามแม่เหล็กตกค้าง ซึ่งส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้หาแบบจำลองได้จากการทำการทดลองแล้วทำ curve fitting

ในการสร้างแบบจำลองของแกนวาล์วของวาล์วควบคุมการไหลจะพิจารณาเป็นระบบ มวลสปริงที่มีตัวหน่วงแบบคูลอมบ์และความหนืด จากผลการวิจัยของ N.O. Vaughan และ J.B. Gamble จะสามารถทำนายถึงพฤติกรรมของพรอพโพรชันนอลวาล์วได้อย่างดี ซึ่งคาดว่าจะมีประโยชน์ในการสร้างโคบอลต์แบบของไหล ถ้าพฤติกรรมของพรอพโพรชันนอลวาล์วที่ใช้มีผลต่อการควบคุมมากจนละเลยไม่ได้

#### 2.4.3 งานวิจัยของ X. Lin, F. Spettel and S. Scavarda[7]

งานวิจัยชิ้นนี้จะนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบอกสูบไร้แกน ที่มีความยาวมากๆ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งของกระบอกสูบ กระบอกสูบไร้แกนที่เหมาะสมกับงานที่มีการเคลื่อนที่ในระยะทางยาวๆ



รูปที่ 2.21 แสดงแผนผังของอุปกรณ์ในงานวิจัย[8]

การใช้กระบอกสูบไร้แกนจะทำให้ประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้ง แต่การที่กระบอกสูบมีความยาวมาก จะทำให้การควบคุมตำแหน่งไม่แม่นยำ เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติของลมอัดในห้องสูบ การสร้างแบบจำลองของกระบอกสูบไร้แกนจะไม่ขอกว่าถึงเนื่องจากไม่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้กับพฤติกรรมจริง ใช้เซอร์โววาล์วในการควบคุมการควบคุมอัตราการไหลเข้าและออกกระบอกสูบของลมอัด แผนผังการต่ออุปกรณ์แสดงในรูปที่ 2.21 อัตราการไหลเชิงมวลที่ไหลเข้าและออกจากกระบอกสูบควบคุมได้จากปรับอัตราการไหล  $\dot{m}_{sp}$ ,  $\dot{m}_{pe}$ ,  $\dot{m}_{sn}$ , และ  $\dot{m}_{ne}$  เซอร์โววาล์วที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็นเซอร์โววาล์วของ Schnelder PVM067 และกระบอกสูบไร้แกนยาว 4.23 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 0.04 เมตร ตัวควบคุมเป็น

คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ถ่ายสัญญาณควบคุมผ่านการ์ด ถ่ายสัญญาณแอนะล็อกและขยายสัญญาณด้วยตัวขยายกระแสเพื่อมาจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำของเซอร์โววาล์ว ตำแหน่งของกระบอกลูกสูบถูกวัดด้วยใช้เอนโคเดอร์ต่อผ่านสายพานไทม์มิ่ง

ผลการทดสอบยังคงมีค่าผิดพลาดระหว่างแบบจำลองและระบบจริงอยู่บ้าง แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ค่าผิดพลาดบางอย่างน่าจะเกิดจากส่วนไม่ได้หาแบบจำลอง เช่น การเปลี่ยนแปลงความถี่ในกระบอกลูกสูบ

#### 2.4.4 งานวิจัยของ E. Richard กับ S.Scavarda[8]

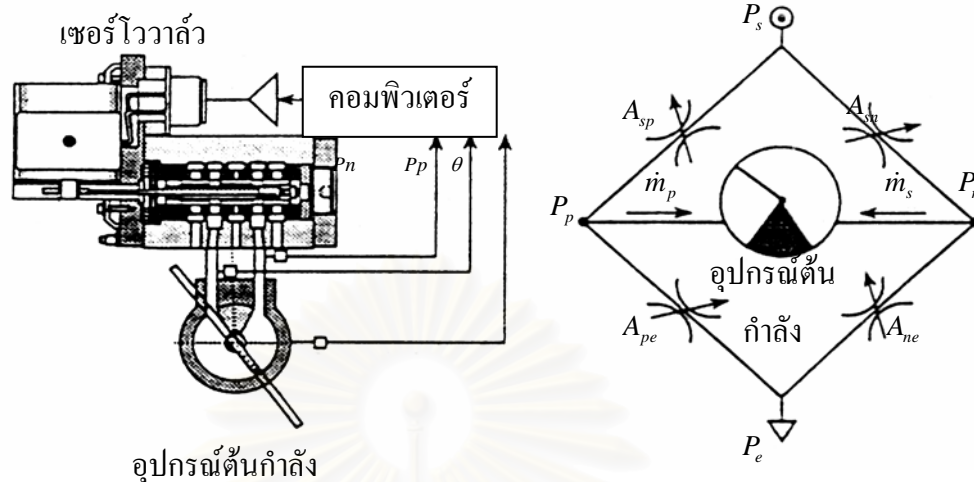
ชิ้นนี้จะกล่าวถึงการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบนิวเมติกไฟฟ้า ผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับการใช้ตัวควบคุมแบบเชิงเส้น ระบบวาล์วนิวเมติกที่ใช้ในการควบคุมเป็นเซอร์โววาล์วตามรูปที่ 2.15 สมการอัตราการไหลเชิงมวลเป็น

$$\dot{m}_p(i, P_p) = A_{sp}(i)D(P_s, P_p) - A_{pe}D(P_p, P_e)$$

$$\dot{m}_n(i, P_n) = A_{sn}(i)D(P_s, P_n) - A_{ne}D(P_n, P_e)$$

โดย  $A_{sp}, A_{pe}, A_{sn}, A_{ne}$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของออริฟิตแปรผันตามกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ และ  $D(P_s, P_p), D(P_p, P_e), D(P_s, P_n), D(P_n, P_e)$  จะเป็นอัตราการไหลเชิงมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของ ออริฟิต ของเซอร์โววาล์ว ค่าต่างๆเหล่านี้หาจากการทดลอง และทำ curve fitting อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังภาพมีลักษณะดังภาพ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 แสดงอุปกรณ์ในงานวิจัย และแผนผังอย่างง่ายของการต่ออุปกรณ์[9]

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เซอร์โววาล์วทำหน้าที่ควบคุมการไหลของลมอัด ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ต้นกำลังแบบหมุน และคอมพิวเตอรืสำหรับควบคุมระบบการต่ออุปกรณ์เทียบได้กับการต่อออริฟิต เป็นวงจรวีลท์สโตนบริดจ์โดยมีอุปกรณ์ต้นกำลังติดตั้งในแนวทแยงของวงจร ระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบประมาณค่าเชิงเส้นของสัญญาณป้อนกลับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีพอสมควร จึงนำที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมโคบอลตในงานวิจัยนี้ได้

**2.4.5 งานวิจัยของ E. Richer and Y. Hurmuzlu[9]**

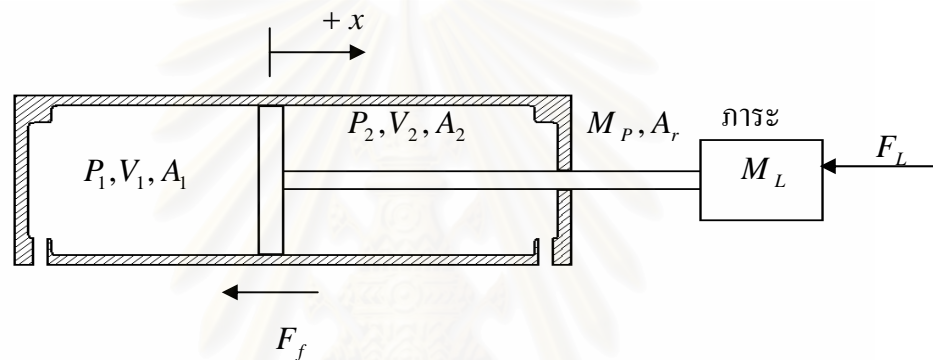
ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนิวเมติกทั้งหมด สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบนิวเมติกทั่วไปได้ ในบทความจะกล่าวถึงการสร้างสมการอธิบายพฤติกรรมของกระบอกสูบ, การไหลผ่านท่อลม, วาล์วโซลินอยด์และการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ สมการเหล่านี้จะนำมาใช้การทำวิจัยโคบอลตแบบของไหลที่จะกล่าวถึงอย่างละเอียดในบทที่ 3



### บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การจำลองระบบเป็นสมการคณิตศาสตร์สำหรับประยุกต์ใช้งานกับระบบนิวเมติกที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย ส่วนหนึ่งจะอ้างอิงมาจากบทความของ Edmond Richer และ Yildirim Hurmuzlu [10] ซึ่งกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาพารามิเตอร์ของระบบนิวเมติกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์นิวเมติกทั่วไปได้

#### 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบอกกลม



รูปที่ 3.1 แผนผังของกระบอกสูบ

งานวิจัยนี้สร้างสมการของกระบอกกลมดังรูปที่ 3.1 สมการพลศาสตร์ของลูกสูบ, ก้านสูบ, และมวลที่เป็นโหลดดังสมการ

$$(M_L + M_p)\ddot{x} + \beta\dot{x} + F_f + F_L = P_1A_1 - P_2A_2 - P_aA_r \quad (3.1)$$

โดย  $M_L$  เป็นโหลดภายนอก,  $M_p$  เป็นมวลของก้านสูบและลูกสูบ,  $x$  เป็นตำแหน่งของลูกสูบ,  $\beta$  เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน,  $F_f$  เป็นแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์,  $F_L$  เป็นแรงจากภายนอก,  $P_1, P_2$  เป็นความดันสมบูรณ์ของห้องสูบที่ 1 และ 2,  $P_a$  เป็นความดันบรรยากาศ,  $A_1, A_2$  เป็นพื้นที่ของหน้าตัดลูกสูบ, และ  $A_r$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของก้านสูบ

สมการแสดงความดันในห้องสูบแต่ละห้องเกิดจากสมการพื้นฐานทางความร้อนได้แก่ สมการก๊าซในอุดมคติ, สมการกฎทรงมวล, และสมการพลังงาน โดยตั้งสมมุติฐานว่า 1) อากาศเป็นก๊าซในอุดมคติ 2) ความดันและอุณหภูมิมีค่าคงที่ทั้งห้องสูบ 3) พลังงานศักย์และพลังงานจลน์ไม่มี

ผลต่อระบบ เริ่มพิจารณาจากสมการก๊าซในอุดมคติ ของระบบควบคุมปริมาตร  $V$  , มวล  $m$  , ความดัน  $P$  , และอุณหภูมิ  $T$  ที่ค่าคงตัวของก๊าซ  $R$

$$P = \rho RT \quad (3.2)$$

จากสมการ continuity equation สมการการไหลของมวลเป็น

$$\dot{m} = \frac{d}{dt}(\rho V) \quad (3.3)$$

หรือ

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \dot{\rho}V + \rho\dot{V} \quad (3.4)$$

โดยที่  $\dot{m}_{in}$  และ  $\dot{m}_{out}$  เป็นอัตราการไหลของมวลเข้าและออกจากห้องสูบ สมการพลังงานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$q_{in} - q_{out} + kC_v(\dot{m}_{in}T_{in} - \dot{m}_{out}T) - \dot{W} = \dot{U} \quad (3.5)$$

โดยที่  $q_{in}$  และ  $q_{out}$  เป็นความร้อน,  $k$  เป็นอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ,  $C_v$  เป็น ค่าความร้อนจำเพาะสำหรับระบบปริมาตรคงที่,  $T_{in}$  เป็นอุณหภูมิของลมไหลเข้ากระบอกสูบ,  $\dot{W}$  เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงงาน,  $\dot{U}$  เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในทั้งหมดจะเป็นไปตามสมการ

$$\dot{U} = \frac{d}{dt}(C_v m T) = \frac{1}{k-1} \frac{d}{dt}(PV) = \frac{1}{k-1} (V\dot{P} + P\dot{V}) \quad (3.6)$$

ในกรณีที่ลมในระบบสมมุติให้เป็นก๊าซในอุดมคติ  $C_v = R/k - 1$  และแทนค่า  $\dot{W} = P\dot{V}$  และสมการ (3.6) ลงในสมการ (3.5)

$$q_{in} - q_{out} + \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho T} (\dot{m}_{in}T_{in} - \dot{m}_{out}T) - \frac{k}{k-1} P\dot{V} = \frac{1}{k-1} V\dot{P} \quad (3.7)$$

สมมติให้ลมไหลเข้ากระบอกสูบมีอุณหภูมิเท่ากับลมที่อยู่ในกระบอกสูบ สมการพลังงานเป็น

$$\frac{k-1}{kP}(q_{in} - q_{out}) + \frac{1}{\rho}(\dot{m}_{in}T_{in} - \dot{m}_{out}T) - \dot{V} = \frac{V}{kP}\dot{P} \quad (3.8)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณสมการ (3.8) สามารถลดรูปได้โดยเงื่อนไขว่าระบบเป็นกระบวนการแบบ adiabatic ( $q_{in} - q_{out} = 0$ ) ดังนั้นสมการ (3.8) สามารถลดรูปเหลือ

$$\dot{P} = k \frac{P}{\rho V}(\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) - k \frac{P}{V}\dot{V} \quad (3.9)$$

แทนค่า  $\rho = \frac{P}{RT}$

$$\dot{P} = k \frac{RT}{V}(\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) - k \frac{P}{V}\dot{V} \quad (3.10)$$

ถ้าพิจารณาระบบให้เป็นแบบไอโซเทอร์มอล ( $T = \text{ค่าคงที่}$ ) ดังนั้นสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจะอยู่ในรูป

$$\dot{U} = C_v \dot{m}T \quad (3.11)$$

และสมการ (3.8) กลายเป็น

$$q_{in} - q_{out} = P\dot{V} - \frac{P}{\rho}(\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \quad (3.12)$$

ดังนั้นสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงความดัน คือ

$$\dot{P} = \frac{RT}{V}(\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) - \frac{P}{V}\dot{V} \quad (3.13)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ (3.10) และสมการ (3.13) จะเห็นว่าแตกต่างกันแค่ทอมอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ  $k$  ดังนั้นทั้งสองสมการสามารถเขียนเป็น

$$\dot{P} = \frac{RT}{V}(\alpha_{in}\dot{m}_{in} - \alpha_{out}\dot{m}_{out}) - \alpha \frac{P}{V}\dot{V} \quad (3.14)$$

ค่าของ  $\alpha, \alpha_{in}, \alpha_{out}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง  $k$  ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการตามในสมการที่ (3.14) ซึ่งยังไม่สามารถกำหนดได้อย่างแน่นอนแต่สามารถประมาณค่า  $\alpha, \alpha_{in}, \alpha_{out}$  ได้ ค่าประมาณจะอยู่ในช่วง  $k-1$  สำหรับกระบวนการอัดลมเข้ากระบอสูบค่าของ  $\alpha_{in}$  ควรมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $k$  และสำหรับกระบวนการจ่ายลมออกจากกระบอสูบค่า  $\alpha_{out}$  ควรมีค่าใกล้เคียงกับ 1 และ  $\alpha = 1.2$  สำหรับลมอัด (นำมาจาก Al Ibrahiim and Otis [10])

เลือกตำแหน่งเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของกระบอสูบให้อยู่กึ่งกลางระยะชัก ปริมาตรของห้องสูบแต่ละห้องเท่ากับ

$$V_i = V_{0i} + A_i \left( \frac{1}{2} L \pm x \right) \quad (3.15)$$

โดยที่  $i$  เป็นลำดับของห้องสูบ,  $V_{0i}$  เป็นปริมาตรที่ไม่มีผลต่อการทำงานของกระบอสูบ,  $A_i$  เป็นพื้นที่ของหน้าตัดกระบอสูบ,  $L$  เป็นระยะชักของลูกสูบและ  $x$  เป็นตำแหน่งของลูกสูบแทนสมการ (3.15) ลงในสมการ (3.14) ซึ่งได้สมการอนุพันธ์ของความดันในแต่ละห้องสูบเป็น

$$\dot{P} = \frac{RT}{V_{0i} + A_i \left( \frac{1}{2} L \pm x \right)} (\alpha_{in}\dot{m}_{in} - \alpha_{out}\dot{m}_{out}) - \alpha \frac{PA}{V_{0i} + A_i \left( \frac{1}{2} L \pm x \right)} \dot{x} \quad (3.16)$$

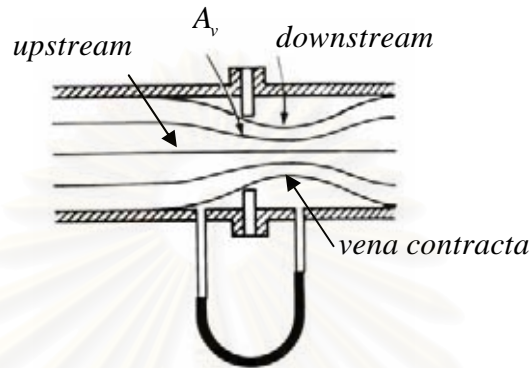
สมการอนุพันธ์ของความดันที่ได้มานี้คือสมการที่รวมผลของ พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอัดตัวและขยายตัวของลมอัดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ, ความแตกต่างของพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบแต่ละด้านและปริมาตรที่ไม่มีผลต่อการทำงาน นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงลมที่ไหลเข้าออกห้องสูบจะมาจาก 1) อุปกรณ์ต้นกำลัง เช่น ถังลมอัด หรือ 2) จากการรั่วผ่านซีลของลูกสูบจากห้องสูบที่มีความดันสูงกว่า ถ้าเป็นกระบอสูบที่ใช้ซีลแบบยางจะมีลมรั่วน้อยมากจึงไม่ต้องพิจารณาถึงจุดนี้ได้ แต่ในกรณีที่ใช้กระบอสูบความเสียดทานต่ำจะต้องนำมาพิจารณาอีกทีหนึ่ง และ 3) การรั่วของลมออกสู่บรรยากาศ

### 3.2 แบบจำลองของโซลินอยด์วาล์ว

สมการแบบจำลองของโซลินอยด์วาล์ว แบ่งเป็น 2 สมการ คือสมการพลศาสตร์ของแกนเลื่อนของวาล์ว ได้แก่

$$M_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + F_f + 2k_s x_s = K_{fc} i_c \quad (3.17)$$

โดยที่  $M_s$  เป็นมวลของแกนเลื่อน,  $c_s$  เป็น ส.ป.ส. ความฝืด,  $F_f$  เป็นความฝืดแบบคูลอมบ์,  $k_s$  เป็นค่าคงที่สปริง,  $K_{fc}$  เป็นอัตราขยายของคอยล์,  $i_c$  เป็นกระแสที่จ่ายให้กับคอยล์,  $x_s$  เป็นระยะเคลื่อนที่จากจุดสมดุลของแกนเลื่อน



รูปที่ 3.2 แสดงการไหลผ่านออริฟิต

สมการอัตราการไหลของมวลผ่านออริฟิต จะเริ่มจากสมการคงมวลของการไหลผ่านออริฟิต ตามรูปที่ 3.2

$$\rho_u A_u v_u = \rho_d A_d v_d = \dot{m}_{\text{isentropic}} = \dot{m}_s \quad (3.18)$$

โดยที่ ตัวห้อย  $u$  หมายถึงคุณสมบัติที่ต้นทางการไหล และ  $d$  หมายถึงคุณสมบัติที่ปลายทางการไหล,  $v$  เป็นความเร็วในการไหล,  $h$  เป็น enthalpy, และ  $A_d$  เป็นพื้นที่ของการไหลที่คอคอของการไหล ถ้าไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ สมการพลังงาน คือ

$$h_u + \frac{v_u^2}{2} = h_d + \frac{v_d^2}{2} \quad (3.19)$$

สมมติให้ลมอัดเป็นก๊าซสมบูรณ์

$$h_d - h_u = c_p (T_d - T_u) \quad (3.20)$$

สมการพลังงาน คือ

$$c_p T_u + \frac{v_u^2}{2} = c_p T_d + \frac{v_d^2}{2} \quad (3.21)$$

แทนค่าสมการคงมวล (3.18) ลงในสมการพลังงาน (3.21) จะได้

$$c_p T_u + \frac{\dot{m}_s^2}{2\rho_u^2 A_u^2} = c_p T_d + \frac{\dot{m}_s^2}{2\rho_d^2 A_d^2} \quad (3.22)$$

หรือ

$$\dot{m}_s^2 \left( \frac{1}{\rho_d^2 A_d^2} - \frac{1}{\rho_u^2 A_u^2} \right) = 2c_p (T_u - T_d) = 2c_p T_u \left( 1 - \frac{T_d}{T_u} \right) \quad (3.23)$$

สำหรับกระบวนการอัดแบบ Isentropic จากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 คือ

$$\frac{P_d}{P_u} = \left( \frac{T_d}{T_u} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3.24)$$

และ  $c_p = Rk/(k-1)$  แทนค่าลงในสมการ (3.23) และจัดรูปใหม่

$$\frac{\dot{m}_s^2}{\rho_d^2 A_d^2} \left( 1 - \frac{\rho_d^2 A_d^2}{\rho_u^2 A_u^2} \right) = 2 \frac{Rk}{k-1} T_u \left[ 1 - \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (3.25)$$

ถ้าสมมติให้พื้นที่หน้าตัดของต้นทางไหลมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของปลายทางไหลมากๆ (ในระบบนิวเมติกส่วนใหญ่เป็นเช่นนี้) เทอม  $\frac{\rho_d^2 A_d^2}{\rho_u^2 A_u^2} \approx 0$  และสมมติให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้อยมากสมการ (3.25) ลดรูปเหลือ

$$\frac{\dot{m}_s^2}{\rho_d^2 A_d^2} = 2 \frac{Rk}{k-1} T_u \left[ 1 - \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (3.26)$$

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความดันของกระบวนการ Isentropic



$$P_u / \rho_u^\gamma = P_d / \rho_d^\gamma$$

แทนค่าลงในสมการ (3.26)

$$\dot{m}_s^2 = \rho_u^2 \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{2/k} A_d^2 2 \frac{Rk}{k-1} T_u \left[ 1 - \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (3.27)$$

จากความสัมพันธ์ของก๊าซในอุดมคติ  $\rho = \frac{P}{RT}$

$$\dot{m}_s = \left\{ \left( \frac{P_u}{RT_u} \right)^2 \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{2/k} A_d^2 \frac{2Rk}{k-1} T_u \left[ 1 - \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{(k-1)/k} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.28)$$

และพื้นที่หน้าตัดของ vena contracta จะเท่ากับ  $A_d = C_c A_v$  (โดยที่  $C_c$  คือ contraction coefficient เป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถกำหนดตำแหน่งและหาพื้นที่หน้าตัดของ vena contracta ได้;  $A_v$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของ ออร์ฟิต) แทนลงในสมการ (3.28) จะได้สมการแสดงอัตราการไหลเชิงมวลเมื่อพิจารณาการไหลเป็นแบบ Isentropic และความเร็วของการไหลอยู่ในช่วง Unchoked ;  $\left( P_d / P_u \leq P_{cr} ; P_{cr} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/k-1} \right)$

$$\dot{m}_s = C_c A_v \frac{P_d}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \cdot \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{1/k} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{(k-1)/k} \right]^{1/2} \quad (3.29)$$

ในกรณีการไหลแบบ choked พิจารณาที่เลขมัคเท่ากับ 1 ทำให้  $\frac{P_d}{P_u} = P_{cr} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/k-1}$  แทนลงในสมการ (3.29)

$$\dot{m}_s = C_c A_v \frac{P_d}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \cdot \left( \frac{2}{k+1} \right)^{1/k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2}{k+1} \right) \right]^{1/2} \quad (3.30)$$

$$\dot{m}_s = C_c A_v \frac{P_d}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \cdot \left( \frac{2}{k+1} \right)^{1/k-1} \cdot \left( \frac{k-1}{k+1} \right)^{1/2} \quad (3.31)$$

จะได้สมการการไหลในช่วง choked  $\left(\frac{P_d}{P_u} \leq P_{cr}\right)$ ; (isentropic process) เป็น

$$\dot{m}_s = C_c A_v \frac{P_d}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k+1/k-1}} \quad (3.32)$$

จากสมการที่ (3.29) และสมการที่ (3.32) เป็นอัตราการไหลเชิงมวลทางทฤษฎี ในการใช้สมการจริง จึงต้องนำค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลองเรียกว่า discharge coefficient  $C_d$  มาคูณเพื่อความถูกต้อง สมการจึงกลายเป็น

$$\dot{m}_v = \begin{cases} C_f A_v C_1 \frac{P_u}{\sqrt{T}} & \text{if } \frac{P_d}{P_u} \leq P_{cr} \\ C_f A_v C_2 \frac{P_u}{\sqrt{T}} \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{1/k} \sqrt{1 - \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{(k-1)/k}} & \text{if } \frac{P_d}{P_u} > P_{cr} \end{cases} \quad (3.33)$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k+1/k-1}}; C_2 = \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}}; C_f = C_c C_d \quad (3.34)$$

ในกรณีที่ของไหลเป็นอากาศปกติ  $k = 1.4$  จะทำให้ได้ค่าของ  $C_1, C_2, P_{cr}$  เป็น

$$C_1 = 0.040418, C_2 = 0.156174, P_{cr} = 0.528$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

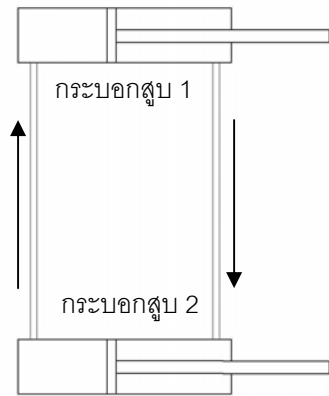
### ข้อต่อโคโบติกแบบของไหล

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและการออกแบบวาล์วควบคุมของไหลเพื่อนำมาสร้างข้อต่อโคโบติกแบบของไหล โดยจะเริ่มจากการอธิบายถึงแนวคิดและหลักการควบคุมการไหลแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง และการจำลองการแบ่งจ่ายของไหลระหว่างกระบอกสูบสองตัวในเบื้องต้น เพื่อดูแนวโน้มพฤติกรรมของการควบคุมการไหลก่อนจะสร้างของจริง

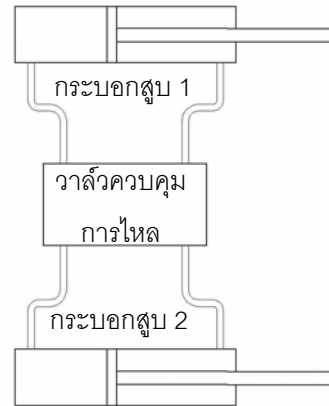
#### 4.1 แนวคิดของข้อต่อโคโบติกแบบของไหล

ถ้าหากเราพิจารณาถึงอุปกรณ์ต้นกำลังในระบบนิวเมติกที่เป็นที่รู้จัก และใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ก็คงจะได้แก่ กระบอกสูบ การควบคุมการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบจะทำได้ด้วยการควบคุมการไหลเข้าออกจากกระบอกสูบ ซึ่งการจ่ายลมจะจ่ายให้แก่กระบอกสูบทางด้านใดด้านหนึ่งและระบายลมออกจากกระบอกสูบอีกด้านหนึ่ง หากเรานำกระบอกสูบสองกระบอกมาต่อสายลมระหว่างกระบอกสูบเข้าด้วยกันตามรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าถ้าเราดันกระบอกสูบตัวที่ 1 ให้เคลื่อนที่เข้า จะทำให้เกิดการไหลในวงจรมิวเมติกตามในรูป ผลก็คือ กระบอกสูบกระบอกที่ 2 จะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่า อัตราตอระหว่างการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบตัวที่ 1 และ 2 เป็น 1:-1 อัตราตอดังกล่าวนี้เกิดจากการที่ลมที่ออกจากกระบอกสูบหนึ่งถูกบังคับให้ไหลเข้าสู่อีกกระบอกสูบหนึ่งด้วยการต่อท่อลม ดังนั้นหากเราสามารถควบคุมการไหลระหว่างกระบอกสูบสองตัวนี้ได้ก็จะสามารถควบคุมอัตราของการเคลื่อนที่ระหว่างกระบอกสูบสองตัวนี้ได้ ซึ่งจะนำมาเป็นแนวคิดของการสร้างข้อต่อโคโบติกแบบของไหลก็คือ การออกแบบวาล์วที่สามารถจะควบคุมการไหลระหว่างอุปกรณ์ต้นกำลังในระบบนิวเมติกหรือไฮดรอลิก ในที่นี้จะออกแบบวาล์วควบคุมการไหลระหว่างกระบอกสูบนิวเมติกสองตัวตามรูปที่ 4.2 เพื่อจะสามารถควบคุมอัตราตอของการเคลื่อนที่ระหว่างกระบอกสูบตัวที่ 1 และ 2 ได้ตามต้องการ ในการสร้างโคบอตจากข้อต่อโคโบติกแบบของไหล ก็จะนำกระบอกสูบทั้งสองตัวนี้ไปติดตั้งบนโครงสร้างของโคบอต ที่เป็นโครงสร้างแบบ x-y เช่นเดียวกับยูนิทไซเคิลโคบอต กระบอกสูบทั้งสองตัวจะถูกติดตั้งเพื่อขับโคบอตในแนวแกน x และ y ตามแผนผังในรูปที่ 4.3 ทำให้อัตราตอระหว่างกระบอกสูบทั้งสองก็คือ อัตราตอระหว่างความเร็ว  $u_x$  และ  $u_y$  ของการเคลื่อนที่ของค้ำจับนั่นเอง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับเส้นทางเดินของโคบอตเป็นมุม  $\theta_p$  ตามสมการ

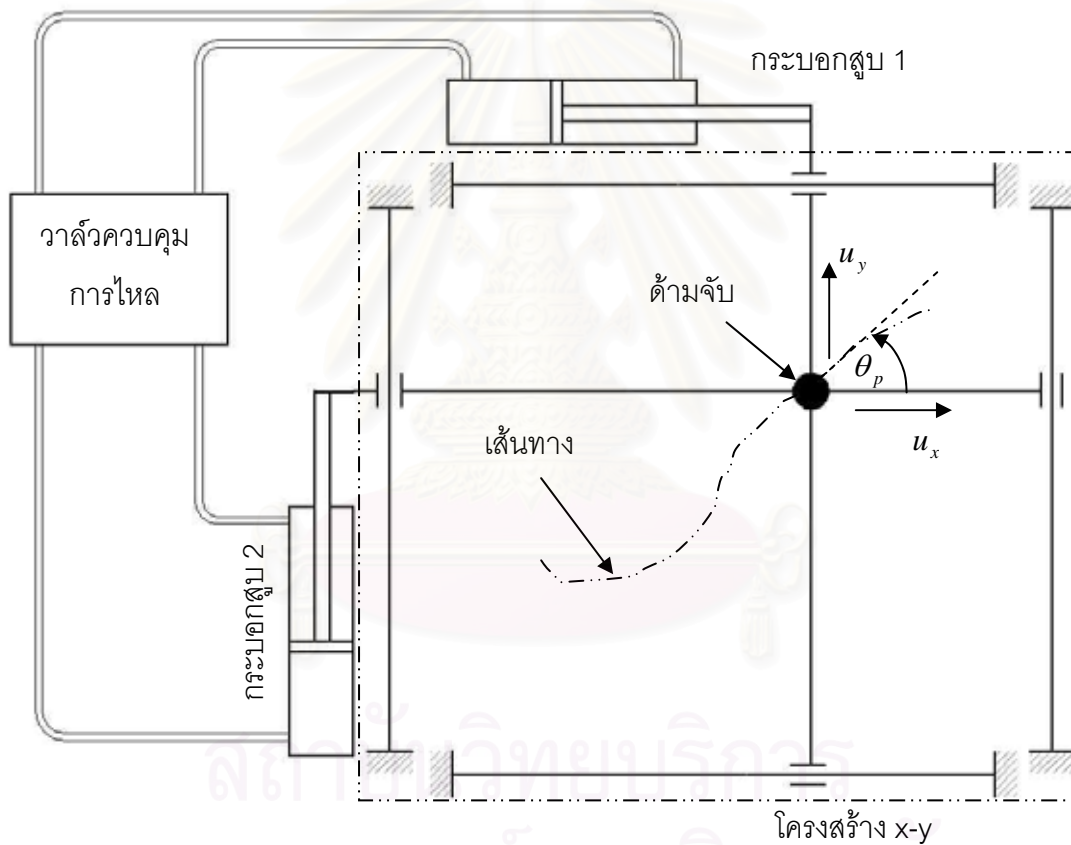
$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{u_y}{u_x}\right) \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1 การต่อกระบอกลูกสูบเข้าด้วยกัน



รูปที่ 4.2 การติดตั้งวาล์วควบคุมการไหล

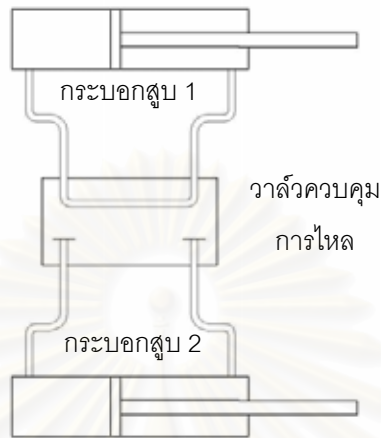


รูปที่ 4.3 การนำกระบอกลูกสูบมาติดตั้งกับโครงสร้าง x-y เพื่อสร้างโคบอลต์

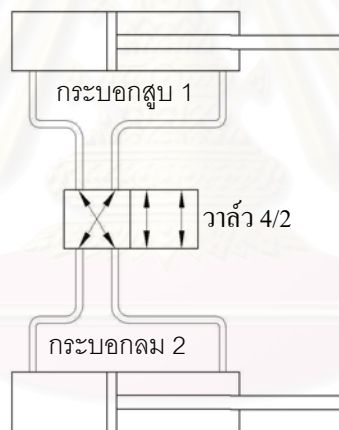
#### 4.2 การควบคุมการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง

การแบ่งจ่ายของไหลแบบไม่ต่อเนื่องจะแบ่งรูปแบบของการควบคุมการไหลเพื่อปรับอัตรา  
 ทดระหว่างกระบอกลูกสูบทั้งสองตัว ได้เป็น 3 กรณี ได้แก่

4.2.1 ในกรณีที่อัตราทดเป็น 1:0 หรือ 0:1 ในกรณีนี้การไหลเข้าออกของกระบอกสูบอันใดอันหนึ่งจะถูกปิด ในขณะที่ช่องลมกระบอกสู่อีกอันหนึ่งต่อเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 4.4 แสดงการสร้างอัตราทด 1:0



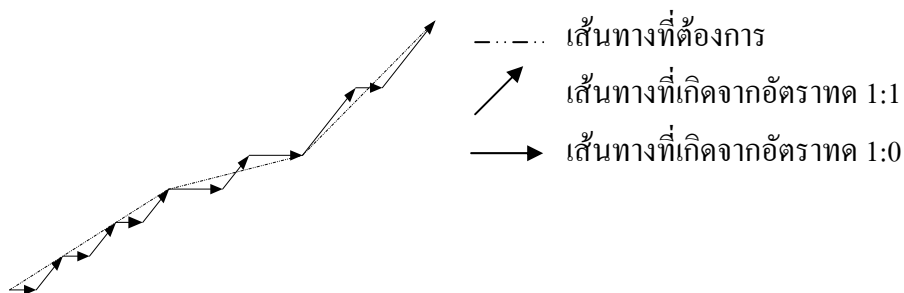
รูปที่ 4.4 การควบคุมการไหลเพื่อสร้างอัตราทด 1:0



รูปที่ 4.5 การควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว 4/2 เพื่อสร้างอัตราทด 1:1

4.2.2 ในกรณีที่อัตราทดเป็น 1:1 หรือ 1:-1 ในกรณีนี้จะใช้วาล์ว 4/2 ในการไขว้สายลมระหว่างกระบอกสูบทั้งสอง ตามรูปที่ 4.5 ที่กำลังสร้างอัตราทด 1:1

4.2.3 สำหรับอัตราทดที่เหลือจะได้รับการสลับรูปแบบการควบคุมในกรณีนี้ 4.2.1 และ 4.2.2 ด้วยความถี่สูง ตัวอย่าง เช่น การควบคุมการแบ่งจ่ายของไหลให้อัตราทดอยู่ในช่วง 1:0 ถึง 1:1 รูปแบบของวงจรนิวเมติกก็จะสลับไปมาระหว่างวงจรสำหรับอัตราทด 1:0 และ 1:1 ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโคบอลออกมาตามรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของโคบอลมีลักษณะเป็นขั้นบันได ถ้าการสลับวงจรที่ความถี่สูงมากๆ ผู้ใช้ก็จะไม่รู้สึกรถึงความไม่ต่อเนื่องนี้ แต่เนื่องจากโซลินอยด์วาล์วจะมีเวลาหน่วงในการทำงาน ทำให้อาจจะไม่สามารถสลับวงจรด้วยความถี่ที่สูงพอ



รูปที่ 4.6 แสดงการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากการควบคุมการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง

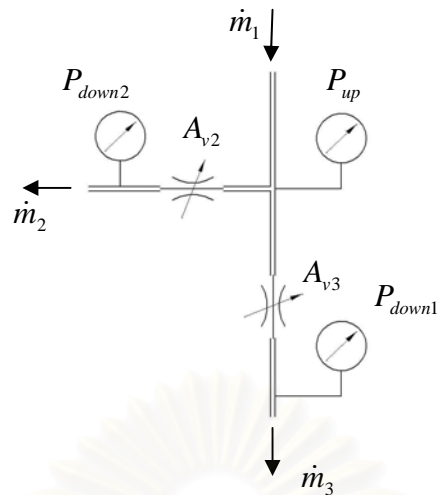
#### 4.3 การควบคุมการไหลแบบต่อเนื่อง

การควบคุมการไหลแบบต่อเนื่อง จะอาศัยหลักการของการไหลผ่านออร์ฟิต ซึ่งอัตราการไหลจะแปรผันกับพื้นที่หน้าตัดของออร์ฟิตตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 การใช้ออร์ฟิตเพื่อใช้แบ่งจ่ายของไหลจะต้องวางจนวนเมคตามรูปที่ 4.7 อัตราการไหลเชิงมวล  $m_1$  จะถูกแบ่งออกเป็นอัตราการไหล  $m_2$  และ  $m_3$  ด้วยการควบคุมพื้นที่หน้าตัดของออร์ฟิตตัวที่ 2 และ 3 ในรูปที่ 4.7 จะเป็นการใช้ออร์ฟิตในการควบคุมการไหล ของไหลที่มีอัตราการไหล  $m_1$  จะแยกไหลผ่านออร์ฟิตตัวที่ 2 และ 3 ด้วยอัตราการไหล  $m_2$  และ  $m_3$  ตามลำดับ ซึ่งอัตราการไหล  $m_2$  และ  $m_3$  ก็จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของออร์ฟิตของออร์ฟิตแต่ละตัว ตัวอย่างเช่น สมมุติให้อัตราการไหลแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของออร์ฟิต และพื้นที่หน้าตัดรวมของออร์ฟิตทั้งสองตัวเท่ากับพื้นที่หน้าตัดสูงสุดของออร์ฟิต ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของออร์ฟิตตัวที่ 2 และ 3 จะเท่ากับ

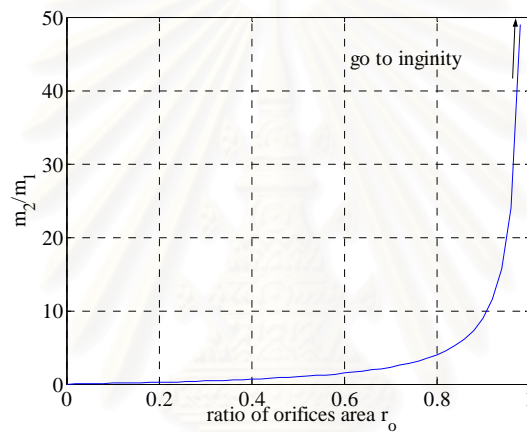
$$A_{v2} = r_0 A_{\max} \quad (4.2)$$

$$A_{v3} = (1 - r_0) A_{\max} \quad (4.3)$$





รูปที่ 4.7 การแบ่งจ่ายของไหลด้วยออริฟิต



รูปที่ 4.8 อัตราส่วนระหว่าง  $\dot{m}_1$  และ  $\dot{m}_2$  ที่  $r_0$  ต่างๆ

โดยที่  $A_{v1}$  และ  $A_{v2}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของออริฟิตตัวที่ 2 และ 3  
 $r_0$  คือ อัตราส่วนพื้นที่ระหว่างพื้นที่ของ  $A_{v1}$  และ  $A_{v2}$

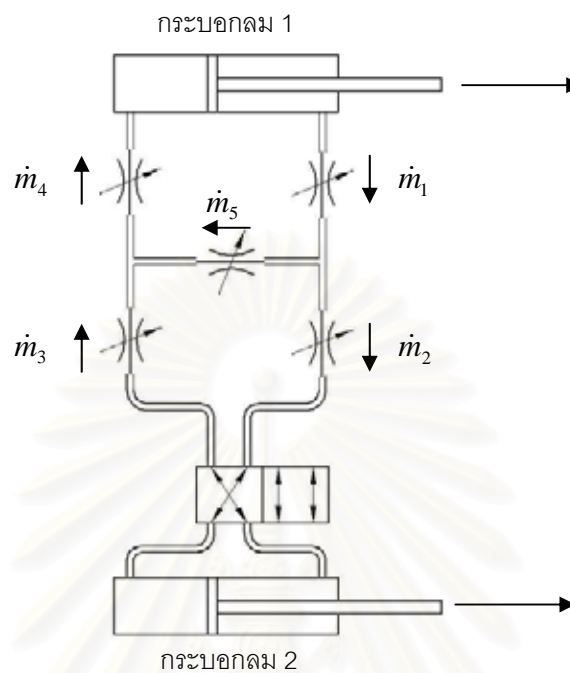
และจาก 
$$m_i \propto A_{v_i,t=2,3} \tag{4.4}$$

ดังนั้นอัตราส่วนการไหล  $\dot{m}_3/\dot{m}_2$  ที่ได้จากการจากปรับค่า  $r_0$  จะเท่ากับ

$$\dot{m}_3/\dot{m}_2 = \frac{1-r_0}{r_0} \tag{4.5}$$

ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดกับอัตราส่วนการไหลตามกราฟในรูปที่ 4.8

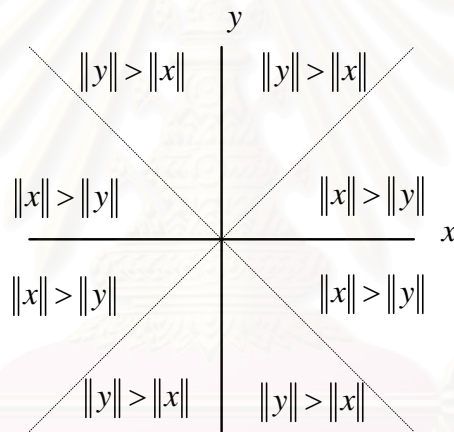
จากวิธีการควบคุมการไหลด้วยออร์พิคดังกล่าว เมื่อนำมาประยุกต์เพื่อควบคุมการไหลระหว่างกระบอกสูบทั้งสองซึ่งติดตั้งอยู่กับโครงสร้าง x-y ตามวงจรในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงการใช้ออร์พิคเพื่อควบคุมการไหลของลม

ในการควบคุมการไหลแบบต่อเนื่องนี้ ช่วงอัตราทด 1:0 และ 0:1 ท่อของไหลจะต่อกันในลักษณะเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.2.1 อัตราทด 1:1 ละ 1:-1 จะเหมือนกับในหัวข้อ 4.2.2 ส่วนในช่วงอัตราอื่นๆ จะใช้ออร์พิคในการควบคุมหรือแบ่งของไหลให้ไหล bypass กลับไปอีกห้องสูบหนึ่งของกระบอกสูบ ตามรูปที่ 4.9 ส่งผลให้ลมไหลผ่านกระบอกสูบไม่เท่ากัน การเคลื่อนที่ของกระบอกสูบจึงเคลื่อนที่ตามลมที่ไหลผ่านกระบอกสูบทั้งสองนี้ ในรูปที่ 4.9 จะสมมติให้กระบอกสูบตัวที่ 1 (ติดตั้งอยู่บนแกน x) กำลังถูกดึงออก จะทำให้เกิดอัตราการไหลเชิงมวล  $\dot{m}_1$  จะไหลออกจากห้องสูบทางซ้ายมือของกระบอกสูบในแนวแกน x ในกรณีนี้ ออร์พิคตัวที่ 1 เปิดเต็มที่เสมือนการไหลผ่านท่อตามปกติ ออร์พิคตัวที่ 2 และ 5 จะปรับพื้นที่หน้าตัดของออร์พิคเพื่อแบ่งอัตราการไหลไปสู่กระบอกสูบของแกน y และของไหลส่วนหนึ่งจะไหลผ่านออร์พิคตัวที่ 5 โดยที่  $\dot{m}_5 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2$  ของไหลที่ไหลผ่านออร์พิคตัวที่ 5 จะไหลมารวมกับ  $\dot{m}_3$  ที่ออกจากห้องสูบของกระบอกสูบในแกน y ได้เป็น  $\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_3$  กลับเข้าสู่ห้องสูบทางซ้ายมือของกระบอกสูบในแนวแกน x ทำให้กระบอกสูบในแนวแกน x เคลื่อนที่ได้มากกว่ากระบอกสูบในแนวแกน y นั่นคือความชันของเส้นทางการเคลื่อนที่จะมีค่าน้อยกว่า 45 องศา ดังนั้นการควบคุมความชันของเส้นทางการเคลื่อนที่จะทำได้โดยการควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลระหว่างกระบอกสูบของแกน x และ y

เนื่องจากการแบ่งอัตราการใช้ไฟจะต้องแบ่งอัตราการใช้ไฟจากมาก แบ่งไปสู่ระบบอบที่มี การไฟน้อย ดังนั้นการแบ่งช่วงของการควบคุมจึงต้องพิจารณาถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ในแต่ละ แนวนแกนด้วย เช่น ในช่วงที่อัตราไฟจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1:0 กับ 1:1 ระบบอบในแกน x จะมี ความเร็วในการเคลื่อนที่มากกว่าแกน y (อัตราการใช้ไฟจะระบบอบในแนวนแกน x จะมากกว่า แกน y) ดังนั้นการแบ่งอัตราการใช้ไฟจะต้องแบ่งปริมาณของไฟที่ออกจากระบบอบในแนวนแกน x ส่วนหนึ่งกลับเข้าสู่ห้องอบอีกห้องหนึ่งของระบบอบในแนวนแกน x เอง และที่เหลือจึงจ่าย ให้กับระบบอบในแนวนแกน y ดังนั้นจึงต้องแบ่งช่วงการควบคุมออกเป็น ช่วงที่เส้นทางเดินมีการ เคลื่อนที่ในแนวนแกน x มากกว่า y และช่วงที่การเคลื่อนที่ในแนวนแกน y มากกว่าแกน x ตามภาพที่ 4.10 จะเป็นการแบ่งช่วงการควบคุมใน Cartesian space การควบคุมอัตราการใช้ไฟเมื่อเส้นทาง การเคลื่อนที่อยู่ในช่วงต่างๆ จะควบคุมด้วยการจับคู่การทำงานของออร์พิคคู่ต่างๆ ร่วมกับวาล์ว 4/2 สรุปลิศทางการไหลของของไหลเมื่อต้องการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ในช่วงต่างๆ จะแสดงใน ตาราง 4.1



รูปที่ 4.10 การแบ่งช่วงการควบคุม

จากตารางแสดงการใช้ไฟ จะเห็นว่าการควบคุมอัตราไฟของการเคลื่อนที่ในแนวนแกน x และ แกนแกน y ในแต่ละช่วง 45 องศา จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดวาล์วที่ใช้ในการแบ่งจ่ายการใช้ไฟของ ของไหลสองตัวขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลจากทั้งหมดตามรูปที่ 4.9 ส่วนวาล์วที่เหลือจะเปิดเต็มที่ เสมือนไม่มีออร์พิคตัวนั้นๆ ถ้าสมมุติให้การใช้ไฟเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราไฟกับการแบ่งจ่ายการใช้ไฟจะอธิบายได้ดังนี้

เส้นทาง เดินของ โคบอด	ทิศการไหล ผ่านออร์พิค 1	ทิศการไหล ผ่านออร์พิค 2	ทิศการไหล ผ่านออร์พิค 3	ทิศการไหล ผ่านออร์พิค 4	ทิศการไหล ผ่านออร์พิค 5	ตำแหน่ง ของโซลิต นอยด์
0-45	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ไขว้สาย
45-90	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ย้อนกลับ	ไขว้สาย
90-135	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ตามลูกศร	ต่อตรง
135-180	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ต่อตรง
180-225	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ไขว้สาย
225-270	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ	ตามลูกศร	ไขว้สาย
270-315	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ย้อนกลับ	ต่อตรง
315-0	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ตามลูกศร	ต่อตรง

ตารางที่ 4.1 แสดงการไหลของของไหลผ่าน ออร์พิค เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโคบอด

- 1) ช่วงอัตราคระหว่าง 1:0 ถึง 1:1 การควบคุมอัตราคจะทำให้จากการปรับอัตราส่วน  $\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_1}$  ตามความสัมพันธ์

$$\frac{u_y}{u_x} = 1 - \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_1} \quad (4.6)$$

วาล์ว 4/2 จะอยู่ในตำแหน่งไขว้สาย และ ถ้าทิศของ  $u$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 1 ออร์พิคที่ทำงานคือ ตัวที่ 2 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่ หรือ ถ้าทิศของ  $u$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 3 ออร์พิคที่ทำงานคือ ตัวที่ 3 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่

- 2) ช่วงอัตราคระหว่าง 1:1 ถึง 0:1 จะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{u_y}{u_x} = \frac{1}{1 - \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_3}} \quad (4.7)$$

วาล์ว 4/2 จะอยู่ในตำแหน่งไขว้สาย และ ถ้าทิศของ  $u$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 1 ออร์พิคที่ทำงานคือ ตัวที่ 4 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่ หรือ ถ้าทิศของ  $u$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 3 ออร์พิคที่ทำงานคือ ตัวที่ 1 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่

- 3) ช่วงอัตราคระหว่าง 0:1 ถึง 1:-1 จะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{u_y}{u_x} = \frac{1}{1 - \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_2}} \quad (4.8)$$

วาล์ว 4/2 จะอยู่ในตำแหน่งต่อตรง และ ถ้าทิศของ  $u$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 2 ออร์บิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 1 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่ หรือ ถ้าทิศของ  $u$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 4 ออร์บิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 4 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่

4) ช่วงอัตราทระหว่าง 1:-1 ถึง 1:0 จะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{u_y}{u_x} = 1 - \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_4} \quad (4.9)$$

วาล์ว 4/2 จะอยู่ในตำแหน่งต่อตรง และ ถ้าทิศของ  $u$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 2 ออร์บิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 3 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่ หรือ ถ้าทิศของ  $u$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 4 ออร์บิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 2 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่

#### 4.4 การจำลองการทำงานของข้อต่อโคโบติกแบบของไหล

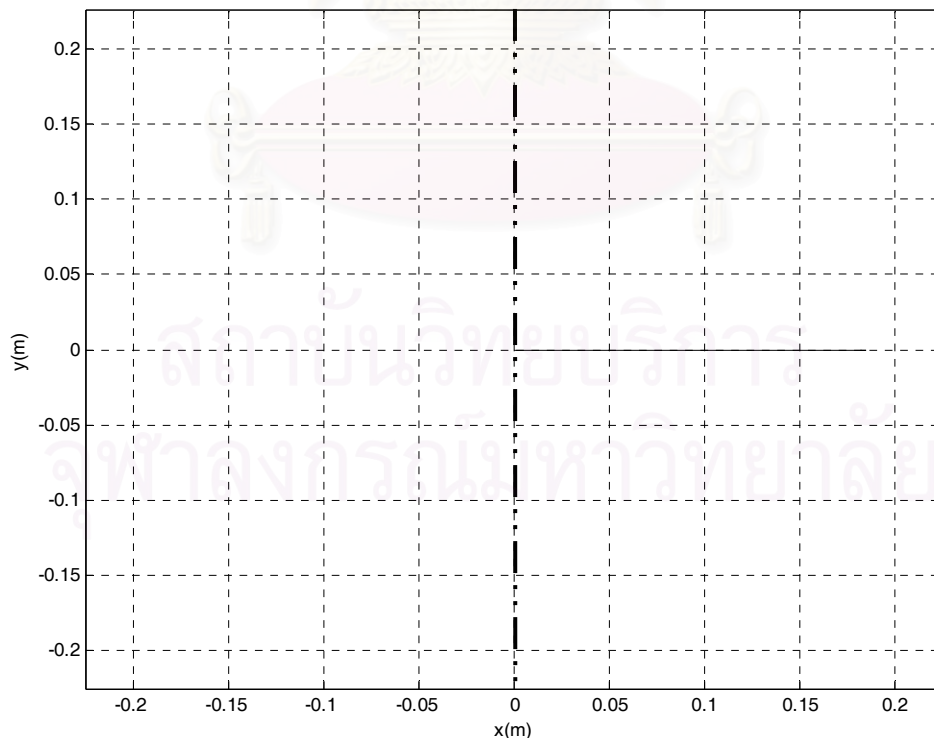
ในการสร้างข้อต่อโคโบติกแบบของไหลจริง จะใช้ของไหลเป็นลมหรือระบบนิวเมติก เนื่องจากลมมีแรงดันการไหลน้อย ความหนืดต่ำ ระบบนิวเมติกเป็นระบบที่ค่อนข้างสะอาด และ อุปกรณ์นิวเมติกมีน้ำหนักเบากว่าอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิก เมื่อเทียบที่ภาระเท่ากัน แต่ข้อเสียที่สำคัญของระบบนิวเมติก คือลมเป็นของไหลที่อัดตัวได้และมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดกับเส้นทางเดินที่สร้างขึ้น ในหัวข้อนี้จะทำการจำลองระบบข้อต่อของโคโบติกจากสมการที่กล่าวถึงมาแล้วในบทที่ 3 มาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมข้อต่อโคโบติกที่สร้างจากระบบนิวเมติกก่อนนำไปสร้างจริง โดยใช้แบบจำลองของกระบอกสูบตามสมการที่ (3.16) และใช้แบบจำลองของออร์บิตตามสมการที่ (3.33) การจำลองการควบคุมการไหลในข้อต่อโคโบติกจะใช้โปรแกรม simulink ช่วยในการจำลอง อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งให้กับระบบในการจำลองจะไม่ใช้ค่าพารามิเตอร์จริงที่ใช้ในการสร้างของจริง แต่จะเป็นค่าที่เกิดจากการประมาณให้ใกล้เคียงกับความจริงดังนี้ น้ำหนักของลูกสูบพร้อมด้วยภาระ 20 กิโลกรัม, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ 1 นิ้ว, สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 50 N·s/m, ระยะชัก 0.225 เมตร  $\alpha_{in}=1.3$ ,  $\alpha=1.2$ ,  $\alpha_{out}=0.9$ , และพื้นที่หน้าตัดของออร์บิตเมื่อเปิดเต็มที่  $3.85 \times 10^{-5}$  ตร.ม.

การจำลองอุปกรณ์ในระบบจะถูกติดตั้งตามแผนผังในรูปที่ 4.9 ในการจำลองครั้งแรกเป็นการควบคุมเส้นทางเดินให้อยู่ในแนว 90 องศา ในแนวนี้ออร์บิตตัวที่ 2 และ 3 จะปิด ตัวที่เหลือจะเปิดทั้งหมด ผลการจำลองการทำงานจะแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.14 ซึ่งเป็นผลการจำลองเมื่อความ

ดันในระบบเป็น 1 บาร์และ 5 บาร์ตามลำดับ ในการจำลองที่ความดัน 1 บาร์โคบอลสามารถเคลื่อนที่ตามแรงกระทำออกจากเส้นทางที่กำหนดได้มากจนเกือบสุดขอบเขตการทำงาน แสดงให้เห็นว่าเส้นทางที่สร้างขึ้นมีความอ่อนตัวได้เนื่องจากลมในระบบยุบตัว ทำให้เกิดระยะผิดพลาดตามกราฟในรูปที่ 4.12 เมื่อเพิ่มความดันในระบบให้เป็น 5 บาร์แนวเส้นทางจะมีความแข็งแกร่งมากขึ้น ทำให้ระยะผิดพลาดออกจากแนวเส้นทางมีระยะทางน้อยลงดังที่แสดงการเคลื่อนที่ในการทดลองในรูปที่ 4.13 และระยะผิดพลาดในรูปที่ 4.14

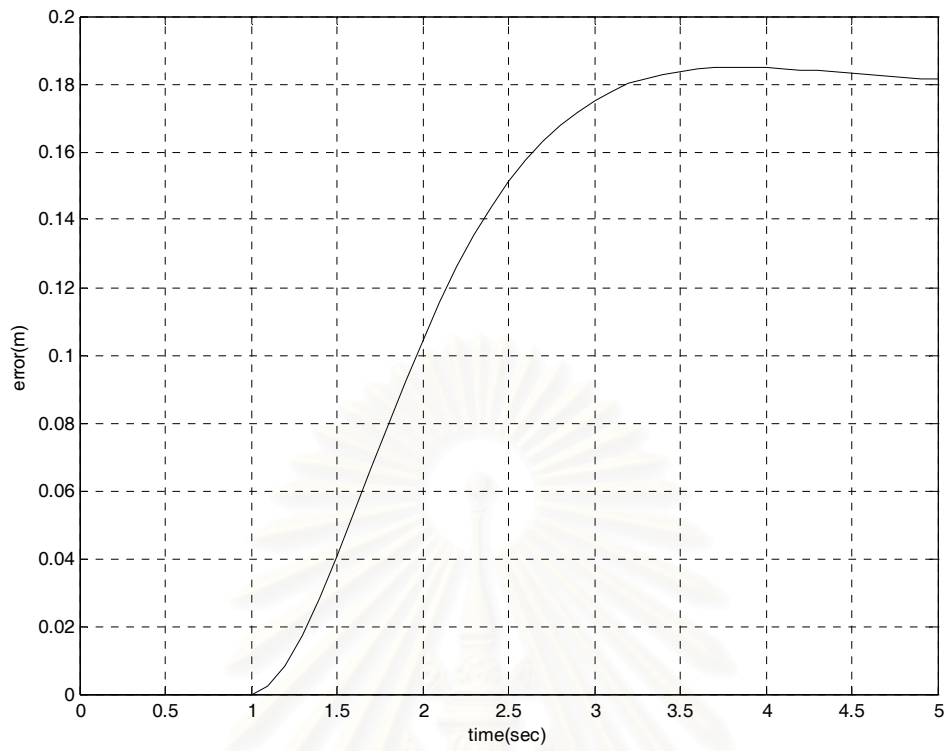
ในการจำลองการทำงานถัดมาเป็นการสร้างเส้นทาง การเคลื่อนที่ในแนว 45 องศา ออร์บิทัลตัวที่ 5 ปิดและตัวที่เหลื่อเปิดเต็มที่ การจำลองจะทำที่ความดันในระบบเป็น 1 บาร์และ 5 บาร์เช่นเดิม ผลการจำลองที่ความดัน 1 บาร์จะแสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการอัดตัวได้ของลม เมื่อเพิ่มความดันในระบบเป็น 5 บาร์ความสามารถในการยุบตัวได้ของลมในระบบลดลงส่งผลให้เส้นทางเคลื่อนที่จะมีความแข็งแกร่งมากขึ้น ระยะความผิดพลาดของเส้นทางเคลื่อนที่น้อยลง ผลการทดลองและค่าผิดพลาดแสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.18

จากกราฟค่าผิดพลาดของการจำลองทั้งหมด เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จนสุดขอบเขตการทำงานของโคบอล จะแตกต่างกันออกไป ในการสร้างเส้นทางแนว 45 องศา เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะนานขึ้น แสดงถึงระบบมีแรงต้านการเคลื่อนที่มากขึ้น ซึ่งอาจจะมาจากความเสียดทานในระบบทางกล และมาจากความเสียดทานการไหลที่เกิดขึ้นออร์บิทัล

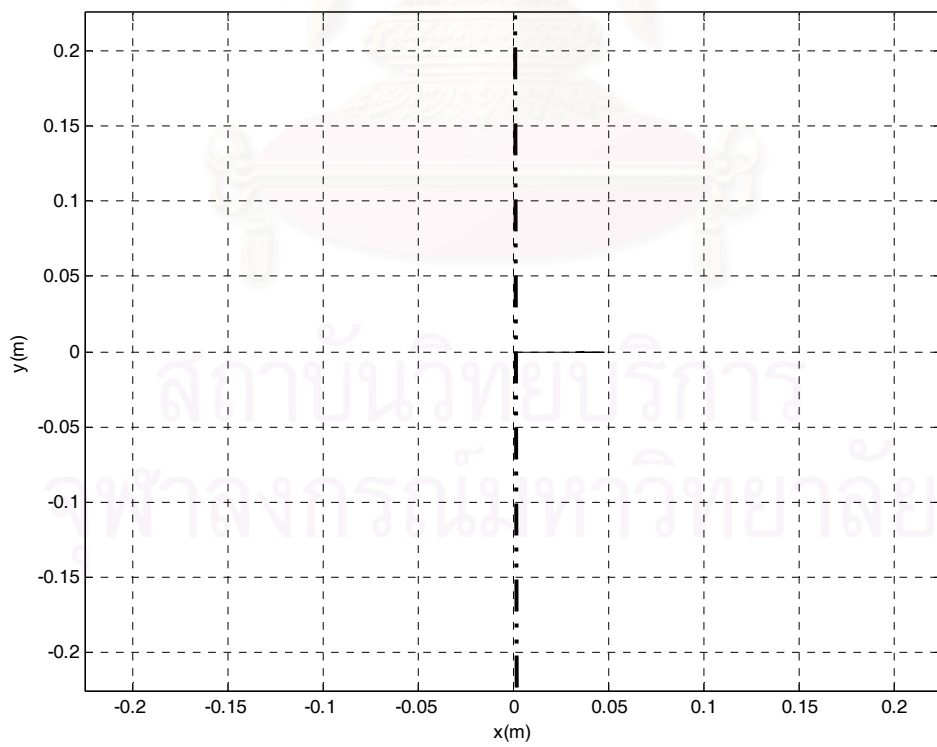


รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการสร้างเส้นทางเดิน 90 องศาที่ความดัน 1 บาร์

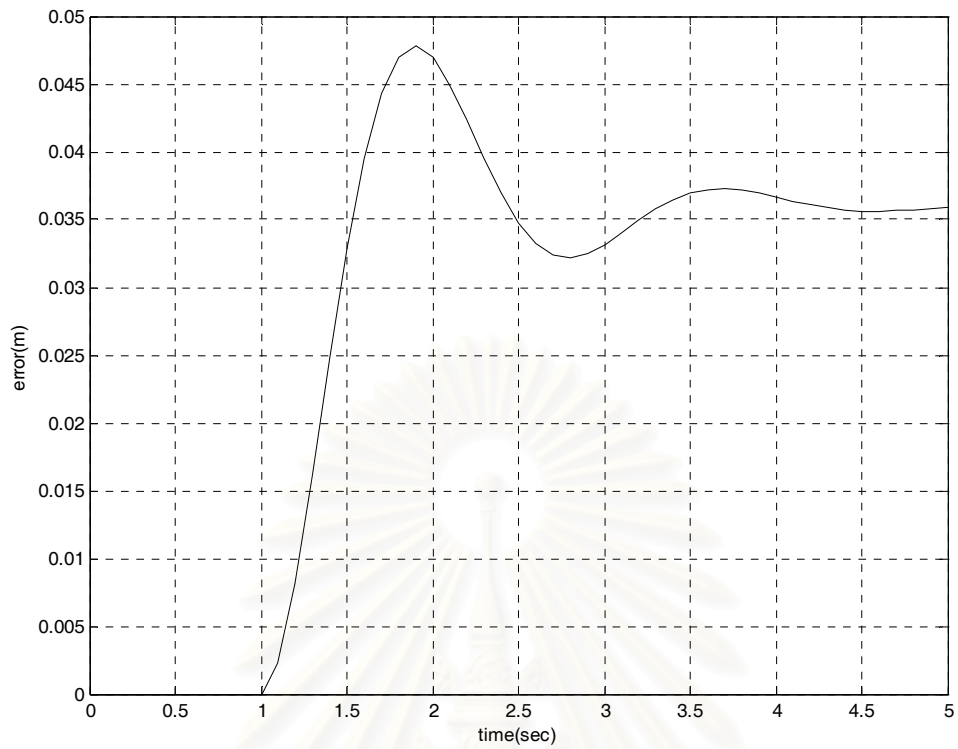




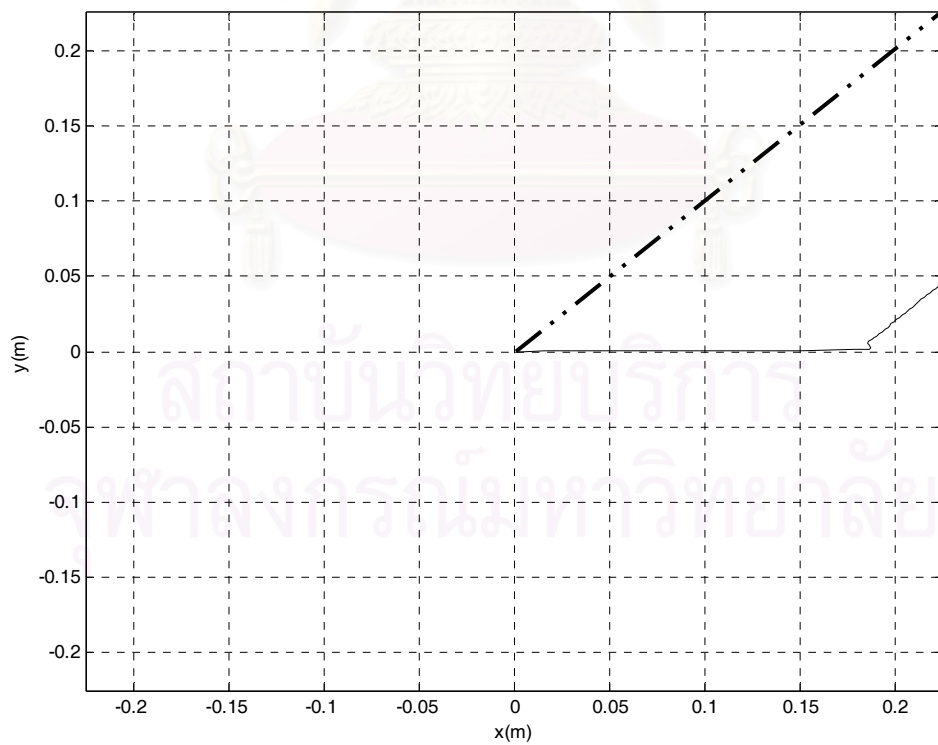
รูปที่ 4.12 แสดงระยะผิดพลาดในการสร้างเส้นทางเดิน 90 องศาที่ความดัน 1 บาร์



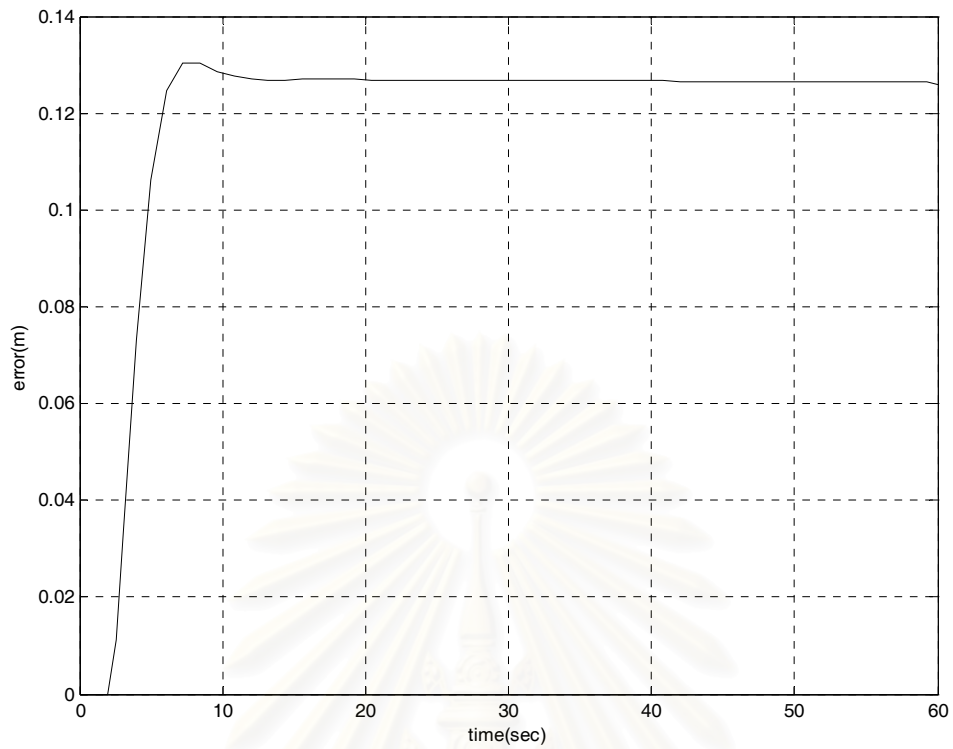
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการสร้างเส้นทางเดิน 90 องศา ที่ 5 บาร์



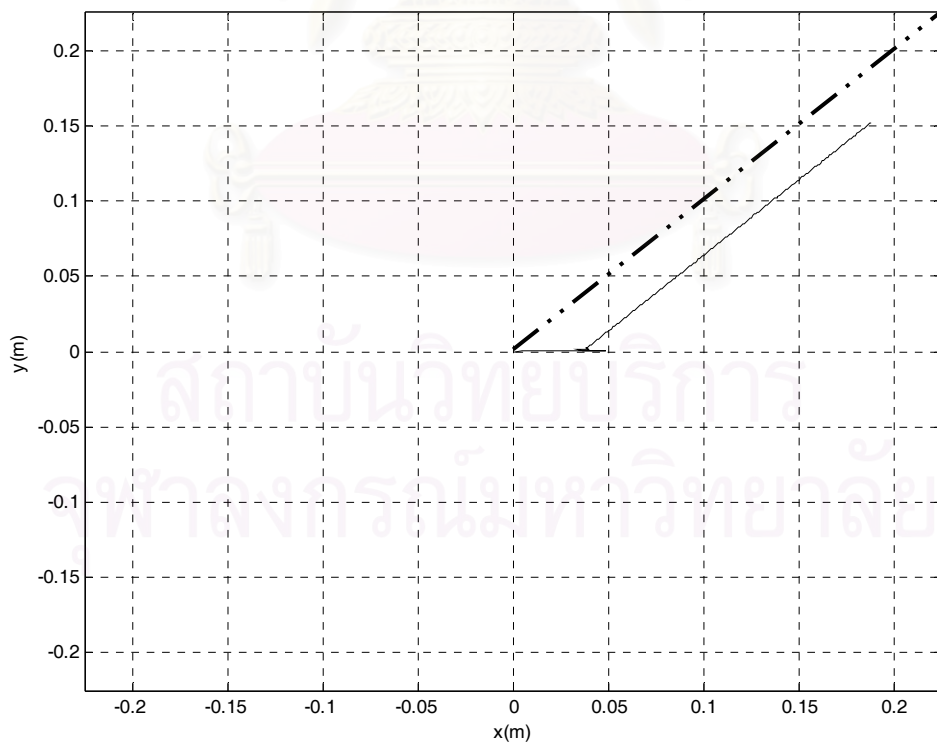
รูปที่ 4.14 แสดงระยะผิดพลาดในการสร้างเส้นทางเดิน 90 องศาที่ความดัน 5 บาร์



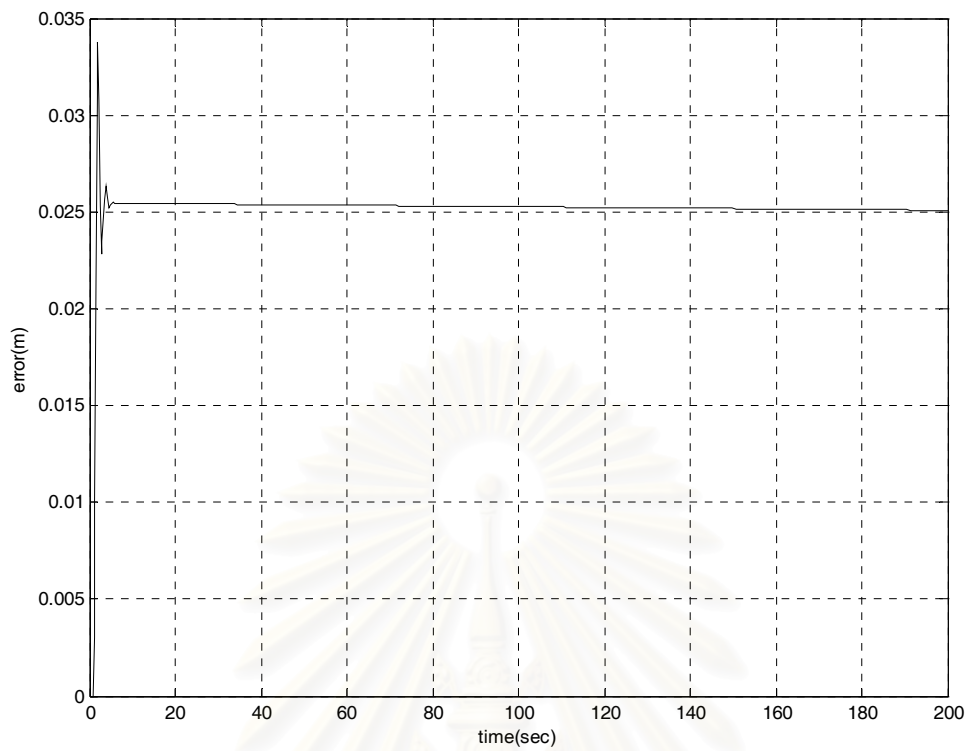
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการสร้างเส้นทางเดิน 45 องศา ที่ 1 บาร์



รูปที่ 4.16 แสดงระยะผิดพลาดในการสร้างเส้นทางเดิน 45 องศาที่ความดัน 1 บาร์



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการสร้างเส้นทางเดิน 45 องศา ที่ 5 บาร์



รูปที่ 4.18 แสดงระยะผิดพลาดในการสร้างเส้นทางเดิน 45 องศาที่ความดัน 5 บาร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

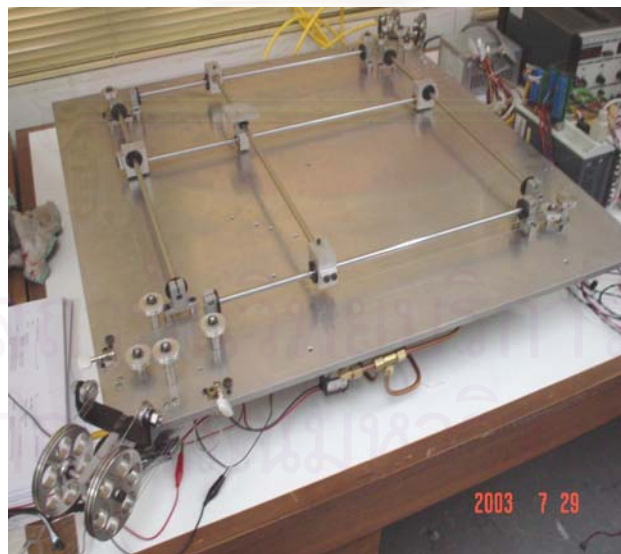
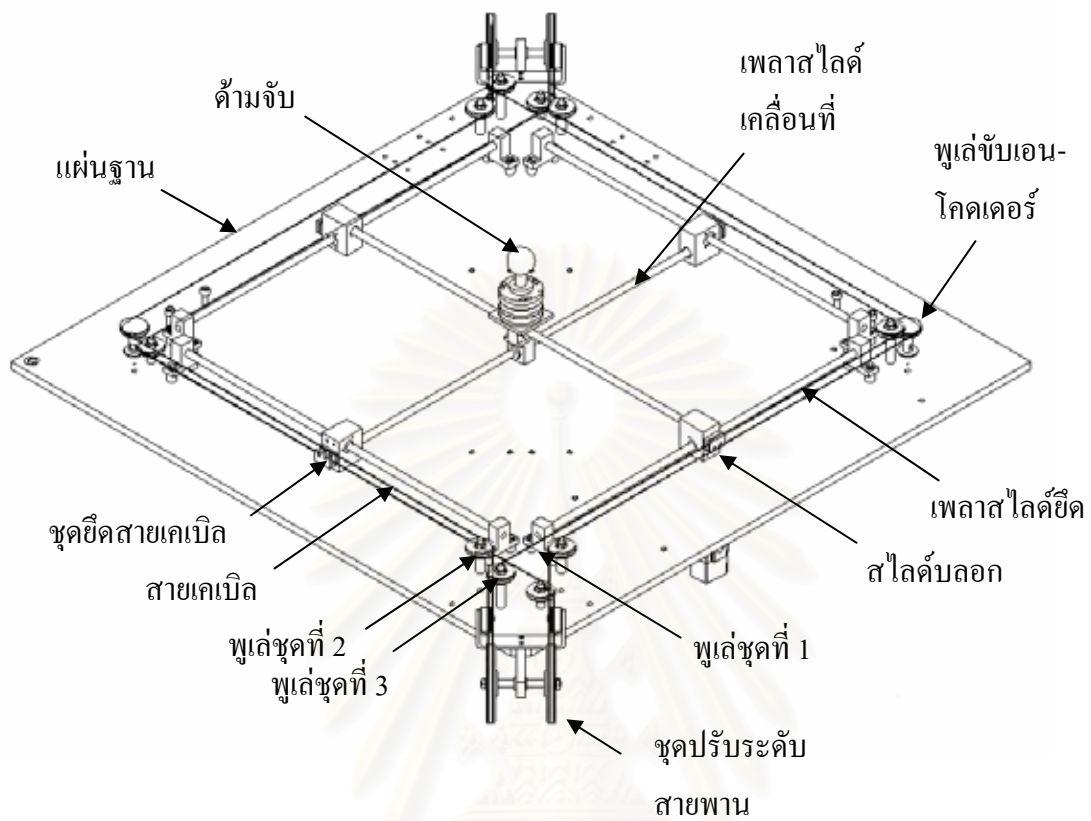
### การออกแบบและสร้างต้นแบบหุ่นยนต์โคบดิก

ส่วนประกอบของโคบอดแบบของไหล ที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบการทำงานของข้อต่อโคบดิกแบบของไหล จะแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนที่เป็นโครงสร้าง และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นชุดวาล์วควบคุมการไหล โครงสร้างของโคบอดจะถูกออกแบบโดยคำนึงถึงปัจจัยที่ต่างออกไปจากหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไป เพราะว่าโคบอดเป็นหุ่นยนต์ที่มีการทำงานร่วมกับมนุษย์ ดังที่กล่าวมาแล้วในบทนำมนุษย์จะเป็นผู้ออกแรงในการขับโคบอด ส่วนโคบอดจะทำหน้าที่เพียงการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ ดังนั้นโครงสร้างของโคบอดจะต้องถูกขับให้เคลื่อนที่ได้โดยแรงของมนุษย์ ในขณะที่โครงสร้างของโคบอดยังคงความสามารถในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของมนุษย์และโคบอดได้ นอกจากนี้โคบอดยังเป็นอุปกรณ์แบบเพสซีฟ นั่นคือโคบอดจะไม่สามารถสร้างกำลังได้ด้วยตัวเอง (ยกเว้นในกรณีของโคบอดแบบเสริมกำลัง) จุดนี้ทำให้โคบอดไม่สามารถสร้างกำลังมาชดเชยการสูญเสียในด้านต่างๆ เช่น แรงเสียดทาน แรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากความเฉื่อย หรือแรงโน้มถ่วง แรงต่างๆเหล่านี้จะส่งผลให้ผู้ใช้ต้องรับภาระมากขึ้น เป็นสาเหตุของความเมื่อยล้า หรืออาจทำให้เกิดการบาดเจ็บ ดังนั้นการออกแบบโคบอดตัวนี้จึงได้พยายามที่จะลดแรงเสียดทานการเคลื่อนที่จากสาเหตุต่างๆให้น้อยที่สุด

#### 5.1 โครงสร้างของโคบอด

โครงสร้างของโคบอดจะสร้างขึ้นจากลิเนียร์สโไลด์ทั้งหมด 6 ชุดตามที่แสดงในรูปที่ 5.1 จะแบ่งเป็นเพลาสโไลด์ยึดจำนวน 4 เพลาและเพลาสโไลด์เคลื่อนที่จำนวน 2 เพลา ชุดด้ามจับจะถูกแขวนบนเพลาสโไลด์เคลื่อนที่สองเพลา โดยมีตลับลูกปืนสโไลด์ฝังอยู่ในชิ้นฐานของด้ามจับเพื่อที่จะใช้แขวนด้ามจับเข้ากับเพลาสโไลด์เคลื่อนที่ ทางด้านบนของด้ามจับจะมีอุปกรณ์วัดแรงติดตั้งอยู่ตามรูปที่ 5.2 ที่ปลายเพลาก็แขวนด้ามจับทั้งสองด้านจะแขวนยึดเข้ากับสโไลด์บล็อก ซึ่งสโไลด์บล็อกจะอยู่บนเพลาสโไลด์ที่ยึดตายอยู่บนแผ่นฐานอีกทีหนึ่ง

สโไลด์บล็อกจะมีทั้งหมด 4 ตัว แต่ละตัวจะมีตลับลูกปืนเชิงเส้นฝังอยู่ในตัวบล็อก ยึดทั้งสองด้านด้วยหน้าแปลนยึดตลับลูกปืน สโไลด์บล็อกทำหน้าที่ในการยึดเพลาสโไลด์เคลื่อนที่อีกทีหนึ่งและทางด้านหลังของสโไลด์บล็อกจะเป็นที่สำหรับยึดกับสายเคเบิลที่ใช้ขับ ด้วยแผ่นประกบตามในรูปที่ 5.3 เมื่อนำด้ามจับ, เพลาสโไลด์เคลื่อนที่และสโไลด์บล็อก ประกอบเข้าด้วยกัน ชิ้นส่วนต่างๆจะประกอบเข้าด้วยกันเป็นดังรูปที่ 5.4 ชิ้นส่วนทั้งชุดนี้จะแขวนอยู่บนเพลาสโไลด์ยึดทั้ง 4 เส้น ซึ่งยึดอยู่กับฐานด้วย



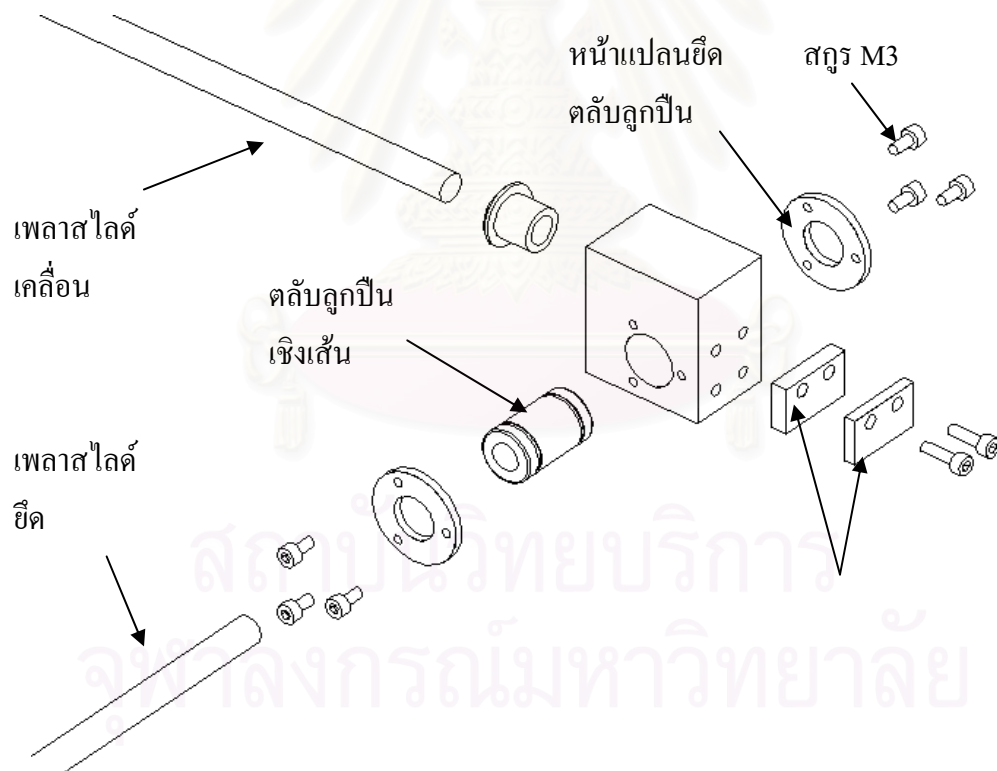
รูปที่ 5.1 a) ภาพด้านบนโครงสร้างโคบอลต์แบบของไหล

b) ภาพของหุ่นยนต์โคบอลต์แบบของไหลที่จัดสร้างขึ้น

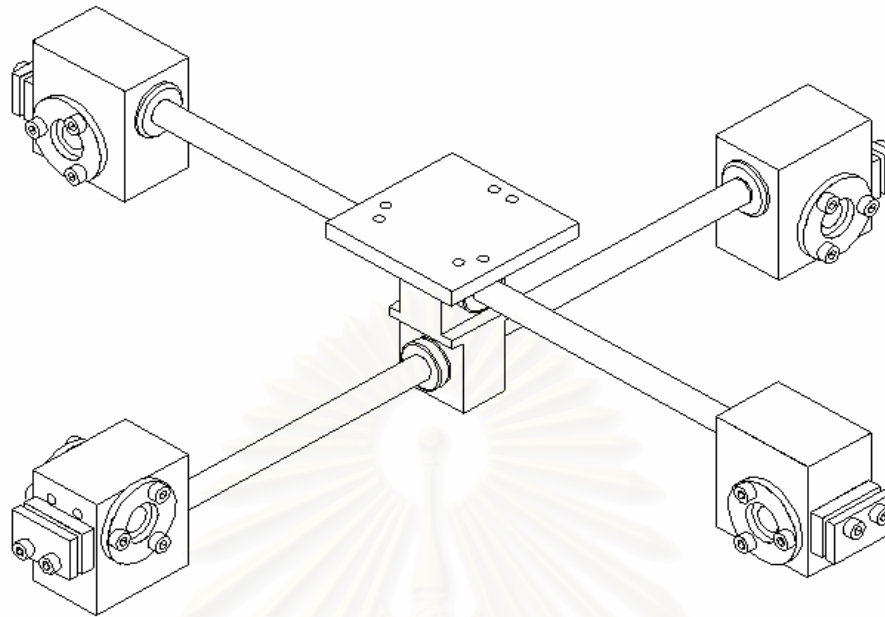




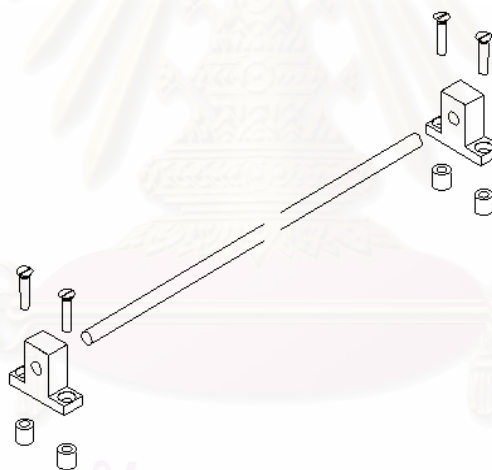
รูปที่ 5.2 อุปกรณ์วัดแรงที่ติดตั้งด้านบนของด้ามจับ



รูปที่ 5.3 ส่วนประกอบของสไลด์บล็อก



รูปที่ 5.4 แสดงการแขวนค้ำจับบนพลาสติกไลด์เคลื่อนที่สองเส้น

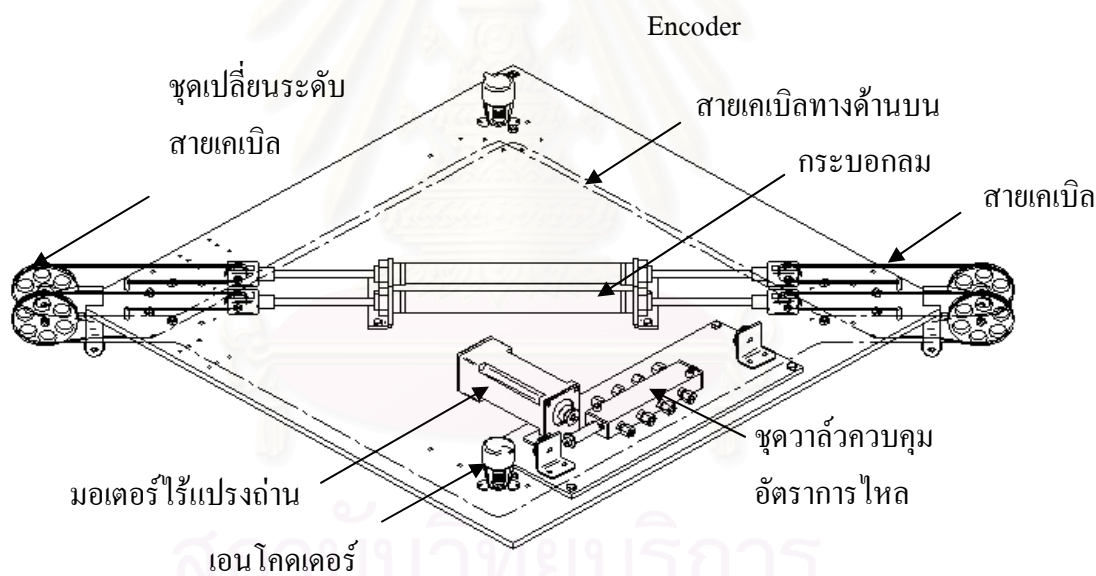


รูปที่ 5.5 การยึดพลาสติกไลด์ยึดกับแผ่นฐาน

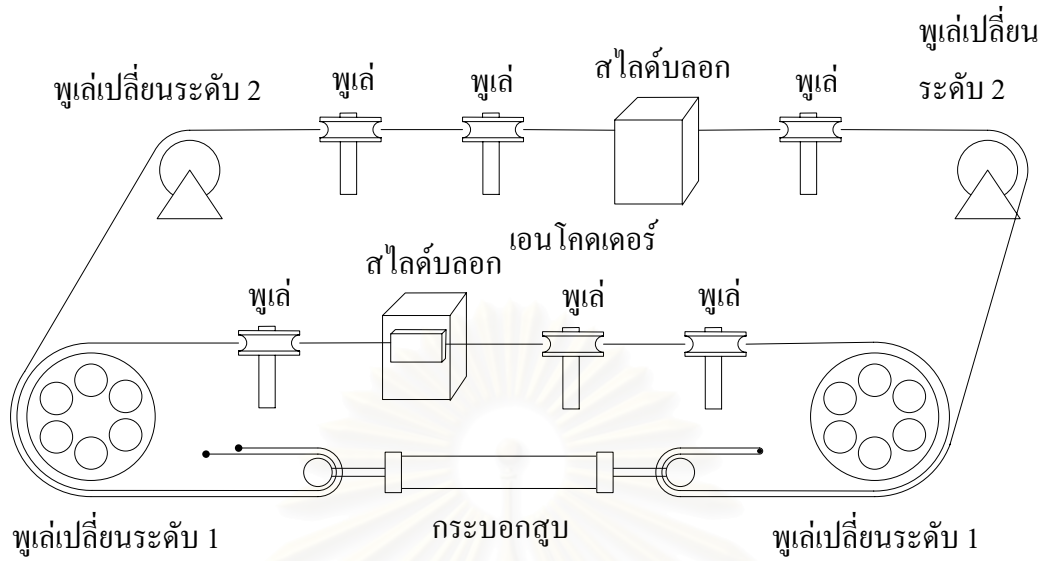
แทนยึดดังรูปที่ 5.5 การออกแบบให้สายชุดค้ำจับแขวนอยู่ในลักษณะนี้เนื่องจากต้องการลดความเอนเอียงของโครงสร้างและพยายามทำให้ความถี่ของการเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการลดชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่และมีความสมมาตรกันในแนวแกน x และ y

การจับชุดค้ำจับของโคบอลต์จะจับผ่านระบบสายเคเบิล การจับในแต่ละแนวแกน สายเคเบิลจะส่งผ่านกำลังจากกระบอกสูบซึ่งติดตั้งอยู่ทางด้านล่างของแผ่นฐาน ตามรูปที่ 5.6 สายเคเบิลจะถูกร้อย

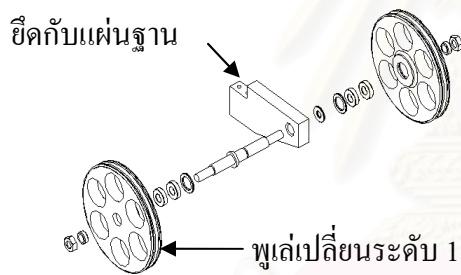
จากกระบอกลูกสูบทางด้านล่างผ่านชุดเปลี่ยนระดับพู่เล่ชุดที่ 1 ซึ่งแสดงรายละเอียดตามรูปที่ 5.8 ขึ้นมาทางด้านบนแล้วจึงถูกเปลี่ยนระดับอีกทีหนึ่งด้วยชุดเปลี่ยนระดับชุดที่ 2 ในรูปที่ 5.9 ชุดเปลี่ยนระดับชุดที่ 2 จะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนระดับสายเคเบิลเพื่อมิให้สายเคเบิลร่อนชนกัน ก่อนจะรื้อสายเคเบิลผ่านพู่เล่แนวราบที่แสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.10 เพื่อบังคับให้สายเคเบิลผ่านไปยึดกับสไลด์บล็อกที่แขวนเพลาสไลด์เคลื่อนที่ทั้งสองด้าน และรื้อผ่านพู่เล่ที่ติดตั้งกับเอนโคเดอร์เพื่อใช้ในการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของด้ามจับพู่เล่แนวราบจะมีหลายระดับซึ่งสามารถเปลี่ยนระดับได้ด้วยการเปลี่ยนความสูงของชิ้นคอล์มน์ ข้อดีของการใช้สายเคเบิลในการส่งกำลัง คือ สายเคเบิลสามารถรื้อให้โค้งเป็นรัศมีเล็กได้ ทำให้พู่เล่ของสายเคเบิลมีขนาดเล็กสะดวกในการติดตั้ง, การส่งกำลังผ่านสายเคเบิลจะไม่เกิดระยะ backlash, มีความเสียดต่ำกว่าระบบส่งกำลังอื่นๆ ข้อควรระวังอย่างหนึ่งในการใช้สายเคเบิล คือ การยืดตัวของสายเคเบิลเมื่อรับแรง แต่ในกรณีของโคบอดตัวนี้สายเคเบิลรับแรงจากมนุษย์ซึ่งถือว่าน้อยมาก พู่เล่ระบบสายเคเบิลที่ใช้จับโคบอดจะใช้เคเบิลในแต่ละแนวแกนเพียงหนึ่งเส้น รื้อตามแผนผังดังรูป 5.7



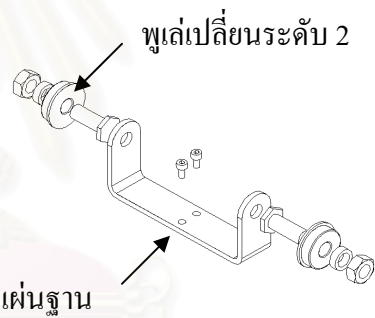
รูปที่ 5.6 ภาพด้านล่างของโคบอดแบบของไหล



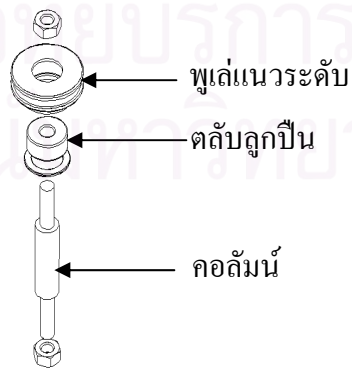
รูปที่ 5.7 แผนผังการร้อยสายเคเบิล



รูปที่ 5.8 ชุดพู่เล่เปลี่ยนระดับชุดที่ 1

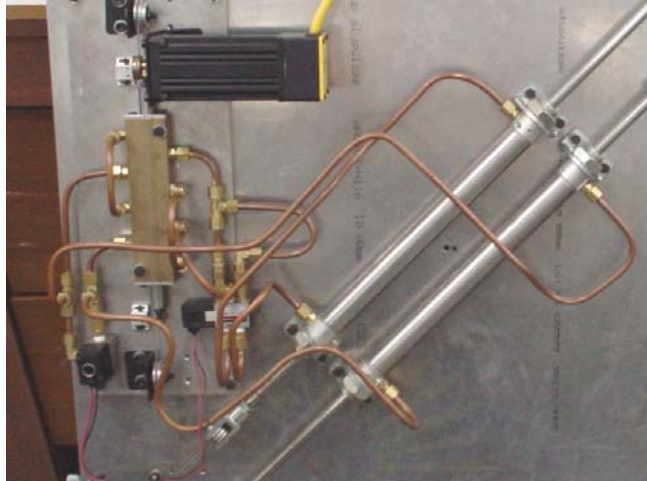


รูปที่ 5.9 ชุดพู่เล่เปลี่ยนระดับชุดที่ 2



รูปที่ 5.10 ชุดพู่เล่ในแนวราบ



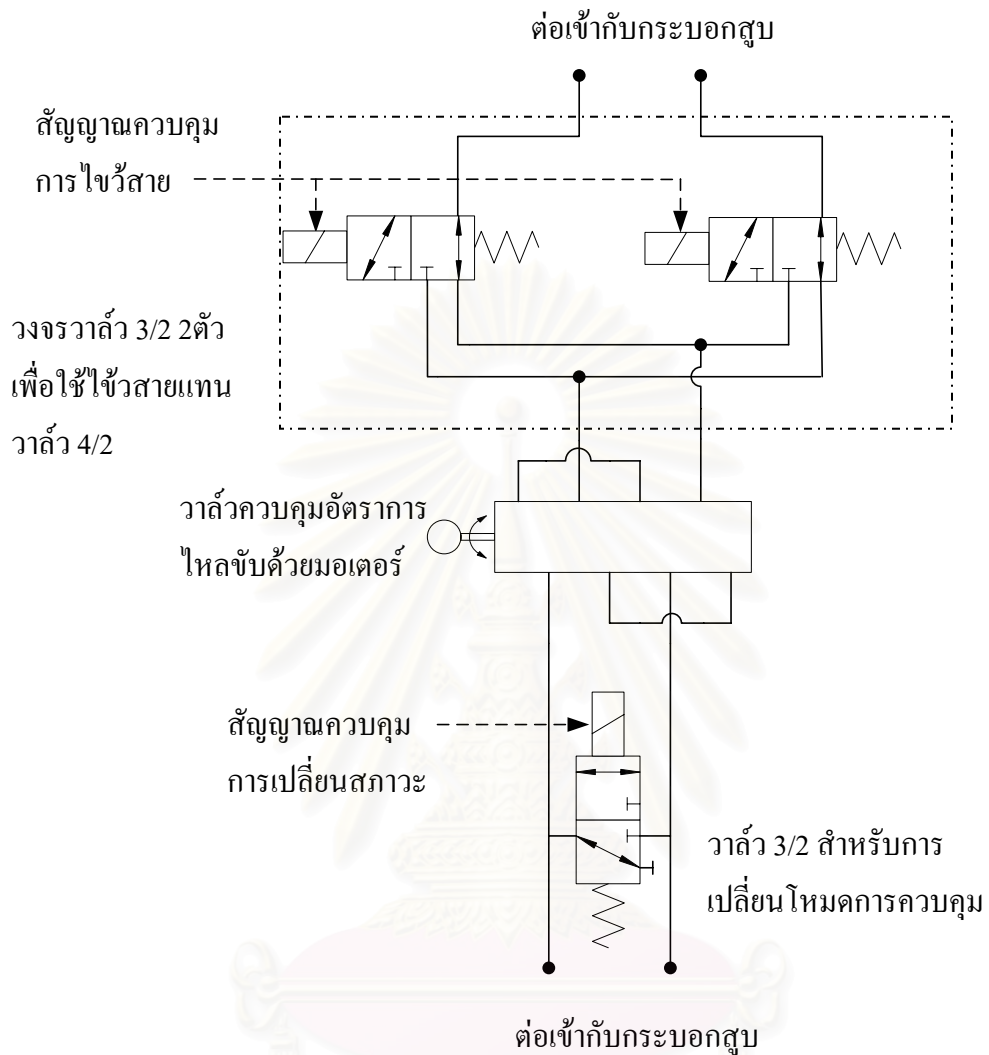


รูปที่ 5.11 b) แสดงชุดวาล์วที่ได้สร้างขึ้นจริง

ในชุดวาล์วควบคุมอัตราการไหลจะแสดงในรูปที่ 5.12 วาล์วควบคุมอัตราการไหลเพียงตัวเดียวจะควบคุมอัตราการไหลที่ส่งผลให้ควบคุมอัตราของโคบอลต์ในช่วง 1:0 ถึง 0:1 ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

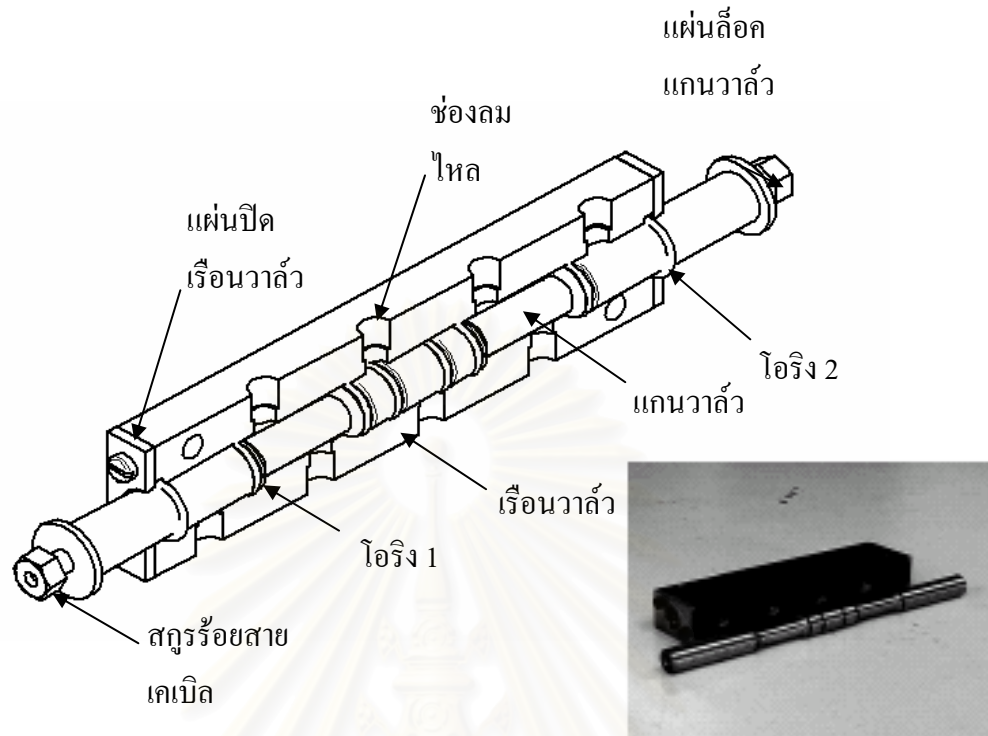
รายละเอียดโครงสร้างของวาล์วควบคุมอัตราการไหลจะแสดงในรูปที่ 5.13 กลไกของวาล์วจะมีลักษณะเป็นวาล์วแบบแกนเลื่อน แกนวาล์วจะถูกขับเคลื่อนด้วยการดึงจากมอเตอร์ SM233AE ผ่านสายเคเบิล ตัววาล์วจะประกอบด้วยเรือนวาล์วที่ถูกเจาะช่องลมไหลทั้งหมด 8 ช่อง แกนวาล์วจะเป็นเพลลาเจียร์นีย์และใส่โอริงขนาด 6.3x2.4 มม. เพื่อบังคับการไหลของลมภายในตัววาล์ว และใส่โอริงที่หัวท้ายสำหรับป้องกันการรั่วซึมออกจากตัววาล์วด้วยโอริงขนาด 14x2 มม. ที่ปลายทั้งสองด้านของเพลลาแกนวาล์วจะทำเกลียวเพื่อยึดกับสกรูร้อยสายเคเบิล ตัวสกรูร้อยสายเคเบิลจะทำหน้าที่ในการยึดแผ่นล็อกแกนวาล์วป้องกันการแกนวาล์วหลุดออกจากเรือนวาล์ว และทำหน้าที่ในการปรับความตึงของสายเคเบิลด้วยการหมุนสกรูเข้าออก วาล์วควบคุมอัตราการไหลจะควบคุมอัตราการไหลด้วยการเลื่อนแกนวาล์วให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งต่างๆ



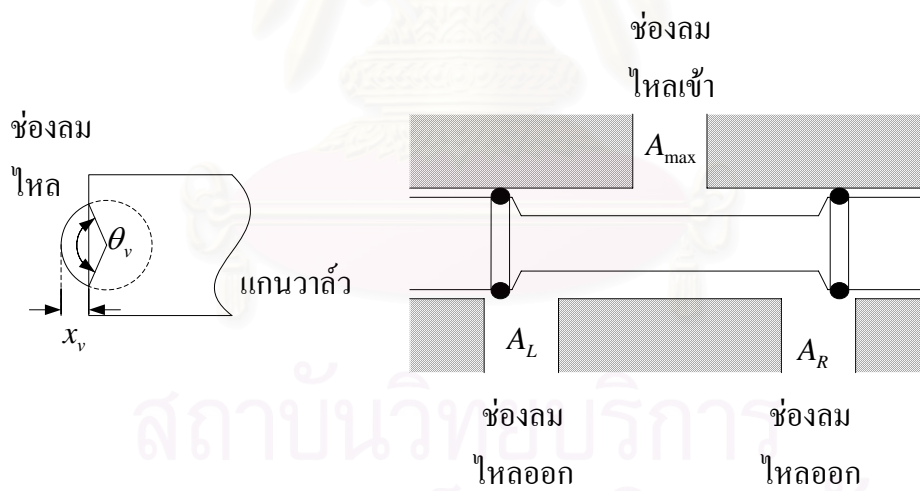


รูปที่ 5.12 แสดงวงจรสมบูรณ์ของชุดวาล์วควบคุมอัตราการไหล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

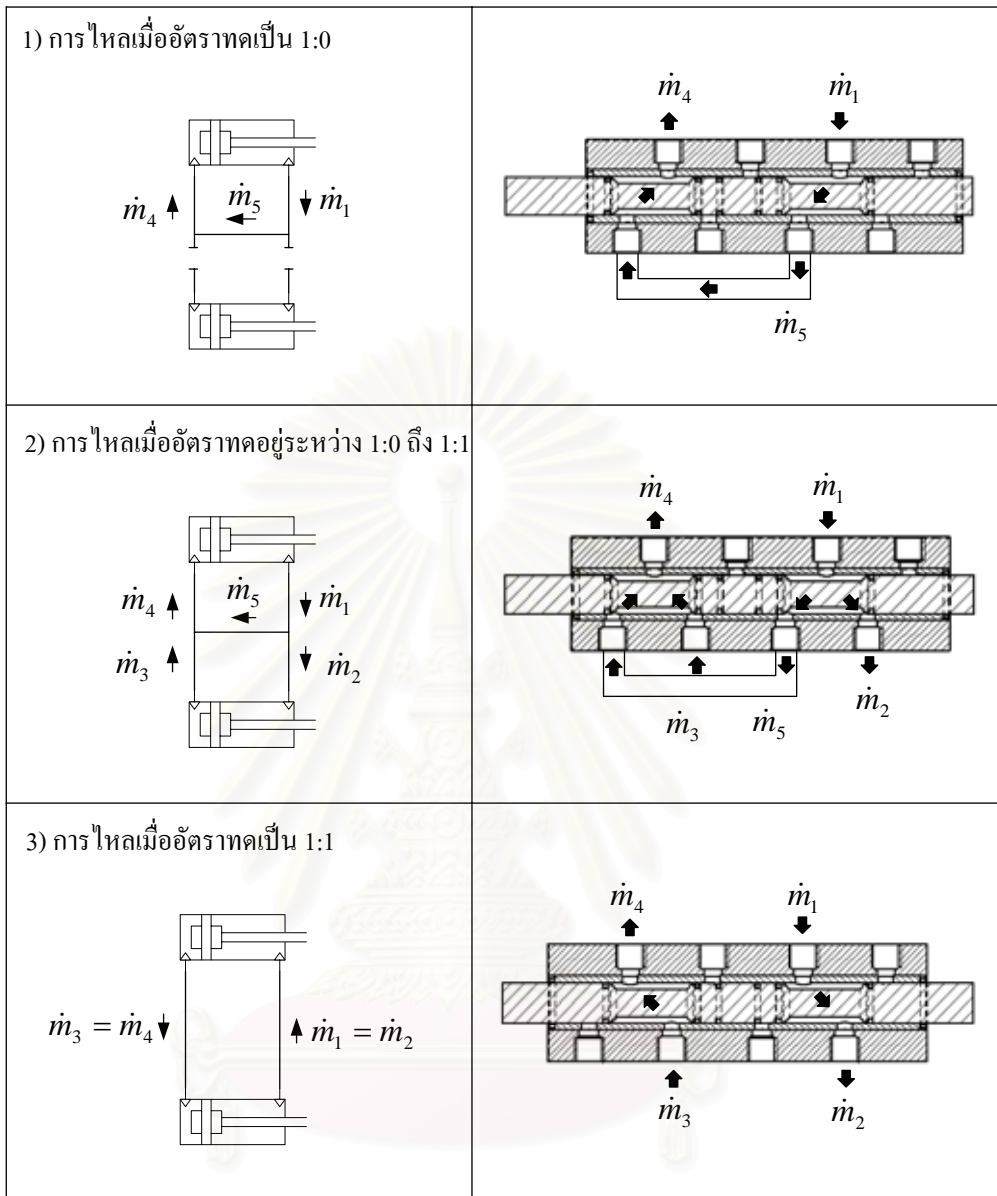


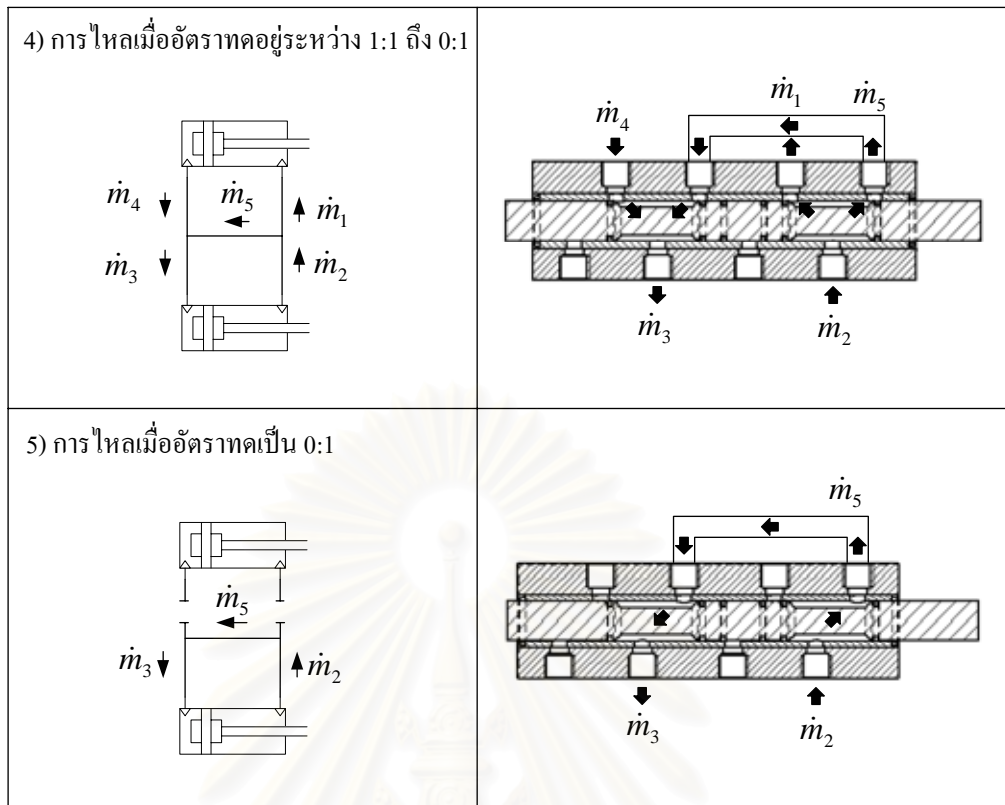
รูปที่ 5.13 แสดงรายละเอียดของวาล์วควบคุมการไหล



รูปที่ 5.14 พื้นที่การไหล

รูปที่ 5.15 แสดงส่วนควบคุมการไหลของวาล์ว





ตารางที่ 5.1 แสดงการไหลระหว่างกระบอกสูบและการไหลในตัววาล์ว

### 5.2.2 ช่วงการควบคุมของวาล์ว

ในตารางที่ 5.1 แผนผังทางด้านซ้ายของตารางจะแสดงทิศทางการไหลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบอกสูบ และรูปทางด้านขวาจะเป็นภาพตัดแสดงให้เห็นการไหลที่เกิดขึ้นในตัววาล์ว สัญลักษณ์ที่กำกับอยู่ที่ช่องลมไหลจะมีความหมายดังนี้

X.L.-จะเป็นช่องลมสำหรับต่อเข้ากับห้องทางด้านซ้ายของกระบอกสูบใน

แนวแกน x

X.R.-จะเป็นช่องลมสำหรับต่อเข้ากับห้องทางด้านขวาของกระบอกสูบใน

แนวแกน x

Y.L.-จะเป็นช่องลมสำหรับต่อเข้ากับห้องทางด้านซ้ายของกระบอกสูบใน

แนวแกน y

Y.R.-จะเป็นช่องลมสำหรับต่อเข้ากับห้องทางด้านขวาของกระบอกสูบใน

แนวแกน y

R1,R2 - เป็นช่องสำหรับ bypass โดยช่อง R1 และ R2 จะต่อเข้าด้วยกัน

R3,R4 - เป็นช่องสำหรับ bypass โดยช่อง R3 และ R4 จะต่อเข้าด้วยกัน

การทำงานของวาล์วควบคุมอัตราการไหล จะแบ่งการควบคุมการไหลออกเป็นช่วงๆ ดังนี้

1) ตำแหน่ง  $x_v=0$  ที่ตำแหน่งนี้ ช่อง X.L. จะต่อกับช่อง X.R. ผ่านช่อง bypass R3 และ R4 ทำให้ ลมระหว่างแต่ละห้องของกระบอกสูบในแนวแกน x สามารถไหลถึงกันได้ ส่งผลให้กระบอกสูบในแนวแกน x สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ในขณะที่ช่อง Y.L. และ Y.R. จะถูกปิดทำให้กระบอกสูบในแนวแกน y เคลื่อนที่ไม่ได้ นั่นคือโคบอดจะมี อัตราทดเป็น 1:0

2) ตำแหน่งของวาล์วอยู่ระหว่าง 0 ถึง 7 ( $0 < x_v < 7$ ) ช่อง X.R. จะต่อเข้ากับช่อง Y.R. และช่อง R3 ช่อง X.L. จะต่อเข้ากับช่อง Y.L. และ R4 แกนวาล์วจะเซาะร่องเพื่อควบคุมให้พื้นที่หน้าตัดของช่อง X.L. และ X.R. เปิดเต็มที่ตลอดช่วง แต่พื้นที่หน้าตัดของช่อง R3 และ R4 จะค่อยๆ ปิดลง และช่อง Y.R. และ Y.L. จะค่อยเปิดขึ้นเมื่อแกนวาล์วเคลื่อนที่จาก 0 ไป 7 เพื่อควบคุมอัตราการไหลกลับของลมที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโคบอด

การควบคุมการไหลจะเป็นหน้าที่ของแกนวาล์ว ซึ่งจะควบคุมการไหลด้วยการเซาะร่องที่แกนวาล์วตามรูปที่ 5.15 ซึ่งแสดงเพียงส่วนหนึ่งของวาล์วควบคุมการไหล ร่องที่เซาะขึ้นบนแกนวาล์วจะเป็นควบคุมอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดที่ลมไหลผ่านของช่องลมสำหรับไหลออก ด้วยการจำกัดพื้นที่หน้าตัดของช่องลมไหลออกทั้งสองให้เปิดเป็นบางส่วน โดยผลรวมของพื้นที่หน้าตัดที่ลมไหลออกจะคงที่ และเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องลมไหลหนึ่งช่องเต็มอย่างไรก็ตามการควบคุมตำแหน่งของแกนวาล์วไม่สามารถควบคุมอัตราทดที่แน่นอนได้เนื่องจากอัตราส่วนการไหลของลมผ่านช่องต่างๆจะไม่แปรผันตรงตามพื้นที่หน้าของช่องลม ดังนั้นการควบคุมตำแหน่งของวาล์วจึงจะพิจารณาเพียงแค่ การควบคุมเพื่อกำหนดอัตราส่วนพื้นที่หน้าของช่องลมที่ลมไหลผ่านสู่กระบอกสูบแต่ละตัวเท่านั้นซึ่งหมายถึงอัตราทดที่เกิดขึ้นจริงจะผิดไปจากอัตราทดโดยประมาณที่คำนวณจากอัตราส่วนของพื้นที่ช่องลมและสมมุติฐานที่ว่าของไหลในระบบเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ การแก้ไขความผิดพลาดของอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจะใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับมา

ชดเชยในส่วนนี้ ในรูปที่ 5.15 ช่องทางด้านบนจะเป็นช่องลมจากกระบอกสูบในแกน x ไหลเข้าซึ่งจะเปิดเต็มที่ด้วยพื้นที่หน้าตัด  $A_{max}$  ส่วนช่องลมไหลออกทางด้านล่างทางขวาจะเปิดให้ลมไหลไปกระบอกสูบในแกน y ด้วยพื้นที่หน้าตัด  $A_R$  และช่องลมทางด้านล่างซ้ายมือจะเปิดช่องลม bypass มีพื้นที่หน้าตัด  $A_L$  ความสัมพันธ์ของตำแหน่งของวาล์วกับอัตราส่วนพื้นที่การไหล  $r_0$  ของการไหลไปกระบอกสูบทั้งสองตัวหรืออัตราทดโดยประมาณจะเป็น

$$r_0 = \frac{A_R}{A_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{A_L}{A_R}} \quad (5.1)$$

โดยที่ พื้นที่หน้าตัดการไหลของช่องลมไหลออกทางด้านขวา  $A_R$  เมื่อแกนวาล์วอยู่ในตำแหน่ง  $x_v$  ตามในรูปที่ 5.14 จะหาได้จากสมการที่ (5.2)

$$A_R = (\theta - \sin \theta) r_p^2 / 2 \quad (5.2)$$

โดยที่ 
$$\theta = 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{x_v}{r_p} \right) \quad (5.3)$$

และจากความสัมพันธ์ที่พื้นที่หน้าตัดรวมจะเท่ากับพื้นที่หน้าตัดหนึ่งช่องการไหล พื้นที่หน้าตัดของช่องลมไหลออกทางด้านซ้าย  $A_L$  คือ

$$A_L = \pi r_p^2 - A_R \quad (5.4)$$

ดังนั้นอัตราดโดยประมาณจะคำนวณได้จากอัตราส่วนพื้นที่ลมไหลที่จะคำนวณตามสมการ (5.5)

$$r_0 = \frac{1}{1 + \frac{A_L}{A_R}} = \frac{\left[ 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{x_v}{r_p} \right) - \sin \left( 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{x_v}{r_p} \right) \right) \right] r_p^2}{2\pi r_p^2} \quad (5.5)$$

ในกรณีนี้ ช่องลมทางด้านซ้ายของรูปที่ 5.15 คือช่อง R.3. , ช่องลมทางด้านขวาคือช่อง Y.R. และช่องลมทางด้านบนจะเป็นช่อง X.R. การไหลของลมก็จะถูกแบ่งตามอัตราส่วนพื้นที่ของช่อง Y.R. และช่อง R3 ลมส่วนหนึ่งที่ไหลเข้าที่ช่อง R3 จะไหลผ่านท่อ bypass กลับสู่กระบอกสูบในแนวแกน x และลมส่วนที่เหลือจะไหลผ่านช่อง Y.R. เข้าสู่กระบอกสูบในแนวแกน y ส่วนลมที่ไหลออกจากกระบอกสูบในแนวแกน y จะไหลเข้าที่ช่อง Y.L มารวมกับลมที่ไหลจากท่อ bypass เข้ากระบอกสูบในแนวแกน x ตามแนวคิดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 ซึ่งในระยษะชัก 0 ถึง 7 นี้จะให้ช่วงอัตราดอยู่ระหว่าง 1:0 ถึง 1:1

3) ตำแหน่งของวาล์วอยู่ระหว่าง 7 ถึง 17.5 ( $7 < x_v < 17.5$ ) ช่อง X.R. จะต่อเข้ากับช่อง Y.R. และช่อง X.L ต่อเข้ากับช่อง Y.L. และช่อง R1,R2,R3 และ R4 จะปิดทั้งหมด ดังนั้นลมที่ไหลออกจากกระบอกสูบหนึ่งจะไหลเข้าสู่อีกกระบอกสูบหนึ่งทั้งหมด ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของกระบอกสูบมีอัตราดเป็น 1:1



4) ตำแหน่งของวาล์วจะอยู่ระหว่าง 17.5 ถึง 24.5 ( $17.5 < x_v < 24.5$ ) ช่อง Y.R. จะต่อเข้ากับช่อง X.R. และช่อง R1 ช่อง Y.L. จะต่อเข้ากับช่อง X.L. และ R2 ช่อง X.L. และ X.R. เปิดเต็มที่ตลอดช่วง แต่พื้นที่หน้าตัดของช่อง R1 และ R2 จะค่อยๆ ปิดลง และช่อง Y.R. และ Y.L. จะค่อยเปิดขึ้นเมื่อแกนวาล์วเคลื่อนที่จาก 17.5 ไป 24.5 การไหลของลมจะถูกแบ่งตามอัตราส่วนพื้นที่ของช่อง X.R. และช่อง R1 ลมส่วนหนึ่งที่ไหลเข้าที่ช่อง R1 จะไหลผ่านท่อ bypass กลับสู่กระบอกสูบในแนวแกน y และลมส่วนที่เหลือจะไหลผ่านช่อง X.R. เข้าสู่กระบอกสูบในแนวแกน x ส่วนลมที่ไหลออกจากกระบอกสูบในแนวแกน y จะไหลเข้าที่ช่อง X.L. มารวมกับลมที่ไหลจากท่อ bypass เข้ากระบอกสูบในแนวแกน y ซึ่งในระยะชั้ก 17.5 ถึง 24.5 นี้จะให้ช่วงอัตราทคอยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 0:1

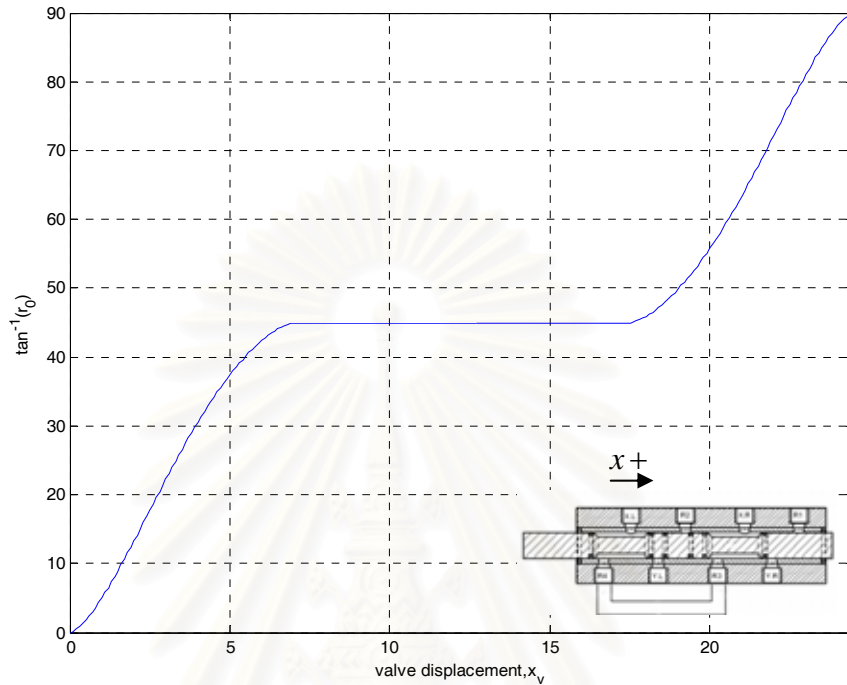
อัตราส่วนพื้นที่ลมที่ล้กที่จะหลักการคำนวณเช่นเดียวกับข้อ 2) แต่ช่องลมทางด้านซ้ายของรูปที่ 5.15 จะเปลี่ยนเป็นช่อง R.1, ช่องลมทางด้านขวาจะเปลี่ยนเป็นช่อง X.R. และช่องลมทางด้านบนจะเป็นช่อง Y.R. ตำแหน่งของแกนวาล์วจะถูกเลื่อนขึ้นไป 17.5 ม. อัตราส่วนของพื้นที่การไหลจะคำนวณได้จากสมการ (5.6)

$$r_0 = \frac{1}{1 + \frac{A_L}{A_R}} = \frac{\left[ 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{(x_v - 17.5)}{r_p} \right) - \sin \left( 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{(x_v - 17.5)}{r_p} \right) \right) \right] r_p^2}{2\pi r^2} \quad (5.6)$$

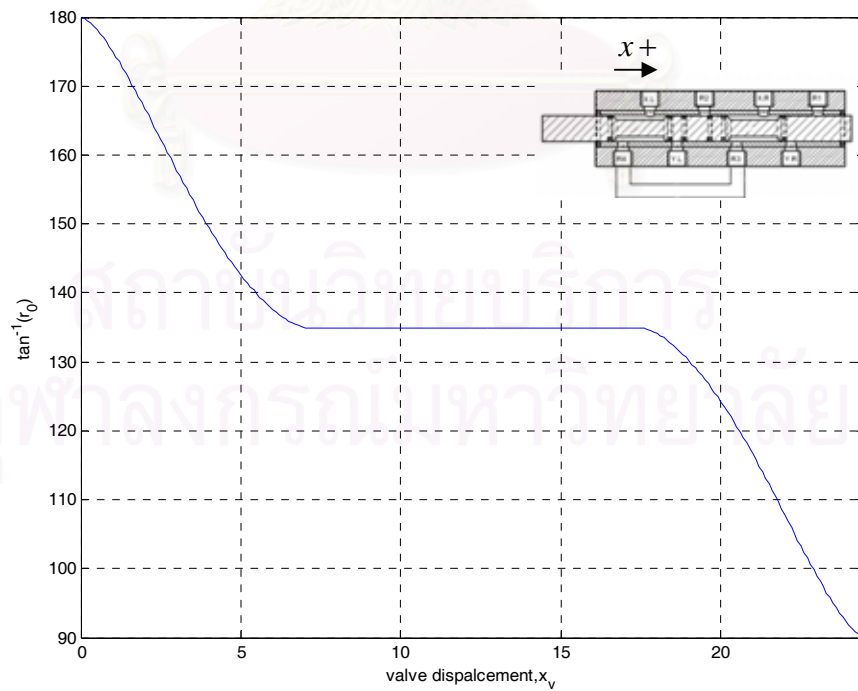
5) ตำแหน่งของวาล์วจะอยู่ที่ 24.5 ช่อง Y.R. จะต่อเข้ากับช่อง Y.L. ผ่านทางท่อ bypass R1-R2 และช่องอื่นๆจะถูกปิด ทำให้อัตราทคของโคบอดเป็น 0:1

จากตาราง 5.1 จะเห็นได้ว่าวาล์วควบคุมอัตราการไหลเพียงตัวเดียวจะควบคุมอัตราการไหลเพื่อสร้างอัตราทคอยู่ในช่วง 1:0 ถึง 0:1 หรือถ้ามองการเคลื่อนที่ของโคบอดในระนียบ x-y จะเป็นการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ในมุม  $\theta_p$  ในช่วง 0-90 องศา ความสัมพันธ์ของตำแหน่งของแกนวาล์วกับอัตราทคโดยประมาณจะพล็อตกราฟได้ในรูป 5.16 ซึ่งยังไม่สามารถสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ได้อย่างสมบูรณ์ การที่จะสร้างเส้นทางเดินของโคบอดได้สมบูรณ์ คือ ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา จะต้องใช้โซลินอยด์มาต่อเสริมการทำงานของวาล์วควบคุมอัตราการไหล ตามวงจรรูปที่ 5.11 โซลินอยด์วาล์วแบบ 3/2 จำนวนสองตัวถูกนำมาใช้ทดแทนวาล์ว 4/2 เพื่อไขว้สายลูกสูบ เนื่องจากไม่สามารถหาวาล์ว 4/2 ที่มีคุณสมบัติตามต้องการได้ คือ วาล์วจะต้องขับเคลื่อนด้วยขดลวดโซลินอยด์เพื่อให้ได้เวลาตอบสนองที่รวดเร็ว และลมจะต้องสามารถไหลผ่านวาล์วได้ทั้งสองทิศทาง วาล์ว 3/2 สองตัวที่เสริมเข้ามานี้จะเพิ่มช่วงอัตราทคโดยประมาณของวาล์วตามในรูปที่ 5.17 ส่วนวาล์ว 3/2 อีกตัวหนึ่งจะใช้สำหรับการควบคุมการเข้าสู่การควบคุมแบบบังคับ

เส้นทางเดิน ถ้าวาล์วตัวนี้อยู่ในตำแหน่งเปิดให้การไหลเชื่อมต่อกันจะเป็นการปล่อยให้  
 โคบอลต์เคลื่อนที่ในแบบอิสระ แต่ถ้าวาล์วตัวนี้ปิดไม่ให้การไหลเชื่อมต่อกันจะเป็นการเข้า  
 สู่อุปกรณ์ควบคุมแบบบังคับการเคลื่อนที่



รูปที่ 5.16 แสดงอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของการไหลในช่วง 1:0 ถึง 0:1



รูปที่ 5.17 แสดงอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของการไหลในช่วง 0:1 ถึง -1:0

## บทที่ 6

### ระบบวัดและควบคุม

ระบบควบคุมต่างๆในโอบอตจะแยกย่อยได้เป็น การควบคุมแบบ PD ที่ใช้ในการควบคุมวาล์ว ควบคุมการไหล ตัวกรองสัญญาณต่างๆที่วัดเข้ามาได้ และระบบควบคุมของโอบอตซึ่งได้ทำการ ทดลองสองระบบ ได้แก่ ระบบควบคุมของยูนิโตไซเคิลโอบอตและระบบควบคุมแบบควบคุมจาก ทิศทางของแรง

#### 6.1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งในหุ่นยนต์โอบอต

ในหัวข้อนี้จะขอล่าวถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่บนโครงสร้างของโอบอตโดยสังเขป รายละเอียดทั้งหมดของอุปกรณ์จะยกไปกล่าวถึงโดยละเอียดในภาคผนวก รายการอุปกรณ์มีดังต่อไปนี้

6.1.1 เอนโคเดอร์ TRD-S2500 สำหรับอ่านตำแหน่งการเคลื่อนที่จำนวนสองตัว ต่อกับพู่เล่ที่ ร้อยสายเคเบิลผ่านตามที่กล่าวไว้ในบทที่แล้ว สัญญาณที่ได้จากเอนโคเดอร์จะเป็นแบบ line driver มีความละเอียด 2500 พัลส์ต่อรอบ

6.1.2 มอเตอร์ SM233AE และชุดขับ GV-U6E 1 ชุด มอเตอร์ SM233AE จะเป็นเซอร์โว มอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน และเป็นมอเตอร์แบบขับตรงที่นำมาขับวาล์วได้โดยตรงไม่ต้องใส่ ชุดทดกำลัง มอเตอร์จะถูกขับด้วยชุดขับ GV-U6E ซึ่งเป็นชุดขับแบบดิจิทัลสามารถปรับ รูปแบบการขับได้หลายรูปแบบ ในการวิจัยนี้จะใช้การขับในแบบควบคุมแรงบิด ซึ่งแรงบิดที่ มอเตอร์จะแปรผันตาม โวลต์เดจที่จ่ายให้กับชุดขับ

6.1.3 ชุดอุปกรณ์ตรวจรู้แรง ATI MINI 45 จะประกอบด้วยทรานสดิวเซอร์เป็นตัววัดแรง ของผู้ใช้ติดตั้งที่ฐานของค้ำจับของโอบอต สามารถวัดแรงได้ 3 แกนและแรงบิดได้อีก 3 แกน ทรานสดิวเซอร์จะใช้ร่วมกับอุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณไฟฟ้า

6.1.4 แผงวงจรมultifunction data acquisition PCL-812 เป็นการใช้ที่มีช่องจ่ายสัญญาณแอนา ลอก +10 V จำนวนสองช่อง จะใช้เพียงหนึ่งช่องสำหรับการจ่ายโวลต์เดจเพื่อควบคุมมอเตอร์ ช่องรับสัญญาณแอนาลอกจะมีทั้งหมด 16 ช่อง รับช่วงสัญญาณได้  $\pm 10$  V แบบ จะใช้เพียง 6 ช่องเพื่อรับสัญญาณจากชุดอุปกรณ์วัดแรง

6.1.5 แผงวงจรนับสัญญาณเอนโคเดอร์ PCL-833 เป็นการ์ดสำหรับอ่านค่าจากเอนโคเดอร์ซึ่งได้แก่ เอนโคเดอร์ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งของโคบอลต์และเอนโคเดอร์ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งของมอเตอร์ขับเคลื่อน

6.1.6 แผงวงจรขั้วรีเลย์ SILA EX\_RELAY เป็นแผงวงจรสำหรับขั้วรีเลย์ ซึ่งสามารถขั้วรีเลย์ได้ 4 ช่องสัญญาณ โดยรับสัญญาณป้อนเข้าแบบดิจิทัล

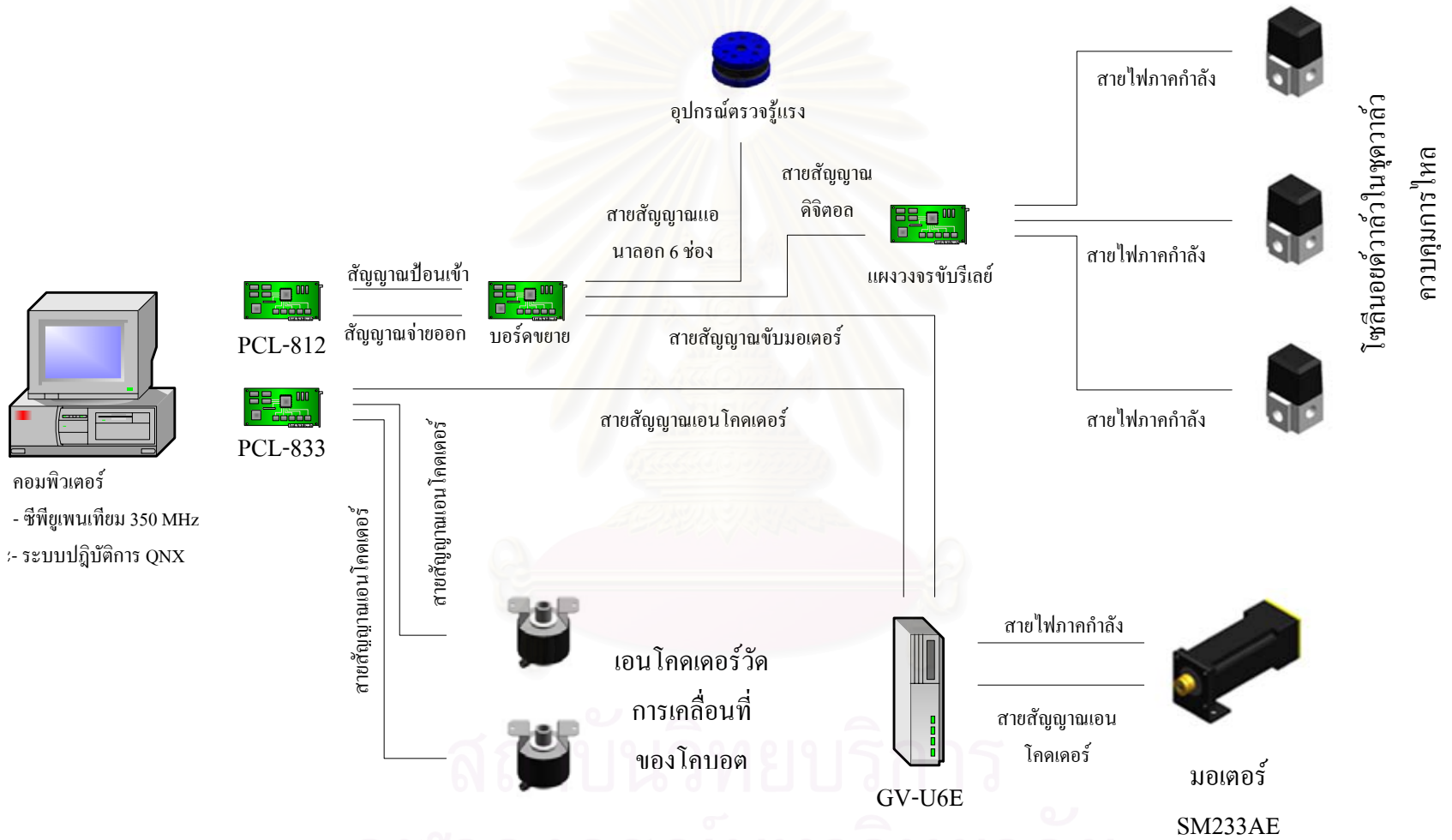
6.1.7 ระบบปฏิบัติการ QNX เป็นระบบปฏิบัติการเพื่องานทางด้านเรียลไทม์โดยเฉพาะ QNX จะอนุญาตให้โปรแกรมที่เขียนขึ้นใช้ช่องอินเทอร์เฟซของคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมที่วงรอบควบคุมได้เร็วและคาบเวลาของวงรอบควบคุมมีค่าคงที่

## 6.2 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมในหุ่นยนต์โคบอลต์

การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ต่างๆในหัวข้อ 6.1 จะแสดงในรูปที่ 6.1 ในการควบคุมโคบอลต์ คอมพิวเตอร์จะรับและส่งสัญญาณผ่านการ์ด PCL-812 และ PCL-833 สัญญาณเหล่านี้จะแบ่งเป็นกลุ่มๆ ได้แก่

สัญญาณจากเอนโคเดอร์วัดตำแหน่งโคบอลต์ จะเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล สัญญาณนี้จะส่งไปที่การ์ด PCL-833 ช่องที่ 1 และ 2 ซึ่งจะทำหน้าที่ในการนับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดอร์ก่อนส่งให้คอมพิวเตอร์ไปคำนวณตำแหน่งและความเร็วของโคบอลต์ สัญญาณที่อ่านจากเอนโคเดอร์เมื่อทำการควอดราเจอร์แล้วจะมีความละเอียดสูงที่ 10000 พัลส์ต่อรอบ เมื่อติดตั้งบนพู่เล่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาด 20 มม. ดังนั้นความละเอียดของตำแหน่งของโคบอลต์จะเท่ากับ

$$\frac{\pi(20)}{10000} = 0.00801 \text{ มิลลิเมตร}$$



รูปที่ 6.1 แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมโคปอต

สัญญาณควบคุมมอเตอร์สัญญาณควบคุมมอเตอร์ มอเตอร์จะมีเอนโคเดอร์ที่ติดตั้งไว้เพื่อวัดตำแหน่ง สัญญาณเอนโคเดอร์จากมอเตอร์จะส่งให้กับชุดขับ GV-U6E และชุดขับ GV-U6E จะส่งสัญญาณจากเอนโคเดอร์นี้ไปที่การ์ด PCL-833 ช่องสัญญาณที่ 3 สัญญาณเอนโคเดอร์จากมอเตอร์นี้ จะมีความละเอียด 4000 พัลส์ต่อรอบ เมื่อพูลที่ใช้อยู่สายเคเบิลในการขับวาล์วมีขนาด 20 มม จะทำให้ความละเอียดในการอ่านตำแหน่งของวาล์วมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\pi(20)}{4000} = 0.01571 \text{ มิลลิเมตร}$$

นอกจากนี้คอมพิวเตอร์จะควบคุมมอเตอร์ด้วยการส่งสัญญาณแอนะล็อกออกจากการ์ด สัญญาณแอนะล็อกจะมีความละเอียด 12 บิตและช่วงตั้งแต่ 0-10 โวลต์ แต่ชุดขับมอเตอร์จะใช้รับสัญญาณคำสั่งในช่วง  $\pm 10$  V สัญญาณแอนะล็อกจากการ์ด PCL-812 จึงต้องต่อผ่านบอร์ดขยายที่จะจ่ายไฟ 5 โวลต์ เป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับชุดขับมอเตอร์ ดังนั้นชุดขับมอเตอร์จะเห็นสัญญาณคำสั่งอยู่ในช่วง  $\pm 5$  โวลต์ ซึ่งจะทำให้สั่งให้มอเตอร์มีแรงบิดสูงสุดได้เพียงครั้งหนึ่ง แต่ก็พอเพียงพอต่อการขับวาล์ว

สัญญาณควบคุมรีเลย์ที่ใช้ในการขับโซลินอยด์วาล์ว จะเป็นสัญญาณจากช่องสัญญาณดิจิทัลขาออกของการ์ด PCL-812 ที่ส่งสัญญาณให้กับบอร์ดรีเลย์ SILA EX-RELAY เพื่อขับโซลินอยด์วาล์ว โดยที่ไฟในภาคกำลังของบอร์ดรีเลย์จะมีขนาด 24 โวลต์ ในส่วนนี้บอร์ดขยายจะทำที่เพียงเชื่อมต่อสายไฟเท่านั้น

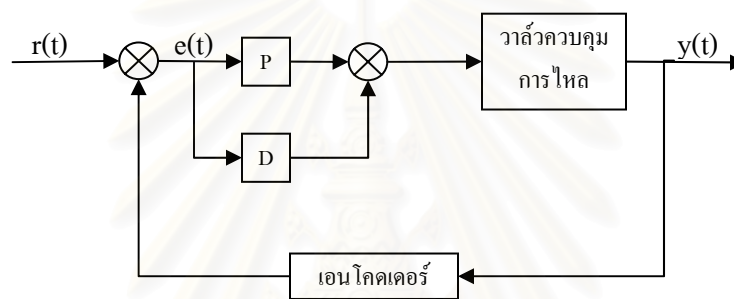
สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงจะต่อผ่านบอร์ดขยายเข้าสู่ช่องรับสัญญาณแอนะล็อกของการ์ด PCL-812 โดยตรง บอร์ดจะทำหน้าที่เพียงแค่การเชื่อมต่อสายไฟเช่นกัน ขนาดของแรงที่วัดได้จะถูกส่งออกมาจากชุดอุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ ในรูปของสัญญาณโวลต์ตรงจำนวน 6 ช่องสัญญาณ สัญญาณ 6 ช่องนี้จะถูกอ่านเข้าคอมพิวเตอร์ด้วยการ์ด PCL-812 ซึ่งจะได้ค่าความต่างศักย์ 6 ค่า และต้องนำไปคูณกับเมตริกการแปลงเพื่อเปลี่ยนให้เป็นค่าแรงที่วัดได้ เมตริกการแปลงจะแสดงในภาคผนวก ก.

### 6.3 การควบคุมวาล์วควบคุมการไหล

ชุดวาล์วควบคุมอัตราการไหลจะใช้มอเตอร์ในการขับแกนวาล์วควบคุมการไหล และใช้โซลินอยด์ขับวาล์วแบบ 3/2 มอเตอร์ที่ใช้ในจะเป็นมอเตอร์ของ Parker รุ่น SM322AE ที่เป็นมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน ขับด้วยตัวขับของ Parker รุ่น GV-U6E ตัวขับจะถูกตั้งให้ทำงานในรูปแบบควบคุมแรงบิด ซึ่งเป็นโหมดการควบคุมที่แรงบิดของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับตัวขับ ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับตัวขับมอเตอร์จะได้มาจากแผงวงจรรุ่น PCL-812 ที่จ่ายสัญญาณออกมาเป็น 0-10



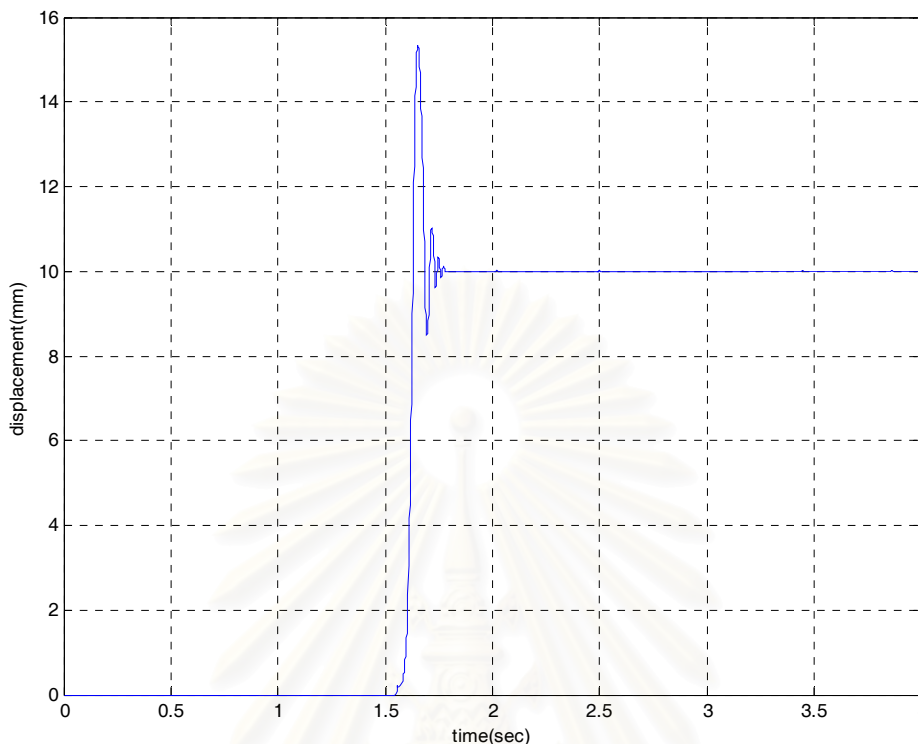
โวลต์ ผ่านวงจรที่ทำให้สัญญาณควบคุมมอเตอร์อยู่ในช่วง -5 โวลต์ถึง +5 โวลต์ ระบบควบคุมที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ให้ขับแกนวาล์ว จะใช้ตัวควบคุมแบบ PD ซึ่งจะประกอบด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตามแผนภาพที่ 6.2 ระบบควบคุมแบบ PD ส่วนการหาค่าของตัวควบคุมแบบ PD จะทำการปรับที่หน้างาน โดยเริ่มจากการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวชดเชยแรงเสียดทาน ค่อยปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนให้สูงจนระบบเริ่มไม่เสถียร จากนั้นจึงลดค่าอัตราขยายลงครึ่งหนึ่ง แล้วเริ่มปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์และปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมสัดส่วนจนสามารถควบคุมได้ตามต้องการ ค่าอัตราขยายของระบบควบคุมแบบ P และ D จะได้เท่ากับ 350 และ 400 ตามลำดับ



รูปที่ 6.2 แผนผังระบบควบคุมของวาล์ว

ผลตอบสนองต่อสัญญาณป้อนเข้าแบบขั้นของระบบควบคุม PD จะแสดงอยู่ในรูปที่ 6.3 ผลตอบสนองของวาล์วจะมีเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูตเท่ากับ 53 เปอร์เซ็นต์, ช่วงเวลาขาขึ้น 0.08 วินาที, ช่วงเวลาในการขึ้นสู่ค่าสูงสุดเท่ากับ 0.1 วินาที และช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 0.2 วินาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.3 แสดงผลตอบสนองของวาล์วควบคุมการไหลต่อคำสั่งแบบขั้นให้เคลื่อนที่จาก 0-10 มม.

#### 6.4 การวัดสัญญาณความเร็ว

ความเร็วในการเคลื่อนที่จะได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ตามสมการที่ 6.1

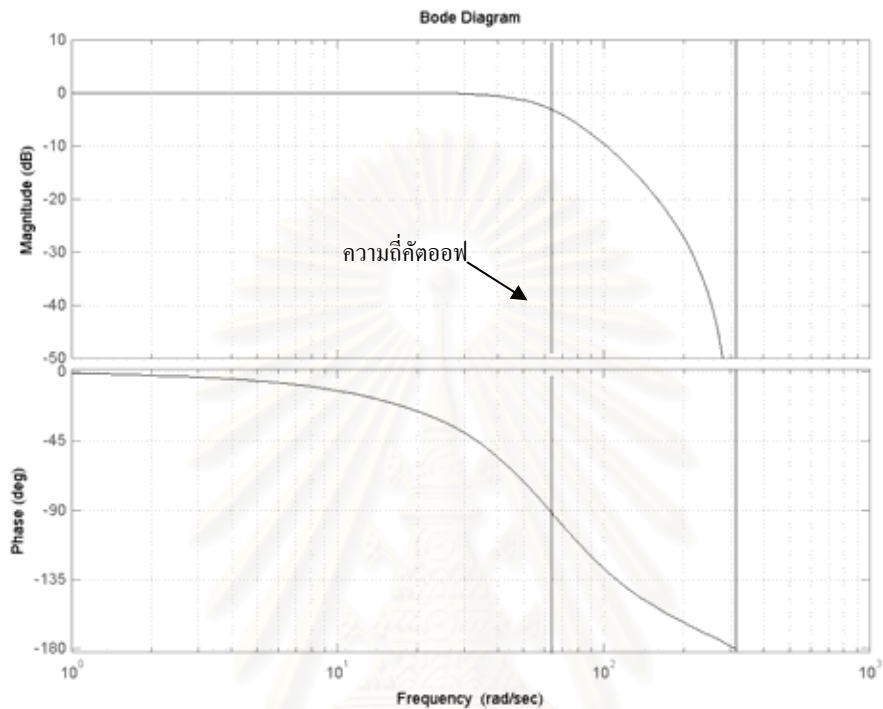
$$v_i = \frac{x_{i,T} - x_{i,T-1}}{\Delta t} \quad (6.1)$$

ความเร็วที่ได้จะผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนนำไปใช้ในตัวควบคุม ตัวกรองความถี่ต่ำที่ใช้จะเป็นแบบ chebyshev 2<sup>nd</sup> order โดยกำหนดความถี่คัตออฟที่ 10 เฮิรตซ์ และค่า  $\theta = 0.7$

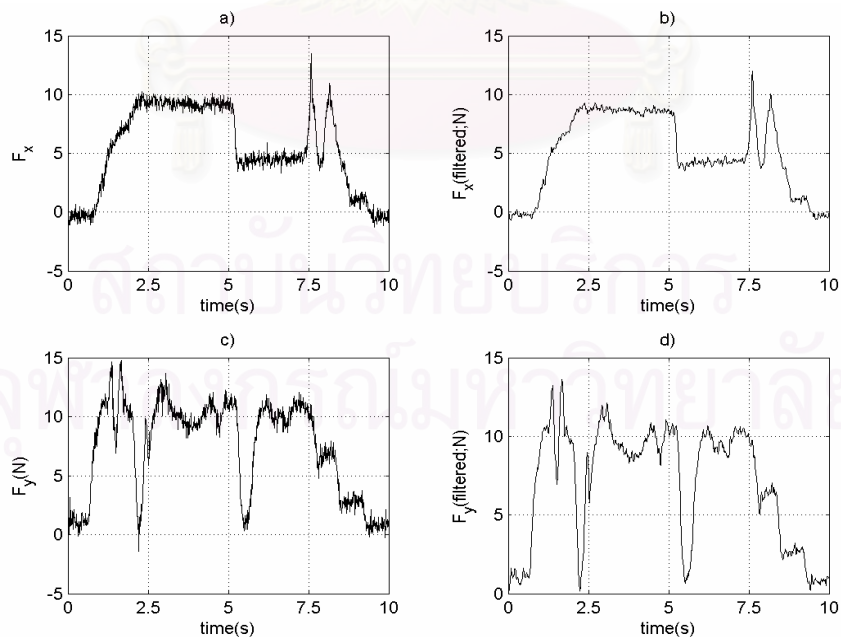
#### 6.5 การกรองสัญญาณของค่าแรงที่วัดได้

ตัวกรองสัญญาณที่ใช้กรองสัญญาณของแรง จะเป็นตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แบบ butter-worth และออกแบบขึ้นเอง การออกแบบจะทำในโปรแกรม Matlab ตัวกรองสัญญาณจะมี

ความถี่คัตออฟที่ 10 เฮิรต์ ที่เป็นความถี่ทำงานของข้อมือมนุษย์[16] กราฟโบดี้ของตัวกรองสัญญาณนี้ จะแสดงอยู่ในรูปที่ 6.4 และในรูปที่ 6.5 จะเป็นตัวอย่างแรงที่วัดได้ก่อนและหลังผ่านตัวกรอง



รูปที่ 6.4 แสดงกราฟโบดี้ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้กับสัญญาณแรง

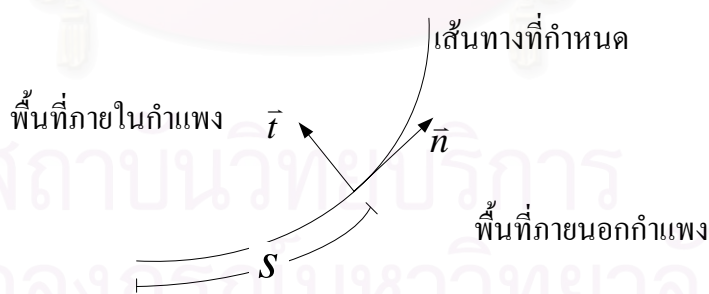


รูปที่ 6.5 แสดงค่าแรงที่วัดได้และหลังจากผ่านการกรอง

## 6.6 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอลต์

ระบบควบคุมของโคบอลต์ที่ใช้กับโคบอลต์ในงานวิจัยนี้จะมีสองรูปแบบ ในครั้งแรกจะใช้ระบบควบคุมของยูนิทไซเคิลโคบอลต์ ในการทดลองจะพบว่า ระบบควบคุมของยูนิทไซเคิลโคบอลต์จะไม่สามารถใช้กับโคบอลต์แบบของไหลได้ ภายหลังจากได้ออกแบบระบบควบคุมตัวใหม่ที่ใช้ควบคุมจากแรงของผู้ใช้แทนซึ่งได้ผลดีระดับหนึ่ง สำหรับหัวข้อนี้จะขอกกล่าวถึงระบบควบคุมทั้งสองแบบ ผลการทดลองของระบบควบคุมและวิเคราะห์ผลจะกล่าวถึงในบทถัดไป

ในการควบคุมโคบอลต์นั้นจะมีรูปแบบในการควบคุมสองรูปแบบด้วยกัน คือ การควบคุมแบบบังคับเส้นทางเดิน จะเป็นการควบคุมให้โคบอลต์สามารถเคลื่อนที่ได้ตามเส้นทางที่กำหนดเท่านั้น และการอนุญาตให้เคลื่อนที่อิสระจะอนุญาตให้ผู้ใช้เคลื่อนที่โคบอลต์ได้ทุกทิศทาง การควบคุมให้โคบอลต์สร้างกำแพงเสมือนนั้น ที่จริงแล้วก็คือการใช้ระบบควบคุมในแบบบังคับเส้นทางเดิน เมื่อตำแหน่งของโคบอลต์อยู่ที่แนวกำแพงเสมือนและพยายามจะเคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพง จนกระทั่งตรวจสอบได้ว่าผู้ใช้พยายามดึงโคบอลต์ออกจากแนวกำแพง ระบบควบคุมจะเปลี่ยนเป็นการอนุญาตให้เคลื่อนที่อิสระ ผู้ใช้ก็จะดึงโคบอลต์ออกจากแนวกำแพงได้เส้นทางเดินดังกล่าวนี้จะถูกระบุลักษณะด้วยเวกเตอร์  $\hat{t}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวเส้นสัมผัสส่วนโค้ง และเวกเตอร์  $\hat{n}$  จะเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์  $\hat{t}$  ในงานวิจัยนี้ จะกำหนดให้ทิศของเวกเตอร์  $\hat{n}$  ซึ่งเข้าไปในกำแพงเสมือน ตามรูปที่ 6.6 เวกเตอร์ทั้งสองตัวนี้จะเป็นฟังก์ชันของความยาวส่วนโค้งตามเส้นทางเดิน  $s$  ซึ่งเป็นระยะทางตามเส้นทางเดินที่วัดจากจุดเริ่มต้นจากจุดเริ่มต้น เวกเตอร์สองตัวนี้จะนำไปใช้ในการสร้างระบบควบคุมสำหรับโคบอลต์ทั้งสองรูปแบบ



รูปที่ 6.6 การอธิบายลักษณะของกำแพงด้วยเวกเตอร์  $\hat{t}$  และ  $\hat{n}$

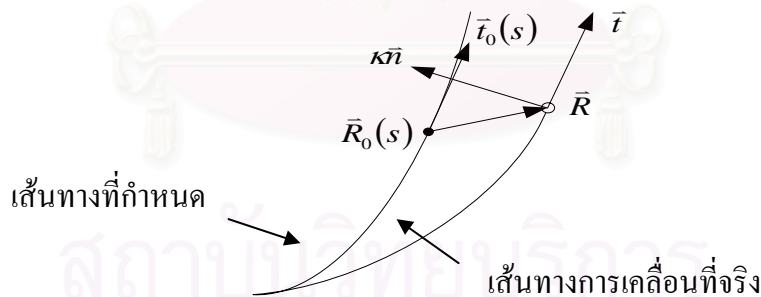
### 6.6.1 ระบบควบคุมของยูนิทไซเคิลโคบอลต์

ระบบควบคุมของของยูนิทไซเคิลโคบอลต์จะนำมาจาก[2] การควบคุมแบบเดินตามเส้นของระบบควบคุมนี้จะประกอบด้วย ตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและตัวควบคุมแบบ

ป้อนกลับ ถ้าการเคลื่อนที่ของโคบอดสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้อย่างสมบูรณ์ นั่นคือทิศทางของความเร็วขณะใดขณะหนึ่งในการเคลื่อนที่ของโคบอดจะมีทิศในแนวเส้นสัมผัสส่วนโค้งของเส้นทางเดินตลอดเวลา การควบคุมโคบอดจะเป็นหน้าที่ของตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว ความเร็วเชิงมุมในการเปลี่ยนทิศของความเร็วหรือความเร็วเชิงมุมในการเปลี่ยนมุมของเส้นทางเดินที่จะทำให้การเคลื่อนที่ที่เป็นไปอย่างถูกต้อง จะเป็นฟังก์ชันของความเร็วในการเคลื่อนที่และ curvature ของเส้นทางเคลื่อนที่ที่ตามสมการ

$$\omega = \kappa u \quad (6.1)$$

แต่ในการทำงานจริงเส้นทางเคลื่อนที่จริงของโคบอดจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นตามรูปที่ 6.7 ดังนั้นตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียวจึงไม่สามารถควบคุมให้โคบอดทำงานได้ ระบบควบคุมโคบอดจึงต้องเพิ่มตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าในรูปที่ 6.7 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อโคบอดเคลื่อนที่ โคบอดจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $R$  ซึ่งผิดพลาดไปจากตำแหน่งจริงบนเส้นทางเดิน  $R_0(s)$  และทิศทางทาง  $\bar{t}$  ของโคบอดจะไม่ขนานกับทิศทางของเวกเตอร์ tangent ของ  $\bar{t}_0(s)$  ทั้ง  $R_0(s)$  และเวกเตอร์  $\bar{t}_0(s)$



รูปที่ 6.7 แสดงเส้นทางเคลื่อนที่จริงเทียบกับเส้นทางที่กำหนด

จะเป็นฟังก์ชันของความยาวส่วนโค้งของเส้นทางเดิน  $s$  ซึ่งมีความการความยาวส่วนโค้ง  $s$  จะมีความซับซ้อนทำให้ยากต่อการคำนวณค่าที่ถูกต้องของ  $s$  ในวงรอบควบคุม ดังนั้นค่าของความยาวส่วนโค้งจะได้จากการประมาณค่า ด้วยการนำค่าความยาวส่วนโค้งเดิมบวกเพิ่มเข้าไปด้วย  $[R - R_0(s)] \cdot \bar{t}_0(s)$  ความยาวส่วนโค้งโดยประมาณ  $s'$  จะเท่ากับ

$$s' = s + (R - R_0(s)) \cdot \bar{t}_0(s) \quad (6.2)$$

จากค่าความยาวส่วนโค้งโดยประมาณ จะทำให้สามารถหาค่า  $\bar{t}_0(s)$  และ  $R_0(s)$  เพื่อนำมาหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางได้ดังนี้

$$\Delta R = R - R_0(s) \quad (6.3)$$

$$\Delta \bar{t} = \bar{t} - \bar{t}_0(s) \quad (6.4)$$

จากค่าความผิดพลาดทั้งสองค่าจะนำมาแปลงให้อยู่ในรูปของค่าการชดเชย curvature  $\delta\kappa$  ด้วยการคูณด้วยอัตราขยาย  $G_1/L_2$  และ  $G_2/L$  แล้วหาผลรวมค่าผิดพลาด แล้วจึงฉายลงในแนวของเวกเตอร์ normal ตามสมการที่ (6.5)

$$\delta\kappa = -n_0(s') \cdot \left( \frac{G_1}{L^2} \Delta R + \frac{G_2}{L} \Delta T \right) \quad (6.5)$$

เมื่อนำไปชดเชยในระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าในสมการ (6.6) จะได้ระบบควบคุมของยูนิตไจเกิลโคบอดเป็น

$$\omega = u[\kappa_0(s') + \delta\kappa]$$

$$\omega = u \left[ \kappa_0(s') - n_0(s') \cdot \left( \frac{G_1}{L^2} \Delta R + \frac{G_2}{L} \Delta T \right) \right] \quad (6.6)$$

### 6.6.2 ระบบควบคุมแบบควบคุมแรง

ในระบบควบคุมแบบควบคุมแรง การควบคุมการสร้างเส้นทางเดินเพื่อสร้างแนวกำแพงจะเป็นไปตามแผนผังในรูปที่ 6.8 ขั้นตอนการทำงานจะเริ่มจากระบบควบคุมจะวัดแรงกระทำของผู้ใช้ ซึ่งแรงที่วัดมาได้นี้จะอยู่ในโคออดิเนต x-y ระบบควบคุมจะเปลี่ยนแรงกระทำให้อยู่ในแนว normal และ tangent ของแนวกำแพง คือ แรง  $\bar{F}_n$  และ  $\bar{F}_t$  ตามลำดับ จากนั้นจะตรวจสอบว่า  $\|\bar{F}_n\| > \|\bar{F}_t\|$  ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงแสดงว่ามุมระหว่างแรงกับแนว normal ( $\bar{n}$ ) มี

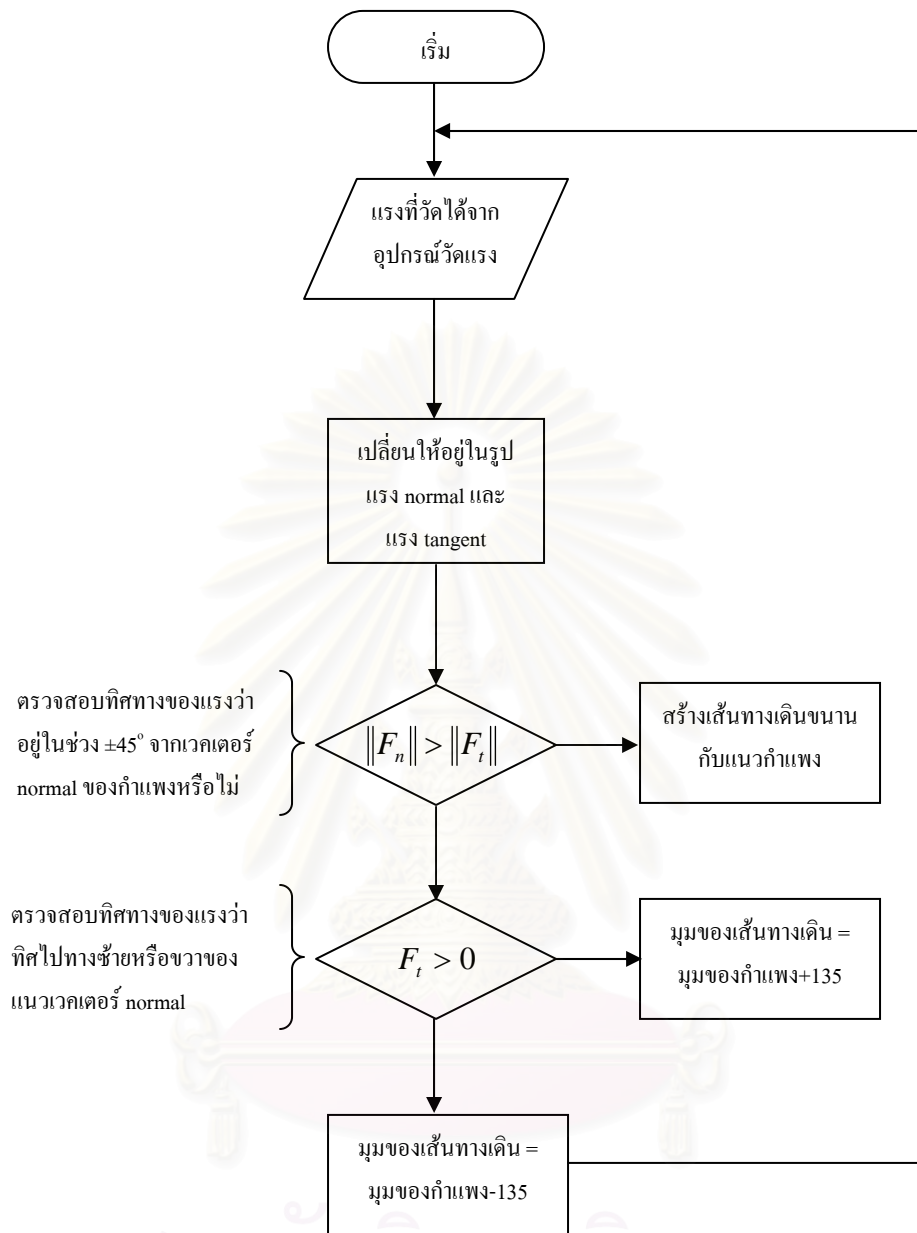


ขนาดอยู่ระหว่าง 0-45 องศา เส้นทางการเคลื่อนจะถูกสร้างอยู่ในแนว tangent ( $\bar{F}_t$ ) หรือขนานกับแนว  
 กำแพง จนกระทั่ง  $\|\bar{F}_n\| < \|\bar{F}_t\|$  ซึ่งหมายถึงมุมระหว่างแรงกับแนว normal มีขนาดมากกว่า 45  
 องศา ระบบควบคุมจะสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่มีมุมเท่ากับมุมของกำแพงเสมือนที่กำหนดด้วยม  
 มุม 135 องศาถ้าเงื่อนไข  $\bar{F}_t > 0$  เป็นจริง หรือสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่มีมุมเท่ากับมุมของกำแพง  
 เสมือนที่กำหนดด้วยมุม 135 องศาถ้าเงื่อนไข  $\bar{F}_t > 0$  เป็นเท็จ เพื่อบังคับให้โคบอลต์  
 เคลื่อนที่กลับเข้าสู่แนวกำแพง เนื่องจากองค์ประกอบของแรงที่เกิดขึ้นที่เส้นทางการเคลื่อนจะเป็นไป  
 ตามรูปที่ 6.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงกระทำของผู้ใช้ที่เกิดขึ้นบนเส้นทางการเคลื่อนสามารถพิจารณาให้  
 เป็นแรง  $\bar{F}_{tp}$  อยู่ในแนว tangent และ แรง  $\bar{F}_{np}$  ในแนว normal ของเส้นทางการเคลื่อน แรง  $\bar{F}_{np}$   
 ที่เกิดขึ้นจะถูกต้านด้วยแรงที่เท่ากันทำให้ไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการเคลื่อน แต่แรง  $\bar{F}_{tp}$   
 จะเป็นแรงที่ทำให้โคบอลต์ไถลไปตามแนวเส้นทางการเคลื่อน ดังนั้นการสร้างเส้นทางการเคลื่อนเพื่อนำ  
 โคบอลต์กลับเข้าสู่กำแพง จะรอให้แรง  $\bar{F}_{tp}$  มีทิศเข้าสู่กำแพง นั่นคือรอให้  $\|\bar{F}_n\| < \|\bar{F}_t\|$  หรือมุม  
 ระหว่างแนวแรงกับแนว normal ของเส้นทางการเคลื่อนมีขนาดเกิน 45 องศา ในทางกลับกันถ้าแรง  
 กระทำของผู้ใช้น้อยกว่า 45 องศาและระบบควบคุมสร้างเส้นทางการเคลื่อนในแนว 135 องศา แรงใน  
 แนว tangent ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในทิศทางที่ทำให้การเคลื่อนที่เข้าไปในกำแพง ซึ่งทำให้การสร้าง  
 กำแพงผิดพลาด

### 6.6.3 การควบคุมแบบมีการทำนายล่วงหน้า

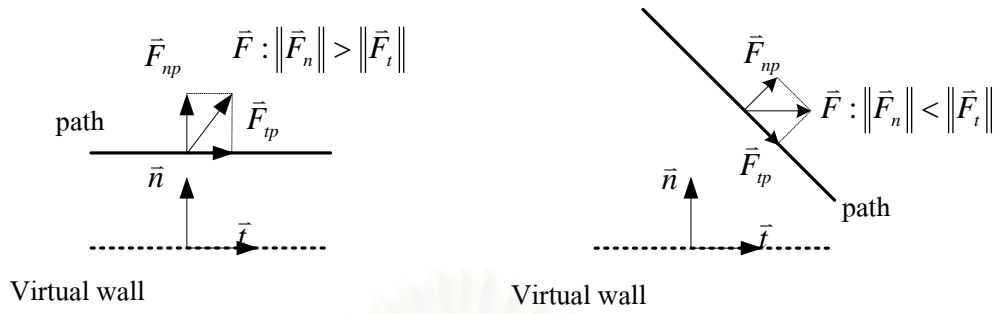
การทำงานของโคบอลต์ที่ตอบสนองต่อสัญญาณคำสั่งเพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่กำหนด  
 จะมีเวลาหน่วงในการตอบสนองค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้การสร้างเส้นทางการเคลื่อนเกิดขึ้นเมื่อโคบอลต์  
 เคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพงเข้าไปแล้ว นั่นคือจะเกิดระยะผิดพลาดขึ้นก่อนที่ระบบควบคุมจะ  
 สามารถบังคับให้โคบอลต์เคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพง เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้  
 จึงได้เพิ่มการทำนายเข้าไปในระบบควบคุมแบบควบคุมจากทิศทางของแรง โดยการสร้าง  
 กำแพงขึ้นก่อนแนวกำแพงที่ต้องการเป็นระยะ  $d_p$  ตามลักษณะดังรูปที่ 6.10 ระยะทางที่สร้าง  
 กำแพงขึ้นก่อนแนวกำแพงที่ต้องการ จะคำนวณได้จากความเร็วของโคบอลต์  $u$  และเวลาหน่วง  
 $t_d$  ตามสมการ

$$d_p = u \cdot t_d \quad (6.7)$$

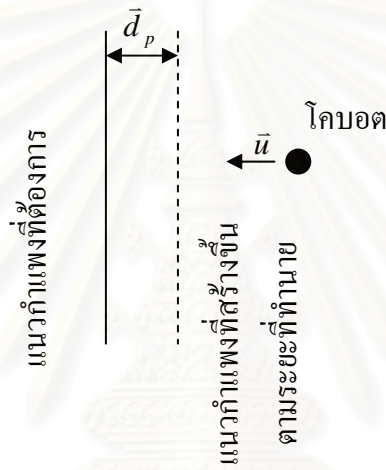


รูปที่ 6.8 แผนภาพแสดงการควบคุมการเคลื่อนที่ของโคบอลต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.9 แสดงองค์ประกอบของแนวที่กระทำกับแนวกำแพง



รูปที่ 6.10 การสร้างกำแพงก่อนกำแพงที่ต้องการ

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

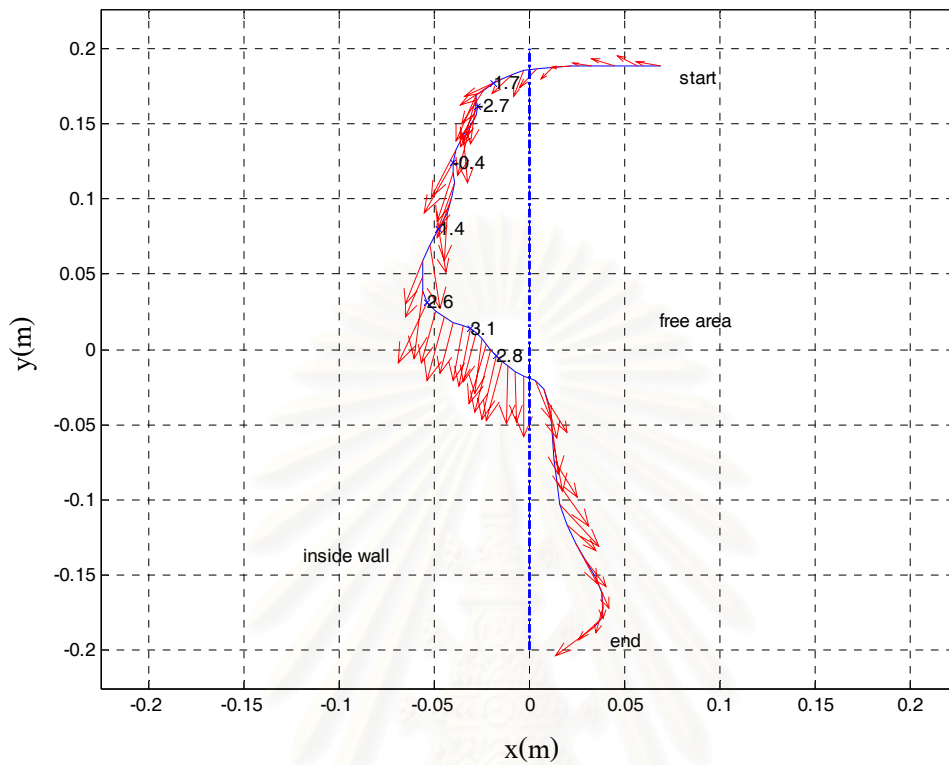
การทดสอบการทำงานของโคบอด จะแบ่งลักษณะการทดสอบเป็น 2 แบบหลัก ได้แก่ แบบไม่มีการควบคุมและแบบมีการควบคุม ในการทดลองที่ไม่มีการควบคุมจะเป็นการทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของโคบอด เช่น การเกิดเวลาหน่วง ผลของการอัดตัวได้ของลม ความผิดพลาดต่างๆของโคบอด และเพื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบการทำงานที่มีการควบคุม ส่วนการทดสอบการทำงานแบบมีการควบคุม จะเป็นการสร้างแนวกำแพงเสมือนที่โคบอดสามารถทำได้ อย่างไรก็ตามลำดับของผลการทดลองในบทนี้จะเรียงตามลำดับการทดลองที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากในระหว่างการทดลองได้มีการแก้ไขปรับปรุงวิธีการควบคุม และปรับวิธีการทดลองเพื่อหาสาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

#### 7.1 การทดสอบการทำงานของโคบอดด้วยระบบควบคุมของยูนิทไซเคิลโคบอด

ในการทดสอบโคบอดครั้งแรก ระบบควบคุมที่ใช้จะนำมาจาก[2] ระบบควบคุมแบบนี้จะเป็นระบบควบคุมที่ใช้กับยูนิทไซเคิลโคบอดตามที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 6.6.1 ในการทดลองได้ทำการสร้างกำแพงเสมือนในแนว 90 องศาขึ้นเพื่อทดสอบ ผลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงในรูปที่ 7.1 ตามลำดับ เส้นทึบในรูปจะแสดงถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นของโคบอด ส่วนลูกศรจะแสดงแรงของผู้ใช้ที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจแรงทุก 1 ใน 100 วินาที. ขนาดและทิศของลูกศรจะแสดงขนาดและทิศของแรง และเส้นประจะแสดงแนวกำแพงที่ต้องการ บริเวณด้านล่างของกราฟแสดงของรูปภาพจะเป็นข้อมูลของแรงและความเร็วที่เกิดขึ้นในช่วงผลการทดลองที่นำมาแสดง ตัวเลขที่กำกับอยู่บนเส้นแสดงการเคลื่อนที่เป็นความชันของเส้นทางเดินที่โคบอดสร้างขึ้นในหน่วยเรเดียนที่วัดจากแกน x ตัวเลขแสดงความชันของเส้นทางเดินจะแสดงทุกๆ 1 ใน 20 วินาที

จากผลการทดลองจะพบว่า โคบอดไม่สามารถสร้างแนวกำแพงเสมือนได้สมบูรณ์ในทุกแนวแกน เนื่องจากระบบควบคุมแบบนี้ออกแบบขึ้นเพื่อใช้กับยูนิทไซเคิลโคบอดที่สร้างอัตราทดจากการเคลื่อนที่ของล้อ ความเร็วที่ใช้ในการหมุนล้อ จะเป็นฟังก์ชันของ ค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ( $\Delta R$ ), ทิศทางของโคบอด ( $\Delta T$ ) และความเร็ว  $u$  ความแตกต่างระหว่างข้อต่อโคโบติกแบบล้อและของไหลก็คือ ข้อต่อโคโบติกแบบของไหลในงานวิจัยนี้ใช้ระบบนิวเมติกซึ่งลมอัดในระบบสามารถยุบตัวได้เทียบได้กับการใช้ล้อที่เสียดรูปได้ง่ายมาใช้เป็นล้อของโคบอด ทำให้ค่า  $\Delta R$  และ  $\Delta T$  แกว่งอยู่ในช่วงกว้างมากเกินกว่าที่ระบบควบคุมของยูนิทไซเคิลโคบอด สามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสาเหตุที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ข้อต่อโคโบติกไม่สามารถสร้างกำแพงได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงระหว่างอัตราทด 1:0 ถึง 1:1 และในช่วง 1:1 ถึง 0:1 ซึ่งระบบควบคุมของยูนิท

ไซเคิลโคบอตไม่ได้ออกแบบให้รองรับกับข้อผิดพลาดนี้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในการทดลองต่อไป



Minimum force = 4.534 N	Minimum velocity = 0.192 m/s
Maximum force = 21.460 N	Maximum velocity = 0.381 m/s
Average force = 13.734 N	Average velocity = 0.295 m/s

รูปที่ 7.1 แสดงผลของระบบควบคุมแบบยูนิตไซเคิลโคบอต

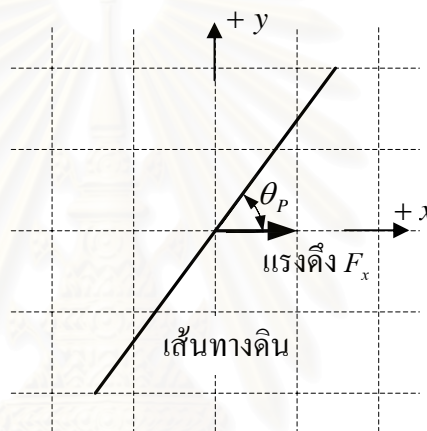
### 7.2 การทดสอบการสร้างเส้นทางเดินของโคบอต

จากข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อนำระบบควบคุมของยูนิตไซเคิลโคบอตมาใช้ในการทดลองที่แล้ว ในการทดลองนี้จะทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการสร้างเส้นทางเดินของโคบอต ด้วยการสร้างเส้นทางเดินในแนวต่างๆ โดยโคบอตจะทำหน้าที่ในการสร้างเส้นทางเดินตามแนวที่ระบุเพียงอย่างเดียว และไม่มีการสร้างเส้นทางเดินเพื่อบังคับให้การเคลื่อนที่กลับสู่แนวกำแพงที่ต้องการ การเคลื่อนที่จะวัดจากเอนโคดเดอร์ และแรงต้านการเคลื่อนที่จะวัดจากอุปกรณ์วัดแรงที่ติดตั้งที่ handle ของโคบอต

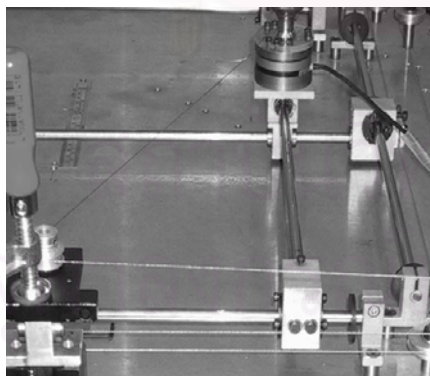
### 7.2.1 การสร้างเส้นทางเดินในแนวต่างๆขณะดึงด้วยแรงคงที่

การทดลองนี้จะทดลองสร้างเส้นทางเดินในแนว  $\theta_p$  เท่ากับ 45, 50, 60, 70, 80, 85, 87 และ 90 องศา เพื่อดูการตอบสนองต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นที่ handle ของโคบอต เมื่อเส้นทางเดินอยู่ในแนวต่างๆ

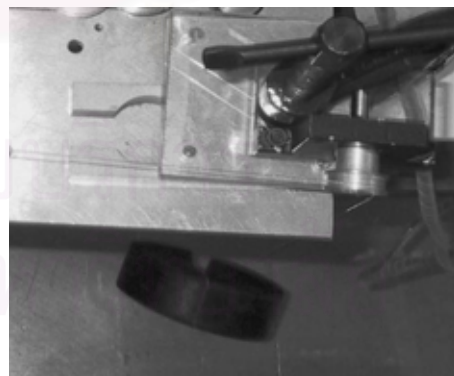
ในการทดลอง handle ของโคบอตจะถูกดึงด้วยมวล 2 kg ที่ทำให้เกิดแรง  $F_x$  ในทิศ +x ตามแผนผังในรูป 7.2 a) และแสดงการดึงด้วยมวลผ่านเคเบิลตามรูป 7.2 b) และ 7.2 c) เริ่มการทดลองเมื่อ handle อยู่ในตำแหน่ง (0,0) ใช้เอนโคเดอร์ในการวัดตำแหน่งมาคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ และบันทึกข้อมูลทั้งหมดลงในคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาเขียนกราฟในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.2 a) แผนผังการทดลองที่ 1 เปลี่ยน  $\theta_p$  จาก 45 ถึง 90 แรง  $F_x$  คงที่



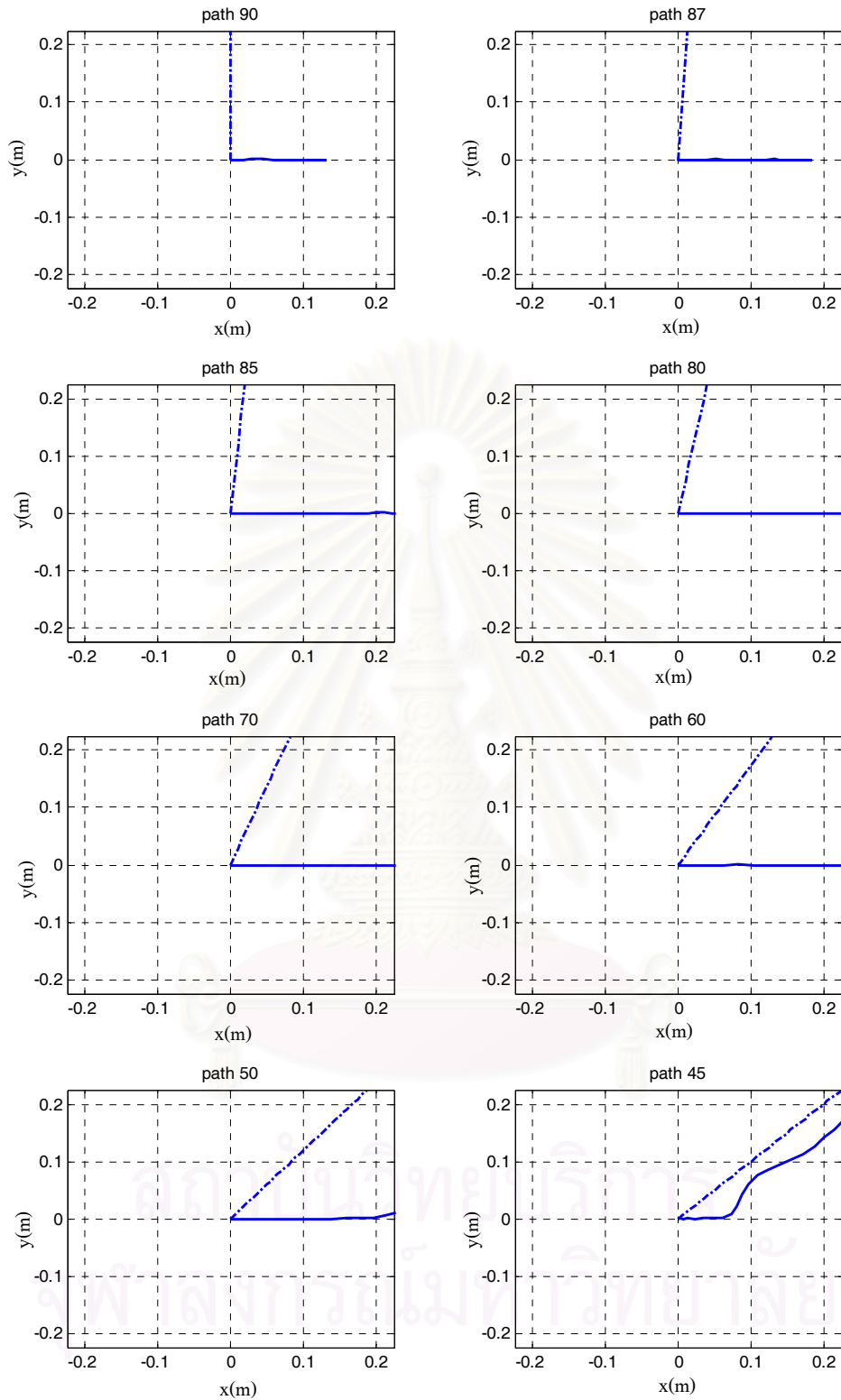
รูปที่ 7.2 b) การดึง handle ด้วยสายเคเบิล



รูปที่ 7.2 c) ตั้มน้ำหนักที่ใช้ดึงสายเคเบิล

ผลการทดสอบในรูปที่ 7.3 แสดงผลของการสร้างเส้นทางเดินทั้งหมด 8 การทดลอง โดยระบุงของสาขาของแนวเส้นทางเดินที่วัดจากแกน x ไว้บริเวณด้านบนของกราฟ





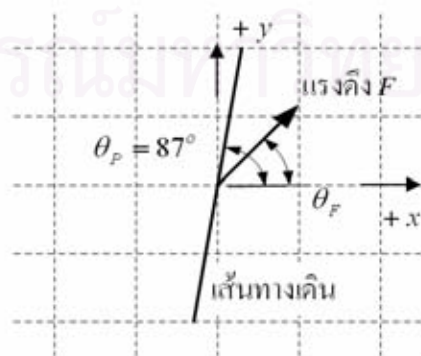
รูปที่ 7.3 แสดงผลการตอบสนองของเส้นทางเดินในแนวต่างๆ ต่อแรงขนาด 2 ก.ก. ในทิศทาง  $+x$  แนวกำแพงที่มีการตอบสนองได้แก่ 90, 87, 50, และ 45 โดยในแนว 90 และ 45 มีการตอบสนองจะเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการอัดตัวได้ของลมเพียงอย่างเดียว

แนวการเคลื่อนที่จริงที่เกิดขึ้นแสดงด้วยเส้นทึบ และเส้นประเป็นแนวเส้นทางเดินที่กำหนด ในรูปแรกเส้นทางจะถูกสร้างในแนว 90 องศา หรือในแนวแกน  $y$  เมื่อปล่อยตุ้มน้ำหนัก โคมบอตจะถูกดึงเคลื่อนที่ตามแนวแรงออกจากแนวเส้นทางเดิน 90 องศา ได้ระยะหนึ่งแล้วจึงหยุด เป็นผลจากลมในกระบอกสูบสามารถยุบตัวได้ สำหรับแนวเส้นทางเดินที่ 87 องศา การเคลื่อนที่ที่จะเคลื่อนที่ตามทิศแรงดึง และเคลื่อนที่ได้ระยะทางมากขึ้น ในเส้นทางเดินตั้งแต่ 85 ถึง 60 องศา โคมบอตจะเคลื่อนที่ตามแรงดึงได้จนสุดขอบเขตพื้นที่การทำงานของโคมบอต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโคมบอตไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินในช่วงนี้ได้เมื่อรับแรงในแนวแกน  $x$  การสร้างเส้นทางเดินจะมีผลตอบสนองให้เห็นอีกครั้งที่แนว 50 องศา คือเมื่อใช้ตุ้มน้ำหนักดึงในแนวแกน  $+x$  จะส่งผลให้โคมบอตจะถูกดึงไปในทิศ  $+y$  ได้เล็กน้อย ในกำแพงแนว 45 องศา โคมบอตจะถูกดึงไปในทิศ  $+y$  ได้จนสุดพื้นที่การทำงาน ถึงแม้ว่าจะมีผลจากการอัดของลมในระบบ ที่ทำให้ระยะเริ่มเคลื่อนที่ที่โคมบอตจะถูกดึงตามแนว  $+x$  เพียงอย่างเดียว

จากผลการทดลองที่ได้มานี้ แสดงให้เห็นว่าโคมบอตไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินได้ทุกแนวเส้นทางเดิน ซึ่งส่งผลต่อการสร้างกำแพงเสมือนมีความผิดพลาดเกิดขึ้น แรงด้านที่เกิดขึ้น จะมีค่าสูงสุดที่เส้นทางเดิน 90 และ 45 องศาและมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมของเส้นทางเดินมีค่าออกห่างจากแนว 90 และ 45 องศา นอกจากนี้ในเส้นทางเดินที่ 0, 135, 180 และใกล้เคียงจะมีผลตอบสนองเช่นเดียวกับเส้นทางเดินในแนว 90 และ 45 องศา เนื่องจากการไหลมีลักษณะเช่นเดียวกัน ซึ่งได้ทำการทดลองแล้ว

### 7.2.2 การสร้างเส้นทางเดินในแนว 87 องศาและดึงด้วยแรงในแนวต่างๆ

จากการทดลองในหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่าโคมบอตสามารถสร้างเส้นทางเดินในแนว 0, 45 และ 90 องศา ได้อย่างสมบูรณ์ถึงแม้จะเกิดการยุบตัวเนื่องจากคุณสมบัติในการอัดตัวได้ของลมในระบบ แต่เส้นทางเดินระหว่าง 0-45 โคมบอตจะไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินได้ตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามในแนวเส้นทางที่ใกล้เคียง 45 และ 90 องศา มีการตอบสนองเกิดขึ้น



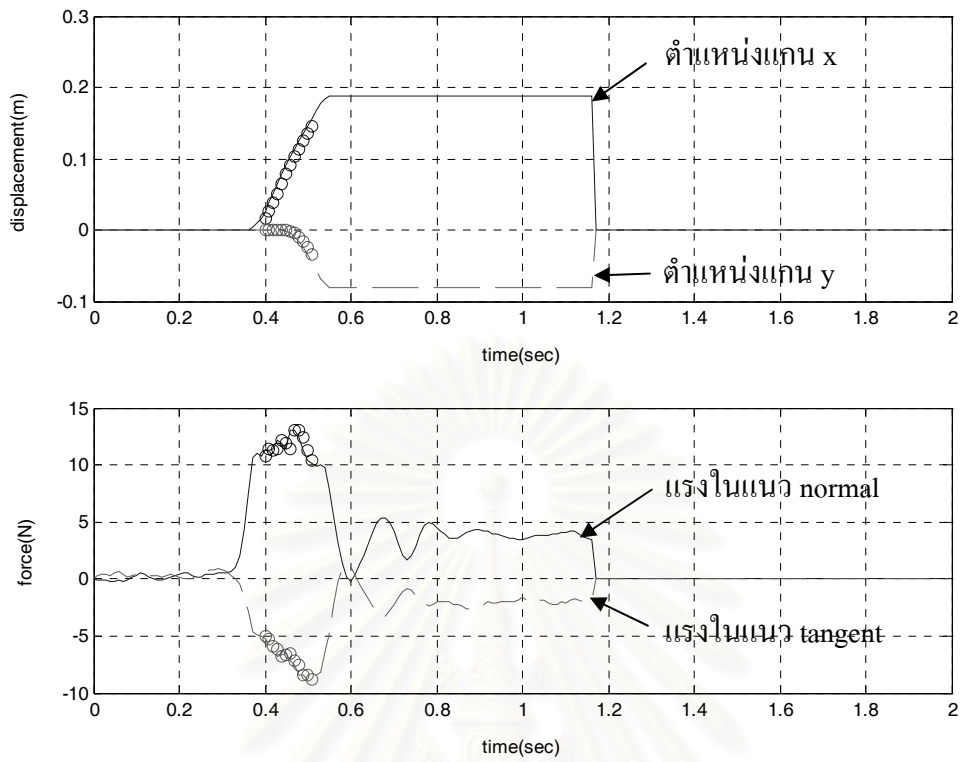
รูปที่ 7.4 แผนผังการทดลองที่ 2  $\theta_p = 87$  องศา เปลี่ยนแนวแรง  $F_x$

ในการทดลองนี้จะเลือกสร้างเส้นทางเดินแนวใกล้เคียงกับแนว 45 หรือ 90 องศาขึ้น เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น เส้นทางเดินที่นำมาทดลองคือเส้นทางเดินในแนว  $\theta_p$  เท่ากับ 87 องศา เนื่องจากเส้นทางเดินในแนว 87 องศา เป็นเส้นทางหนึ่งที่มีผลตอบสนองในการเคลื่อนที่

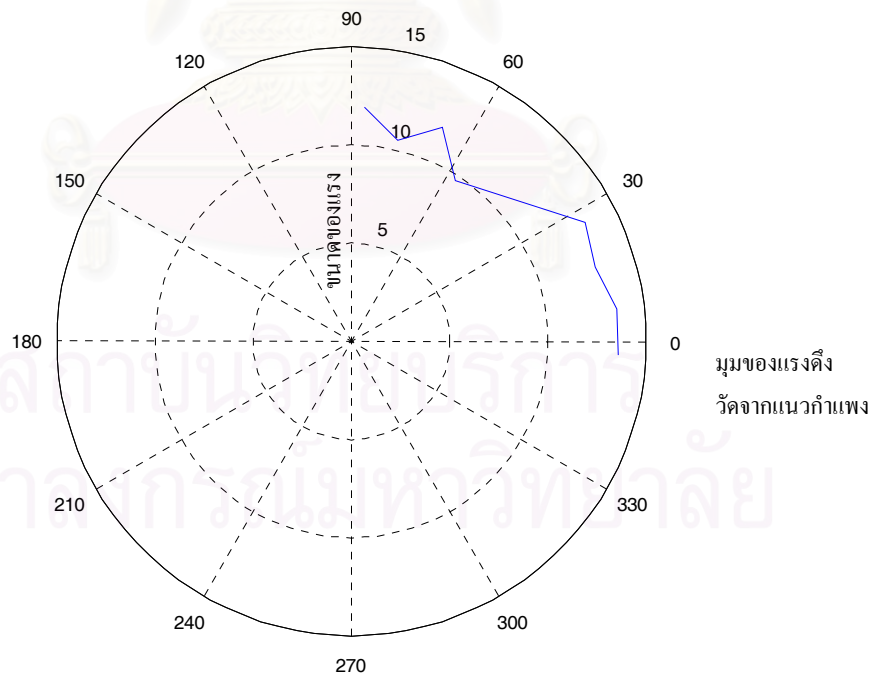
ในการทดลอง โคบอตจะสร้างเส้นทางเดินในแนว 87 องศาขึ้น เริ่มจากการตั้งตำแหน่ง handle ที่จุด (0,0) แล้วจึงดึงให้เคลื่อนที่ด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 2 kg ในทิศทาง  $\theta_F$  เท่ากับ -0, -10, -20, -30, -60, -70, -80 และ -90 องศา ตามแผนผังในรูปที่ 7.4 แรงดึงในแนว -40 และ 50 องศา ถูกข้ามไปเนื่องจากไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ ระหว่างการเคลื่อนที่จะทำการวัดแรงต้านที่เกิดขึ้นที่ด้ามจับของโคบอตด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง แรงที่วัดได้จะอยู่ในโคออดิเนต x-y และผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกซึ่งอาจทำให้ขนาดของแรงที่ได้มีขนาดลดลงเล็กน้อย แรงที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกแปลงให้อยู่ในแนว normal และ tangent ของเส้นทางเดินแรงในแนว normal และ tangent จะนำมาหาขนาดของแรงเฉลี่ยในช่วงที่โคบอตเกิดการเคลื่อนที่ดังในรูป 7.5 เป็นตัวอย่างการทดลองที่แนวแรง 80 องศา กราฟทางด้านบนจะเป็นการเคลื่อนที่ในแกน x และ y ส่วนทางด้านล่างจะเป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนว normal และ tangent ของเส้นทางเดิน ส่วนของเส้นกราฟ คือ ส่วนที่โคบอตกำลังเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นส่วนที่นำมาพิจารณาหาค่าเฉลี่ยของแรง normal ขนาดของแรงเฉลี่ยของทุกๆการทดลอง จะนำมาวาดเป็นกราฟพิคัดเชิงขั้ว ในรูปที่ 7.6 โดยที่ค่าในแนวแกน r คือขนาดของแรงและแกน  $\theta$  คือ มุมของแรงที่วัดจากแนวเส้นทางเดิน

จากกราฟในรูปที่ 7.6 จะเห็นว่าเมื่อทิศทางของแรงกระทำในใกล้กับแนว normal ของเส้นทางเดินคือในแนว 0 ถึง 30 องศาโคบอตจะสร้างแรงต้านการเคลื่อนที่ได้ประมาณ 13-14 นิวตัน และลดลงจนขนาดของแรงอยู่ที่ประมาณ 10-12 นิวตัน ในแนวกำแพง 60 ถึง 90 องศา

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ถึงแม้การสร้างเส้นทางเดินของโคบอตในแนว 87 องศาจะเกิดความผิดพลาดขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางที่กำหนดไว้ แต่โคบอตยังคงสามารถสร้างแรงต้านแรงดึงได้ในระดับหนึ่ง สาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจจะมาจากการไหลบางส่วนเกิดไหลผิดพลาด แรงที่ได้น่าที่จะได้จากความเสียดทานของการไหลในออริฟิต ซึ่งจะได้ทำการวิเคราะห์ต่อไป



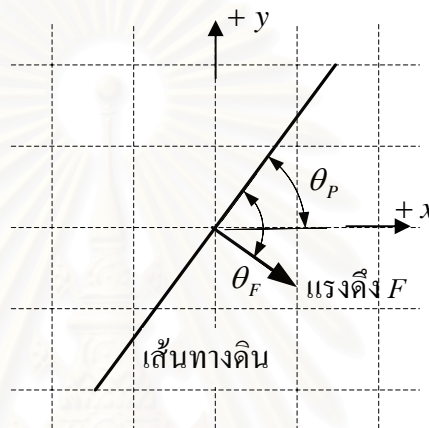
รูปที่ 7.5 ตัวอย่างแรงที่วัดได้ที่แนวแรง 80 องศา



รูปที่ 7.6 ขนาดของแรงต้านเมื่อสร้างกำแพงแนว 87 องศา

### 7.2.3 การสร้างเส้นทางเดินในแนวต่างๆองศาและดึงด้วยแรงในแนว normal

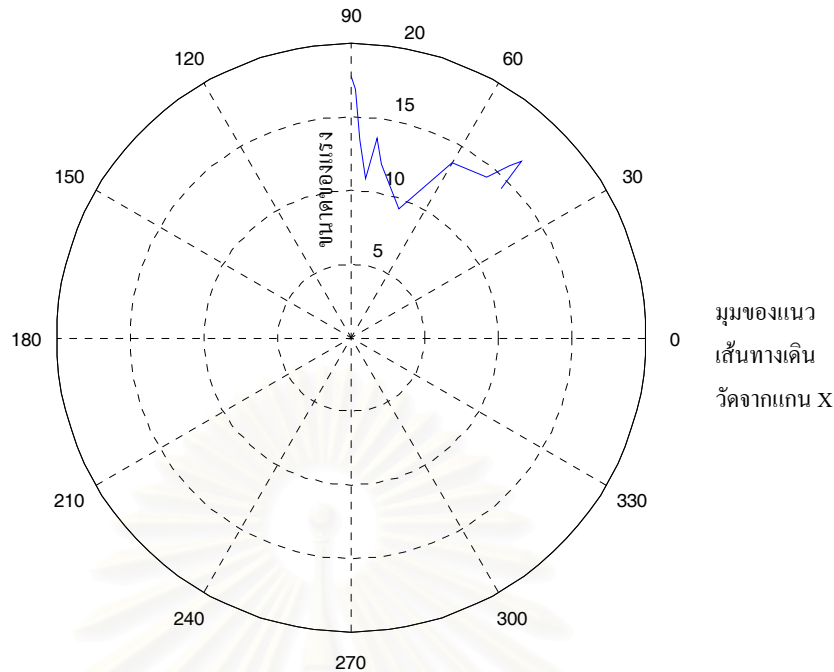
ในการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบแรงต้านในแนว normal ของแนวเส้นทางเดินต่างๆที่สร้างขึ้น ในการทดลองโคบอดจะสร้างเส้นทางเดินที่  $\theta_p$  เท่ากับ 45, 46, 47.5, 50, 60, 70, 80, 82.5, 85, 87.5, 89 และ 90 องศา และดึงด้วยแรงขนาด 2 kg ในแนว normal กับเส้นทางเดินตามแผนผังในรูปที่ 7.7 แรงที่วัดได้จากการทดลองจะอยู่ในโคออดิเนต x-y ของโคบอด จะถูกแปลงให้อยู่ในโคออดิเนต normal และ tangent และหาค่าเฉลี่ยด้วยวิธีเดียวกับการทดลองที่ 7.2.2 แล้วนำมาพล็อตกราฟในรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.7 แผนผังการทดลองที่ 3  $F_x$  normal กับเส้นทางเดินและเปลี่ยน  $\theta_p$

จากการทดลอง เส้นทางเดินใน 45 และ 90 องศา จะเป็นแนวที่ให้แรงต้านได้ดีที่สุด ขนาดของแรงต้านที่ได้จะอยู่ที่ประมาณ 18 นิวตัน และแรงต้านจะลดลงเมื่อแนวเส้นทางเดินอยู่ระหว่าง 45 ถึง 90 องศา โดยที่แนวโน้มของแรงต้านจะลดลงเมื่อเส้นทางเดินออกห่างจากแนว 45 และ 90 องศา แรงต้านน้อยที่สุดจะอยู่ที่ประมาณ 10 นิวตัน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในแนวเส้นทางเดิน 45 และ 90 องศา โคบอดสามารถสร้างแรงต้านได้เท่ากับแรงกระทำ (ขนาดของแรงต้านที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าแรงกระทำจากมวล 2 kg เล็กน้อยเนื่องแรงผ่านตัวกรองสัญญาณและความเสียดทานในระบบ) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 7.2.1 ที่แสดงว่าโคบอดสร้างเส้นทางเดินสองแนวนี้ได้อย่างสมบูรณ์ ในช่วงระหว่าง 45 ถึง 90 องศา แรงต้านก็จะลดลงจนกระทั่งที่แนวเส้นทางเดินช่วงตรงกลางระหว่าง 45 ถึง 90 องศา แรงต้านที่วัดได้มีขนาด 10 นิวตัน ซึ่งเป็นแรงต้านของโครงสร้างทางกลที่เท่ากับการทดลองในครั้งที่สองเมื่อดึงด้วยแรงแนวใกล้เคียงกับแนวเส้นทางเดิน



รูปที่ 7.8 แสดงแรงด้านในแนว normal ของกำแพงในแนวต่างๆ

### 7.3 การทดลองสร้างกำแพงให้โคบอต (Unilateral Constraint)

จากการทดลองที่ 7.2 จะสรุปได้ว่าโคบอตจะสร้างเส้นทางเดินในมุมที่ใกล้เคียงกับ  $\pm 0$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  และ  $\pm 180$  ได้อย่างสมบูรณ์เส้นทางเดินที่สร้างได้เหล่านี้สามารถนำมาสร้างแนวกำแพงในบางรูปแบบได้ ในการทดลอง 7.3 จะเป็นการทดลองสร้างกำแพงด้วยระบบควบคุมตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.6.2 การสร้างกำแพงจะสร้างกำแพง 3 รูปแบบ ได้แก่

- กำแพงในแนว  $x=0$  หรือกำแพงในแนว 90 องศา ฟังก์ชันของกำแพงจะเป็นบริเวณที่โคบอตสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระ
- กำแพงในแนว 45 องศา การเคลื่อนที่อิสระจะอยู่ในบริเวณที่  $y < x$
- แนวกำแพงเป็นรูปแปดเหลี่ยม บริเวณตรงกลางจะเป็นบริเวณที่เคลื่อนที่ได้อิสระ

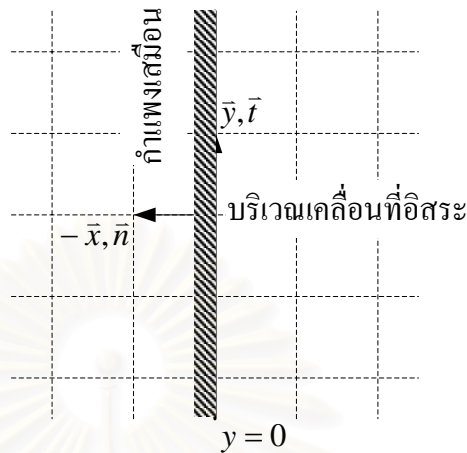
ในการทดลองของแต่ละแนวกำแพงจะมีการทดลองย่อยอีก 3 การทดลอง คือ การทดลองในกรณีที่มีความดันในระบบเท่ากับความดันบรรยากาศ ความดันในระบบประมาณ 4 บาร์และในกรณีที่ระบบมีความดัน 4 บาร์พร้อมกับระบบควบคุมแบบมีการทำนายล่วงหน้า

#### 7.3.1 กำแพงเสมือนในแนว 90 องศา (Unilateral Constraint)

ในกรณีกำแพงเสมือนอยู่ในแนว  $x=0$  เวกเตอร์ tangent ของกำแพงจะอยู่ในทิศทางตามแนวแกน  $+y$  และเวกเตอร์ normal จะอยู่ในทิศ  $-x$  ตามรูปที่ 7.9 ผลการทดลองทั้งสามผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 7.10, 7.11, และ 7.12 รูปที่ 7.10 จะเป็นการ



ทดลองเมื่อความดันในระบบอยู่ที่ความดันบรรยากาศ จะสังเกตเห็นว่าเมื่อโคบอตเริ่มเคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพง



รูปที่ 7.9 แสดงแนวกำแพงที่  $x = 0$

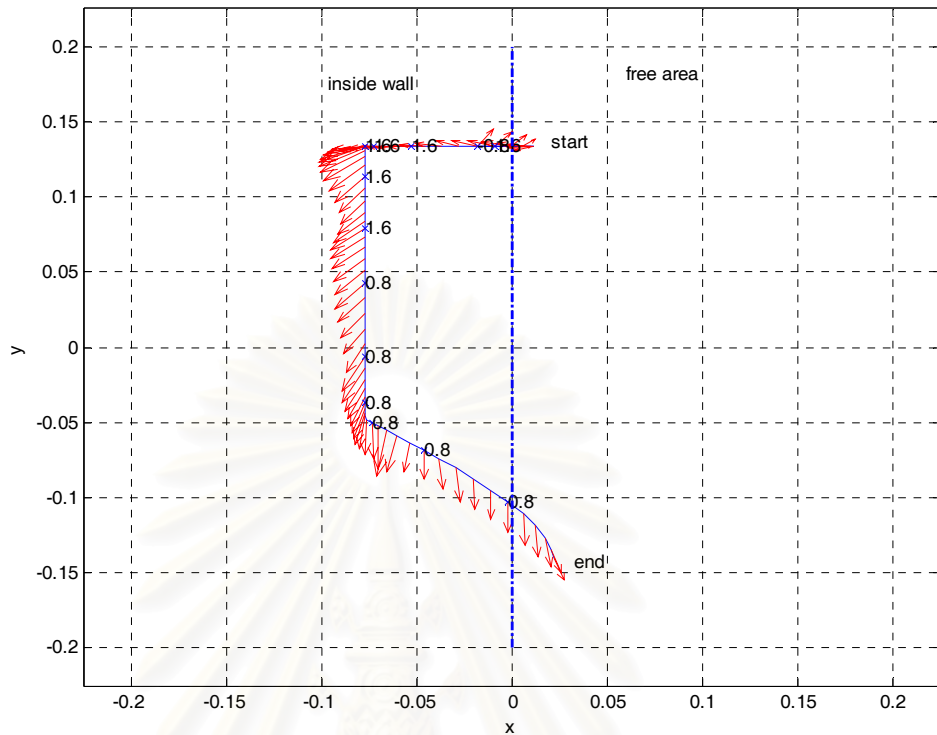
โคบอตจะเริ่มสร้างเส้นทางเดินที่มีมุม  $\pi/2$  เรเดียน แต่ผู้ใช้ยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพงเข้าไปได้อีกประมาณ 0.075 เมตร จากนั้นโคบอตจะสร้างเส้นทางเคลื่อนที่มุม 0.8 เรเดียน ตามการเปลี่ยนของตัวเลขในรูป เพื่อบังคับให้ผู้ใช้เคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพงแต่จะยังไม่เกิดผลใดจนกระทั่งลมอัดในระบบมีความดันสูงพอ ความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมาจากความสามารถในการอัดตัวได้ของลมในระบบและความล่าช้าในการเปลี่ยนเข้าสู่การควบคุมแบบเดินตามเส้นของโคบอต ข้อมูลต่างๆที่บันทึกได้ขณะทำการทดลอง ได้แก่ ขนาดของแรงสูงสุด, แรงต่ำที่สุด, แรงเฉลี่ย, ความเร็วสูงสุด, ความเร็วต่ำสุด และความเร็วเฉลี่ย ตลอดช่วงการเคลื่อนที่จะนำมาแสดงทางด้านล่างของกราฟแสดงการเคลื่อนที่

ในรูปที่ 7.11 จะเป็นผลของการทดลองเมื่อลมอัดในระบบอยู่ที่ 4 บาร์จะเห็นว่าโคบอตสามารถลดระยะทางการเคลื่อนที่ทะลุแนวกำแพงให้น้อยลงได้ หรือกำแพงมีความแข็งแรงมากขึ้น และการตอบสนองในการสร้างเส้นทางเดินเพื่อบังคับการเคลื่อนที่ให้ออกจากแนวกำแพงจะเร็วขึ้น ตามตัวเลขบอกความชันของแนวกำแพงที่กำกับไว้บนเส้นแสดงการเคลื่อนที่ ส่วนในรูปที่ 7.12 จะเป็นการทดลองที่เพิ่มการทำนายการเคลื่อนที่เข้าสู่กำแพง กับการใช้ลมอัดในระบบที่ 4 บาร์การทำนายการชนกำแพงจะเป็นการชดเชยเวลาหน่วงของโคบอต โดยการวัดความเร็วของโคบอตและคำนวณระยะทางการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาหน่วง และสร้างกำแพงก่อนแนวกำแพงจริงตามระยะทางที่คำนวณได้จากผลคูณ

ของความเร็วกับเวลาหนึ่ง ตามที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 6.6.3 ซึ่งทำให้โอบต  
สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพงเข้าไปได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum force = 0.721 N

Minimum velocity = 0.0121 m/s

Maximum force = 15.139 N

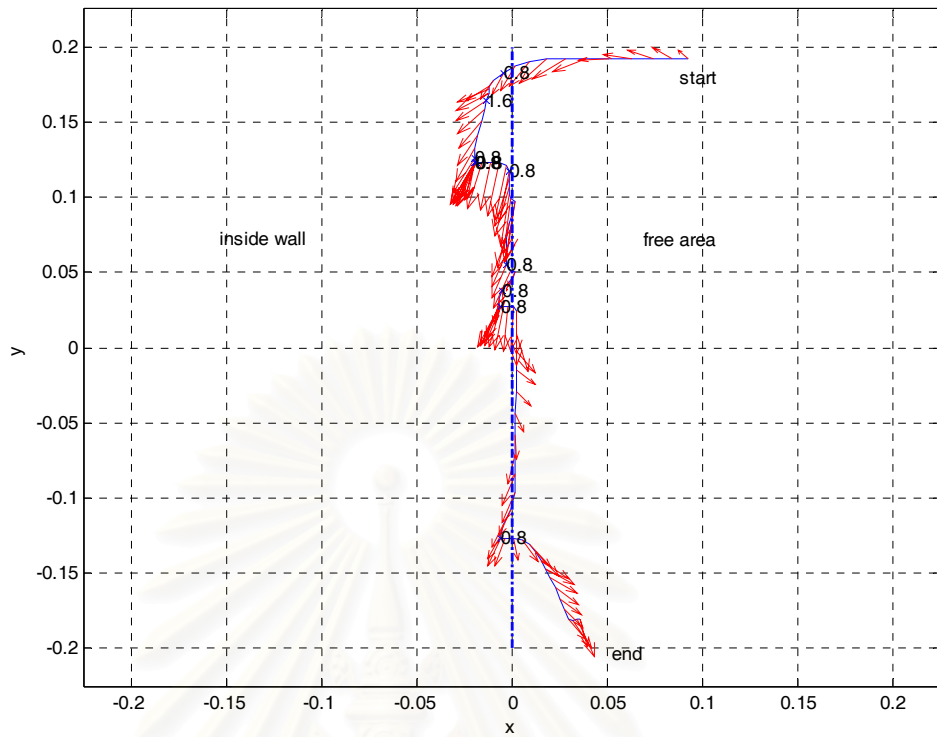
Maximum velocity = 0.285 m/s

Average force = 9.487 N

Average velocity = 0.184 m/s

รูปที่ 7.10 ผลการสร้างกำแพง 90 องศาที่ความดัน 1 บาร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum force = 0.936 N

Minimum velocity = 0.005 m/s

Maximum force = 14.826 N

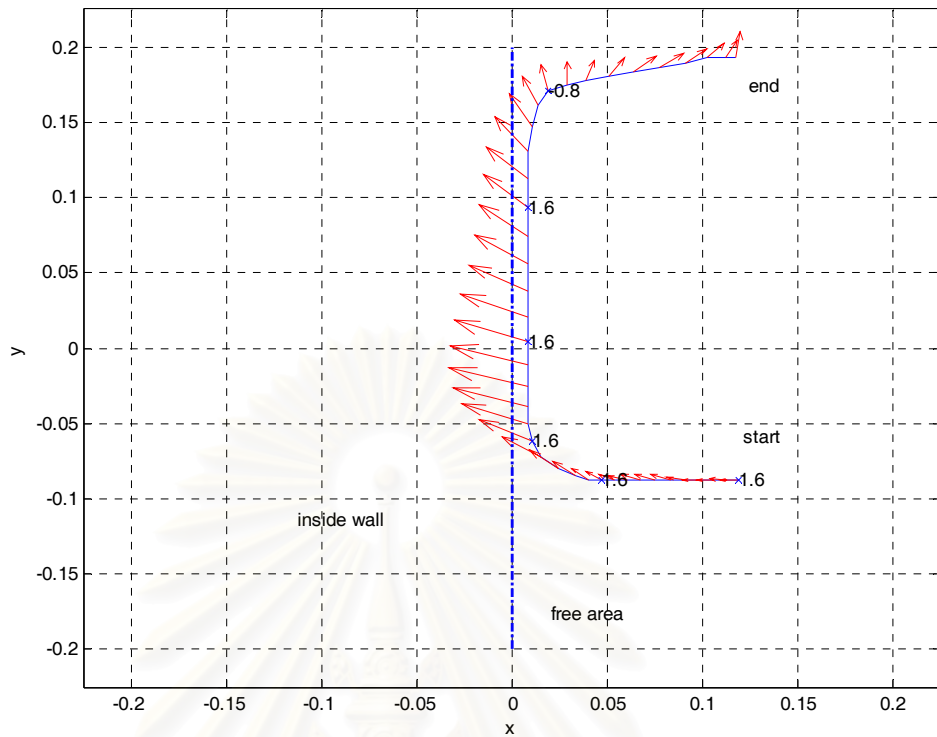
Maximum velocity = 0.262 m/s

Average force = 8.819 N

Average velocity = 0.128 m/s

รูปที่ 7.11 แสดงผลการสร้างกำแพง 90 องศา ที่ความดัน 4 บาร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum force = 5.604 N

Minimum velocity = 0.055 m/s

Maximum force = 26.128 N

Maximum velocity = 0.518 m/s

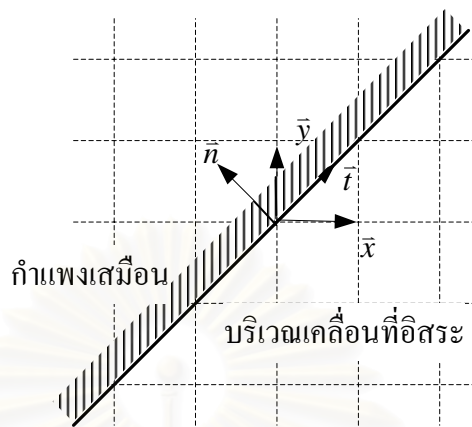
Average force = 12.903 N

Average velocity = 0.302 m/s

รูปที่ 7.12 แสดงผลการสร้างกำแพง 90 องศา ที่ความดัน 4 บาร์และมีการ  
ทำนายการชน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 7.3.2 กำแพงเสมือนในแนว 45 องศา (Unilateral Constraint)



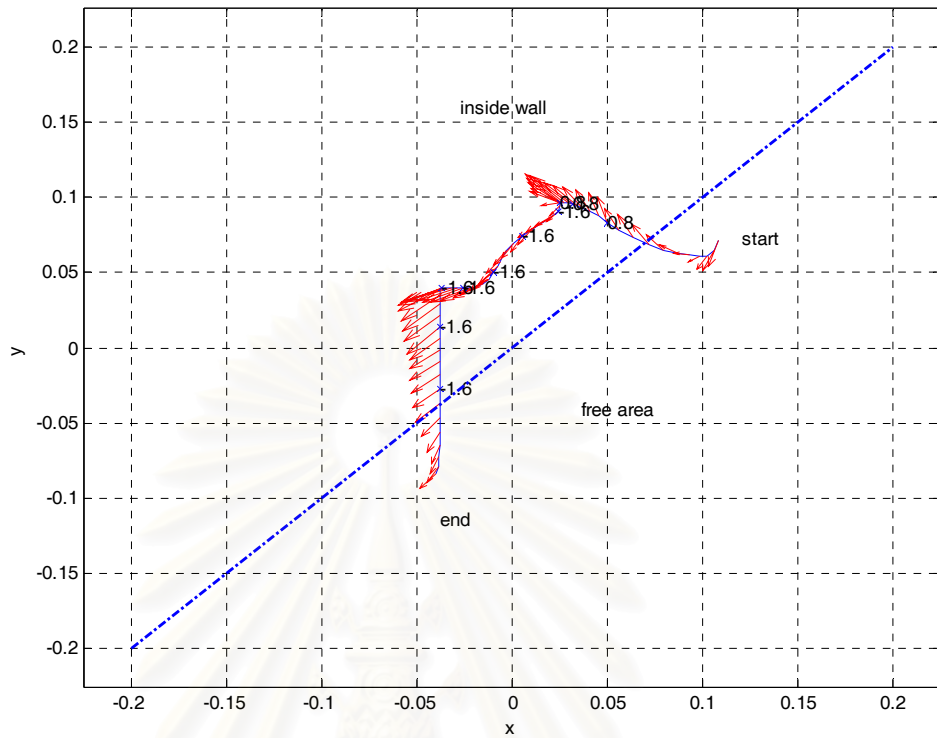
รูปที่ 7.13 แสดงแนวกำแพง 45 องศา

สำหรับกำแพงในแนว 45 องศา จะมีเวกเตอร์ tangent เท่ากับ  $[\cos(\pi/4) \sin(\pi/4) 0]$  และเวกเตอร์ normal เท่ากับ  $[-\sin(\pi/4) \cos(\pi/4) 0]$  ตามรูปที่ 7.13 ผลการทดลองที่ความดัน 1 บาร์, 4 บาร์ และการทดลองที่ความดัน 4 บาร์ พร้อมด้วยการทำนายการเข้าชนกำแพง จะแสดงในรูปที่ 7.14, 7.15 และ 7.16 ลำดับ

การทดลองที่ความดันในระบบเป็น 1 บาร์จะมีแนวโน้มผลการทดลองเช่นเดียวกับผลของกำแพง 90 องศา คือ โคบอลต์จะมีการตอบสนองต่อการสร้างแนวกำแพงช้าเนื่องจากการอัดตัวของลมในระบบ และการตอบสนองจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มความดันในระบบเป็น 4 บาร์ และเมื่อเพิ่มการทำนายการเข้าชนกำแพงก็สามารถทำให้โคบอลต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกำแพงเข้าไปได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





Minimum force = 3.71 N

Minimum velocity = 0.666 m/s

Maximum force = 12.883 N

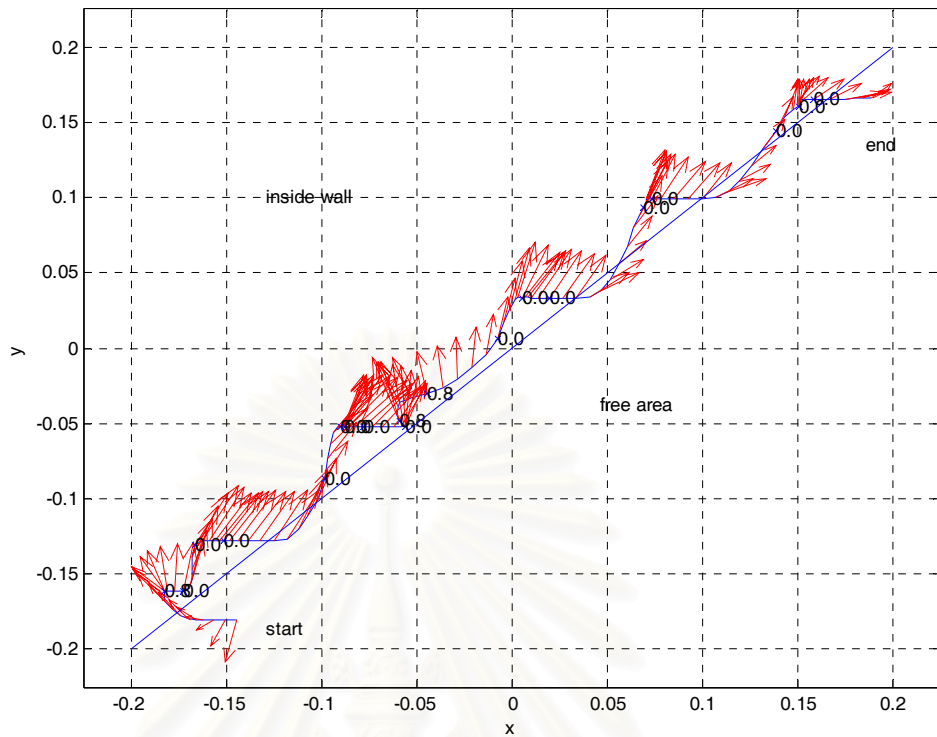
Maximum velocity = 0.249 m/s

Average force = 8.579 N

Average velocity = 0.139 m/s

รูปที่ 7.14 แสดงผลการสร้างกำแพง 45 องศา ที่ความดัน 1 บาร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum force = 4.975 N

Minimum velocity = 0.051 m/s

Maximum force = 19.62 N

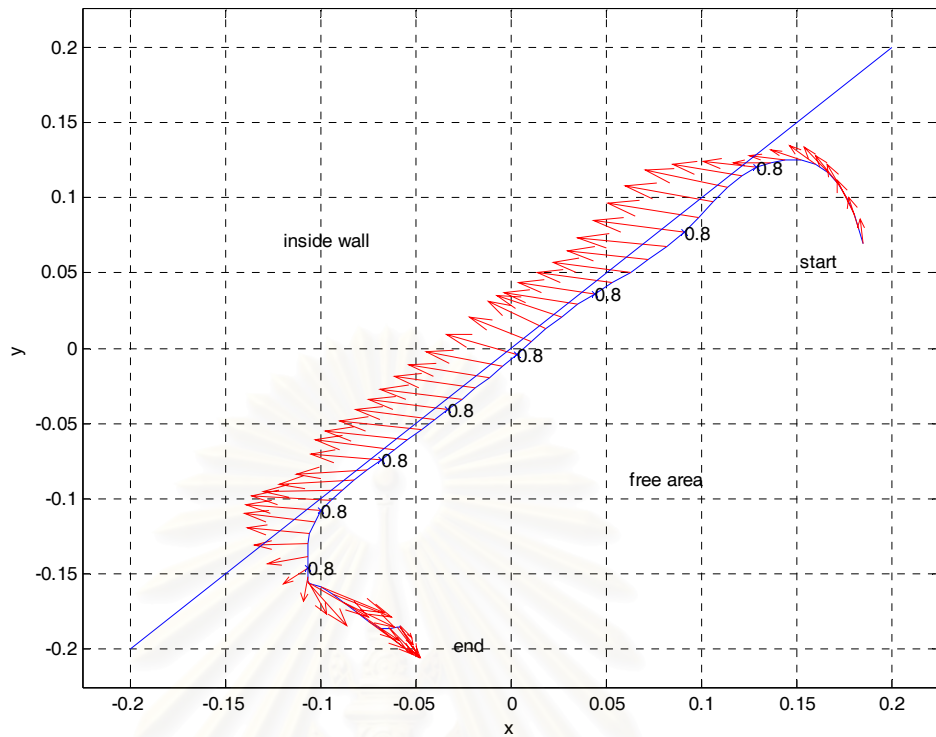
Maximum velocity = 0.256 m/s

Average force = 14.018 N

Average velocity = 0.162 m/s

รูปที่ 7.15 แสดงผลการสร้างกำแพง 45 องศา ที่ความดัน 4 บาร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum force = 2.159 N

Minimum velocity = 0.006 m/s

Maximum force = 18.015 N

Maximum velocity = 0.394 m/s

Average force = 11.255 N

Average velocity = 0.231 m/s

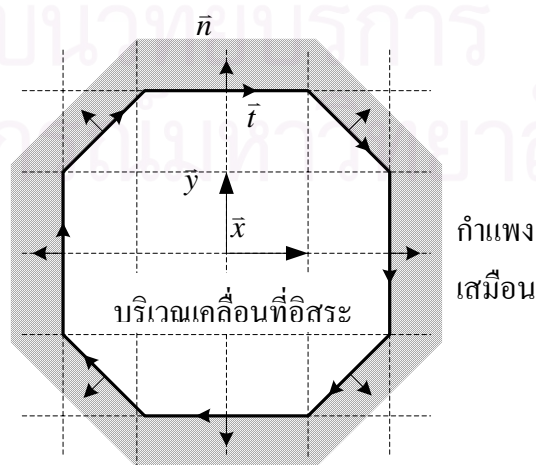
รูปที่ 7.16 แสดงผลการสร้างกำแพง 45 องศา ที่ความดัน 4 บาร์และมีการ  
ทำนายการชน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 7.3.3 กำแพงเสมือนรูปแปดเหลี่ยม (Unilateral Constraint)

ในการทดลองนี้จะเป็นการสร้างแนวกำแพงเสมือนเพื่อจำกัดการเคลื่อนที่ของโคบอลภายในวงกลมบริเวณกลางพื้นที่การทำงาน ด้วยการสร้างกำแพงเสมือนแปดเหลี่ยมในรูปที่ 7.17 ที่เกิดขึ้นจากการนำกำแพงในแนว  $\pm 0$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  และ  $\pm 180$  องศา มาต่อเข้าด้วยกัน ขนาดและรูปร่างของรูปแปดเหลี่ยมจะถูกกำหนดด้วยตัวแปร  $c$  ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ 0.075 เมตร ในกรณีที่ใช้ระบบควบคุมแบบมีการทำนายการชนล่วงหน้า ผลคูณของความเร็วกับเวลาหน่วงจะถูกหักออกค่าจากค่าของ  $c$  นั่นคือกรอบแปดเหลี่ยมจะหดเข้ามาเพื่อเป็นการสร้างกำแพงล่วงหน้า คุณสมบัติของแนวกำแพงจะแสดงในตารางที่ 7.1 เวกเตอร์ normal และเวกเตอร์ tangent ที่อธิบายลักษณะกำแพง จะอยู่ในคอลัมน์ที่ 2 และคอลัมน์ที่ 3 จะแสดงเงื่อนงำที่โปรแกรมจะตัดสินใจโคบอลเคลื่อนที่เข้าชนกำแพง

ในรูปที่ 7.18 จะแสดงผลการทดลองเมื่อลมในระบบมีความดัน 1 บาร์ซึ่งจะเห็นว่าแนวกำแพงที่สร้างได้ขยายออกจากแนวกำแพงจริงตามเส้นประ เนื่องจากการยุบตัวของลมในระบบ ถึงแม้ว่าตัวควบคุมจะพยายามสร้างเส้นทางเดินบังคับให้โคบอลกลับเข้าสู่แนวกำแพงที่ถูกต้อง ในรูปถัดมาคือรูปที่ 7.19 ลมในระบบจะถูกอัดเพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ความดัน 4 บาร์ซึ่งทำให้ลมในระบบมีการอัดตัวได้น้อยลง โคบอลจึงสามารถสร้างกำแพงได้ถูกต้องมากขึ้น จากนั้นในรูปที่ 7.20 เป็นการใช้ตัวควบคุมที่ทำนายการชนกำแพงล่วงหน้าทำให้ในบางโอกาส โคบอลสามารถสร้างกำแพงได้ก่อนแนวกำแพงจริงเพื่อไม่ให้ผู้ใช้เคลื่อนที่ทะลุผ่านแนวกำแพง แต่ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแนวกำแพง วาล์วควบคุมการไหลยังตอบสนองได้ช้าทำให้การสร้างกำแพงเกิดขึ้นทัน โคบอลจึงเคลื่อนที่ผ่านกำแพงเข้าไปได้เล็กน้อย จึงได้ทำการทดลองโดยเคลื่อนที่โคบอลให้ช้าลง ดูได้จากค่าความเร็วเฉลี่ยมีค่าน้อยลง ผลที่ได้จะแสดงในรูป 7.21 จะเห็นว่าโคบอลจะถูกควบคุมให้อยู่ภายในแปดเหลี่ยมได้อย่างสมบูรณ์

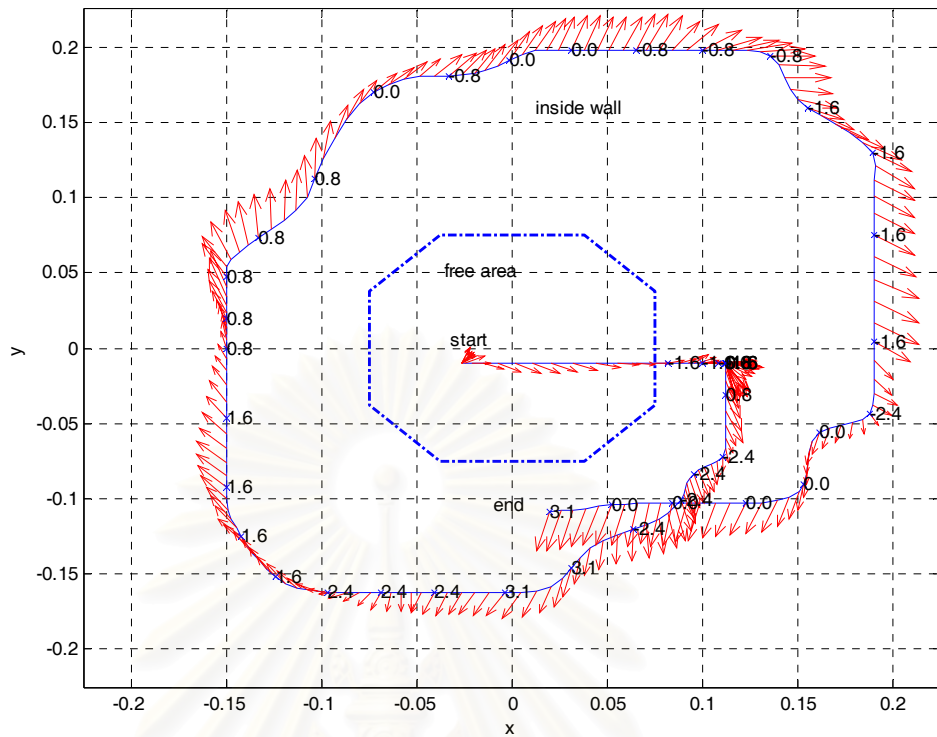


รูปที่ 7.17 แสดงส่วนประกอบของกำแพงแปดเหลี่ยม

แนวกำแพง	เวกเตอร์ normal และ tangent	เงื่อนไขของการสร้างกำแพงในโปรแกรม
1	$\vec{t}_1 = [1 \ 0 \ 0]$ $\vec{n}_1 = [0 \ 1 \ 0]$	$y > c$ $-0.5c > x > 0.5c$
2	$\vec{t}_2 = [\cos(\pi/4) \ -\sin(\pi/4) \ 0]$ $\vec{n}_2 = [\sin(\pi/4) \ \cos(\pi/4) \ 0]$	$y > -x + \frac{3}{2}c$ $(0.5c < x < c) \wedge (0.5c < y < c)$
3	$\vec{t}_3 = [0 \ -1 \ 0]$ $\vec{n}_3 = [1 \ 0 \ 0]$	$x > c$ $-0.5c > y > 0.5c$
4	$\vec{t}_4 = [-\cos(\pi/4) \ -\sin(\pi/4) \ 0]$ $\vec{n}_4 = [\sin(\pi/4) \ -\cos(\pi/4) \ 0]$	$y < x - \frac{3}{2}c$ $(0.5c < c < c) \wedge (-c < y < -0.5y)$
5	$\vec{t}_5 = [-1 \ 0 \ 0]$ $\vec{n}_5 = [0 \ -1 \ 0]$	$y > -c$ $-0.5c > x > 0.5c$
6	$\vec{t}_6 = [-\cos(\pi/4) \ \sin(\pi/4) \ 0]$ $\vec{n}_6 = [-\sin(\pi/4) \ -\cos(\pi/4) \ 0]$	$y < -x - \frac{3}{2}c$ $(-c < x < -0.5c) \wedge (-c < y < -0.5c)$
7	$\vec{t}_7 = [0 \ 1 \ 0]$ $\vec{n}_7 = [-1 \ 0 \ 0]$	$x > -c$ $-0.5c > y > 0.5c$
8	$\vec{t}_8 = [\cos(\pi/4) \ \sin(\pi/4) \ 0]$ $\vec{n}_8 = [-\sin(\pi/4) \ \cos(\pi/4) \ 0]$	$y > x + \frac{3}{2}c$ $(-c < x < -0.5c) \wedge (0.5c < y < c)$

ตารางที่ 7.1 แสดงเงื่อนไขการเข้าสู่กำแพงและเวกเตอร์ normal และ tangent ของกำแพง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum force = 4.070 N

Minimum velocity = 0 m/s

Maximum force = 14.153 N

Maximum velocity = 1.504 m/s

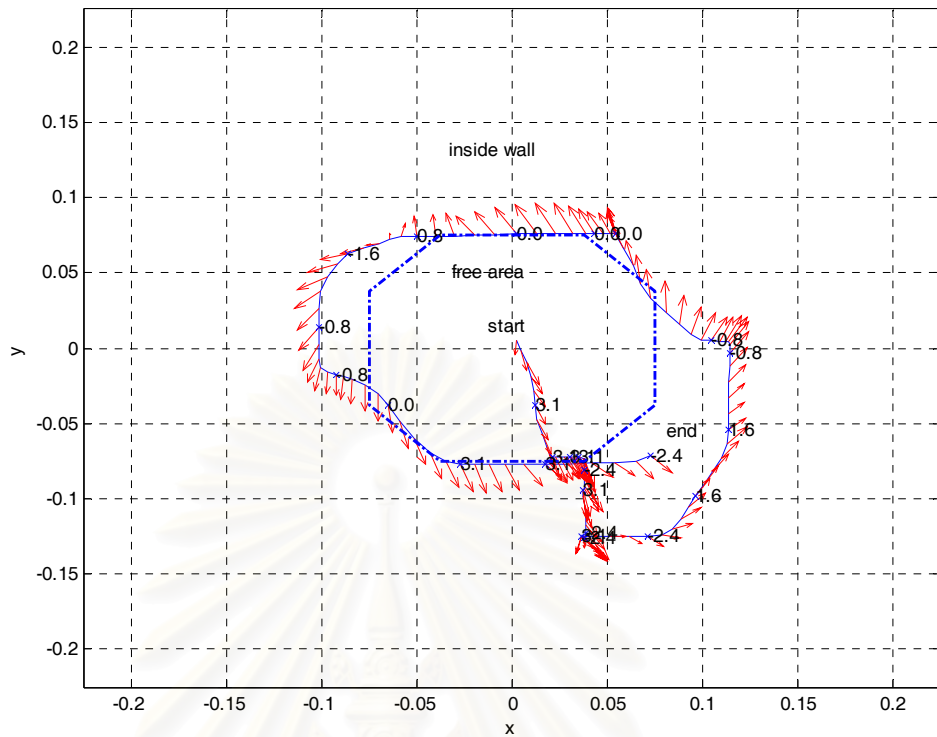
Average force = 9.212 N

Average velocity = 0.627 m/s

รูปที่ 7.18 แสดงผลการสร้างกำแพงเปิดเหลี่ยม ที่ความดัน 1 บาร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





Minimum force = 3.248 N

Minimum velocity = 0.0255

Maximum force = 18.527 N

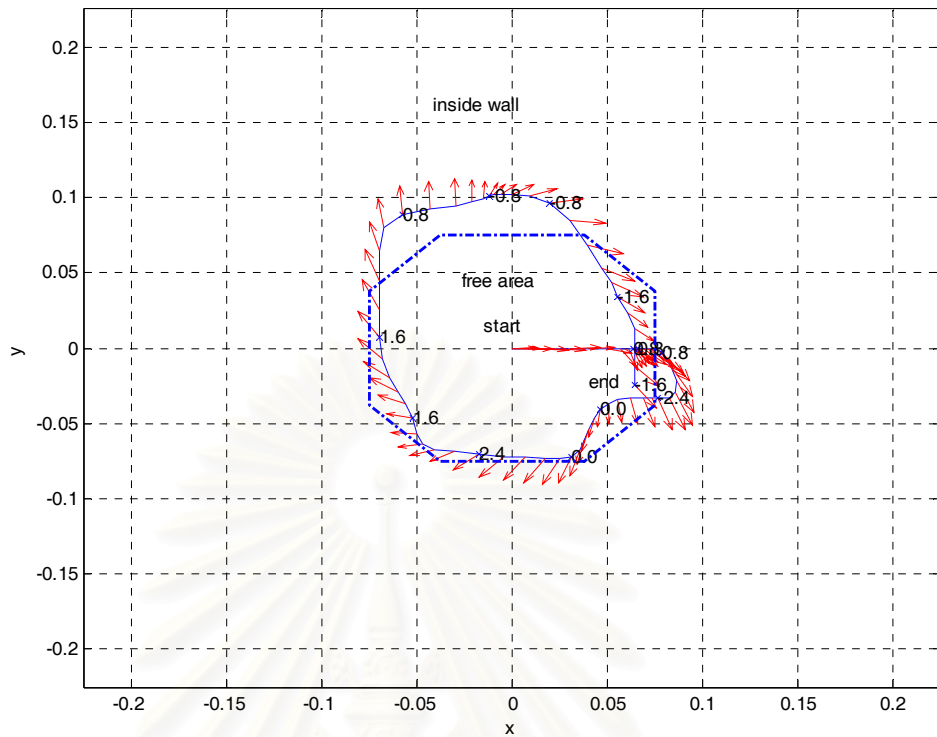
Maximum velocity = 1.857 m/s

Average force = 12.658 N

Average velocity = 1.804 m/s

รูปที่ 7.19 แสดงผลการสร้างกำแพงเปิดเหลี่ยม ที่ความดัน 4 บาร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum force = 6.596 N

Minimum velocity = 0.0002 m/s

Maximum force = 17.354 N

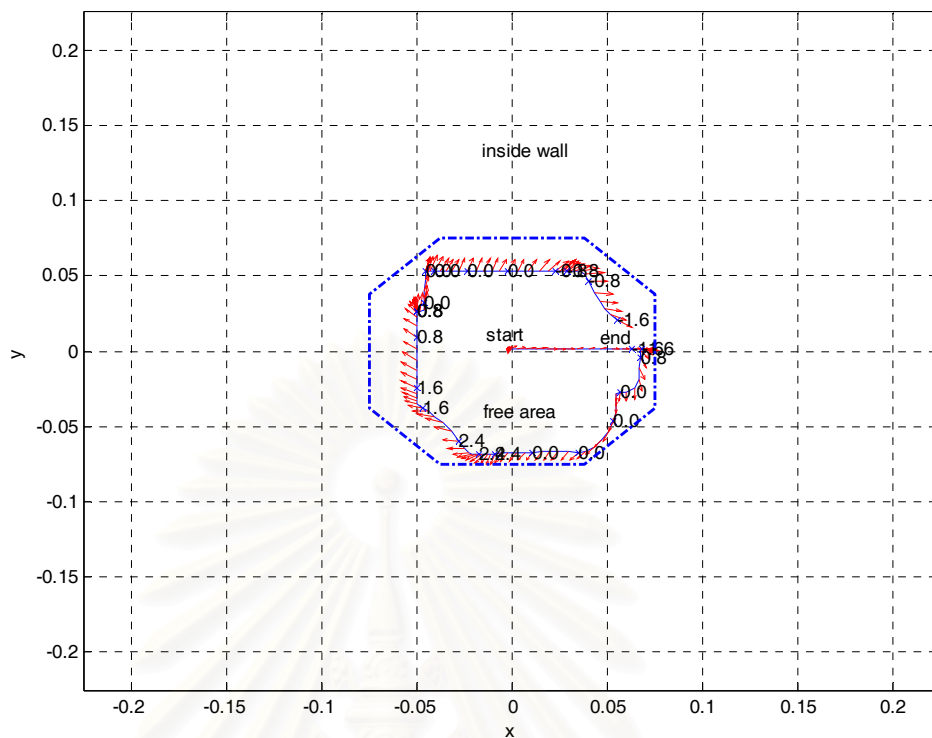
Maximum velocity = 0.374 m/s

Average Force = 12.120 N

Average velocity = 0.194 m/s

รูปที่ 7.20 แสดงผลการสร้างกำแพงเปิดเหลี่ยม ที่ความดัน 4 บาร์พร้อมการ  
ทำนายการเข้าชน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum force = 0.051 N

Minimum velocity = 0.002 m/s

Maximum force = 20.15 N

Maximum velocity = 0.172 m/s

Average force = 10.976 N

Average velocity = 0.0924 m/s

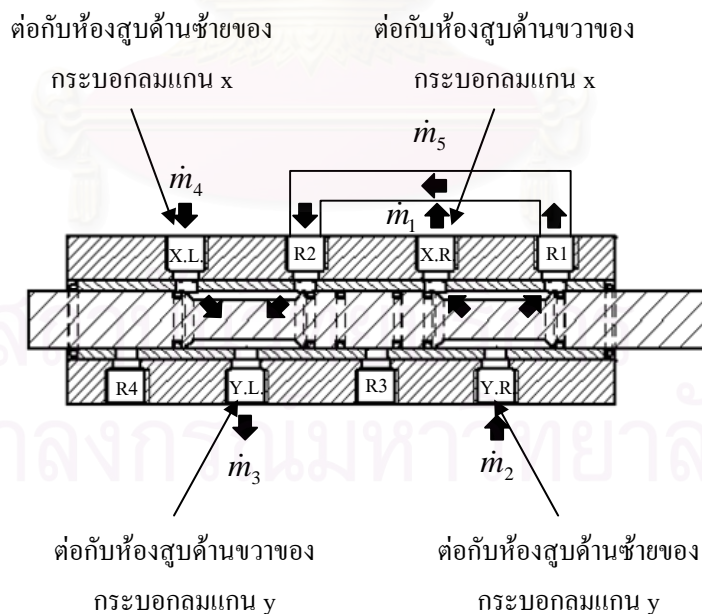
รูปที่ 7.21 แสดงผลการสร้างกำแพงเปิดเหลี่ยม ที่ความดัน 4 บาร์พร้อมการ  
ทำนายการเข้าชน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

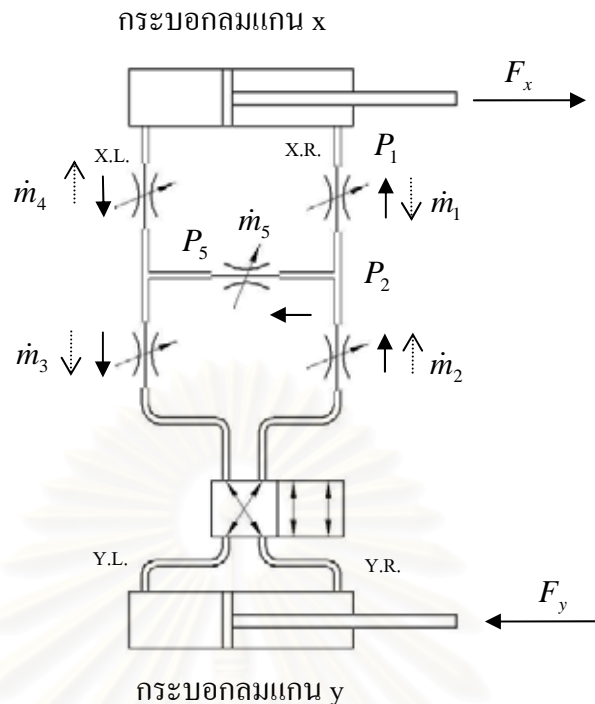
## บทที่ 8 วิเคราะห์และสรุปผล

### 8.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งสามการทดลอง จะเห็นได้ว่าโคบอตสามารถสร้างเส้นทางเดินได้ดีในแนว  $\pm 0, \pm 45, \pm 90, \pm 135$  และ  $\pm 180$  องศา หรือ  $45n$  องศา โดยที่  $n = 0, 1, 2, \dots$  ในขณะที่ไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินในแนวอื่นๆ ได้ดีนัก เมื่อกลับมาพิจารณาการไหลของลมในระบบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบอกสูบทั้งสองตัว ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ในเส้นทางเดิน  $45n$  องศา นั้น ชุดวาล์วควบคุมการไหลจะทำหน้าที่ในการควบคุมเส้นทางการไหลเท่านั้น ตัวอย่างเช่น ในเส้นทาง  $90$  องศา กระบอกสูบของแกน  $x$  จะถูกวาล์วควบคุมการไหลปิดช่องลมไหลของห้องสูบทั้งสองห้อง ส่งผลให้กระบอกสูบไม่เคลื่อนที่ และช่องลมของกระบอกสูบของแกน  $y$  จะต่อเข้าด้วยกัน ส่วนในกรณีของเส้นทางเดิน  $45$  องศา ช่องลมของแต่ละห้องสูบจะต่อเข้ากับห้องสูบของกระบอกสูบอีกตัวหนึ่ง การไหลของลมในสองกรณีนี้จะแยกจากกันโดยเด็ดขาด แต่ในกรณีที่เส้นทางเดินอยู่ระหว่าง  $45$  ถึง  $90$  องศา การไหลจะมีการไหล bypass ระหว่างท่อที่เชื่อมระหว่างกระบอกสูบทั้งสอง ถ้าพิจารณาการไหลเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ การไหลในวาล์วควบคุมการไหลที่ควรจะเป็นคือในรูปที่ 8.1 a) และการไหลในวงจรรอริฟิคสมมูลตามในรูป 8.1 b)



รูปที่ 8.1 a) การไหลที่เกิดขึ้นวาล์วควบคุมการไหล



รูปที่ 8.1 b) แสดงแผนผังการไหลในวงจรสมมูล, เส้นทึบแสดงการไหลที่ถูกต้อง, เส้นประแสดงการไหลที่เกิดความผิดพลาด

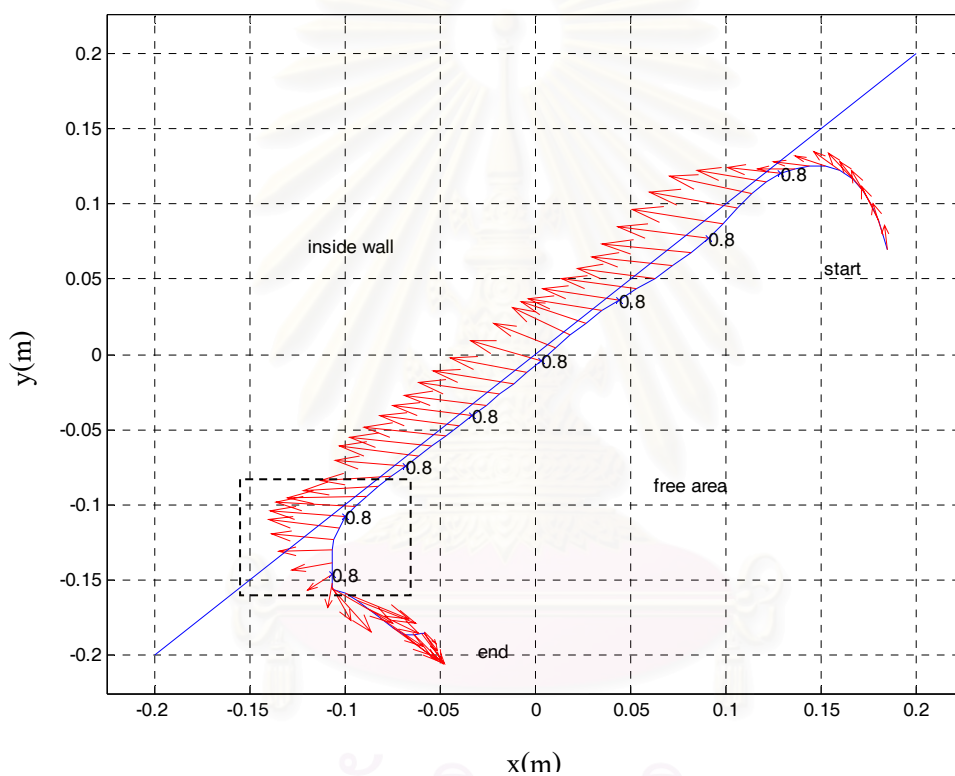
เมื่อพิจารณาการไหลที่เกิดขึ้นในการทดลองที่เส้นทางเดิน 87 องศา ซึ่งอยู่ในช่วง 45-90 องศา ตำแหน่งของวาล์วและวงจรมูลเป็นตามรูปที่ 8.1 การควบคุมอัตราการไหลนี้เพื่อสร้างเส้นทางเดินในช่วง 45-90 องศา จะเป็นหน้าที่ของออริฟิตตัวที่ 1 และ 5 ซึ่งสมมูลกับตำแหน่งของวาล์วควบคุมการไหลในรูป 8.1 a) เมื่อให้แรงจากมวล 2 kg ในแนวต่างๆ ซึ่งแยกแนวแรงเป็นสองกรณี คือ

กรณีที่แนวแรงทำมุมกับแกน x น้อยกว่า 45 องศา องค์ประกอบของแรงในแกน x มีขนาดมากกว่าองค์ประกอบของแรงในแกน y ทำให้ความดัน  $P_1$  มากกว่าความดัน  $P_2$  และความดันในห้องซ้ายมือของกระบอกสูบของแกน x ต่ำกว่าความดัน  $P_5$  ทำให้การไหลของ  $m_1$  และ  $m_4$  ไหลย้อนกลับทาง ตามที่แสดงทิศทางการไหลตามลูกศรเส้นประ และจากการไหลย้อนทางดังกล่าวนี้จะเห็นว่าการไหลของ  $m_1$  ออกจากกระบอกสูบแกน x ทั้งหมดผ่านออริฟิตสมมูลตัวที่หนึ่งหรือพื้นที่หน้าตัดการไหลของช่อง X.R. ที่เปิดไม่เต็มที่ทั้งหมดก่อนไหลผ่านช่อง R1 และ Y.R. เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้แรงดันที่ handle มีค่าสูงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดการไหลน้อย

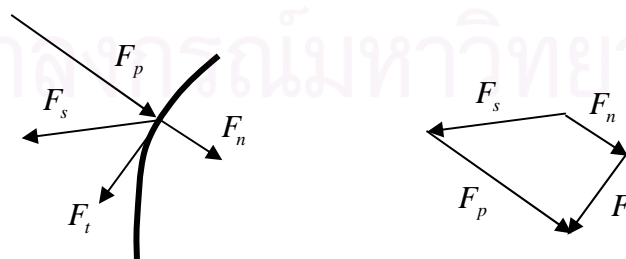
ในกรณีที่แนวแรงทำมุมกับแกน x มากกว่า 45 องศา จะทำให้แรงในแกน y มากกว่าแกน x ส่งผลให้ความดัน  $P_2$  มากกว่าความดัน  $P_1$  และ  $P_5$  การไหลก็จะเกิดขึ้นทิศทางที่ถูกต้อง คือ ลมจะไหลออกจากกระบอกสูบแกน y ผ่านช่อง Y.R. และจึงแยกไหลผ่านช่อง X.R. และ R1 ที่มี

พื้นที่หน้าตัดรวมมากกว่าช่อง X.R. ในกรณีแรก อย่างไรก็ตามอัตราการใช้ยังคงมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของลมในระบบ

การไหลที่เกิดขึ้นจากแนวแรงทั้งสองกรณีข้างต้น สอดคล้องกับแรงดันที่วัดค่าได้ตามผลการทดลองในรูปที่ 7.6 ในช่วงแนวแรงทำมุมกับแกน x น้อยกว่า 45 องศา แรงดันที่ได้จะมีค่ามากเนื่องจากการไหลออกจากกระบอกลมแกน x ทั้งหมดไหลผ่านช่อง X.R. เพียงช่องเดียว เมื่อแนวแรงเปลี่ยนไปอยู่ในช่วง 45-90 องศา แรงดันที่ได้จะตกลง เนื่องจากการไหลมีทิศทางต้องและพื้นที่หน้าตัดการไหลมากกว่า



รูปที่ 8.2 แสดงทิศของแรงในช่วงการเคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพง



รูปที่ 8.3 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในขณะ โคบอลต์เริ่มเคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพง



นอกเหนือจากนั้นในผลการทดลองบริเวณที่โคบอลต์เคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพงตามในรูปที่ 8.2 พิจารณาบริเวณที่โคบอลต์เคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพง(ภายในรูปสี่เหลี่ยม) ซึ่งทิศทางและขนาดของแรงของผู้ใช้จะแสดงด้วยทิศทางและความยาวของลูกศร จะเห็นว่าทิศของแรงที่ผู้ใช้กระทำกับโคบอลต์มีได้สอดคล้องกับเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น นั่นแสดงถึงว่ามีแรงอื่นกระทำกับ handle ของโคบอลต์นอกเหนือจากแรงที่กระทำจากมือของผู้ใช้

แรงดังกล่าวเกิดจาก ในช่วงที่มีการสร้างแนวกำแพง แรงของผู้ใช้ที่กระทำต่อหัวลูกสูบทำให้ลมในระบบถูกกดให้ยุบตัว เป็นการเก็บสะสมพลังงานไว้ในระบบ(เช่นเดียวกับการกดสปริง) ในช่วงที่แรงของผู้ใช้เริ่มลดลงขณะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกำแพง พลังงานที่เก็บไว้จะคายพลังงานออก ลมจะขยายตัวดันให้เส้นทางการเคลื่อนที่เบี่ยงออกห่างจากแนวกำแพง ก่อนที่แรงจากผู้ใช้จะมีทิศตั้งโคบอลต์ ออกจากแนวกำแพง ดังนั้นแรงที่อุปกรณ์วัดแรงวัดได้  $F_s$  จึงเกิดขึ้นจากผลรวมของแรงที่เกิดจากการคายพลังงานจากระบบ  $F_p$  และแรงที่กระทำของผู้ใช้ในแนว tangent  $F_t$  และ normal  $F_n$  ดังแสดงในรูปด้านขวาของรูปที่ 8.3 ประกอบกับวิธีการสร้างกำแพงเสมือนของโคบอลต์ที่เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างการบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่และการเคลื่อนที่อิสระ เมื่อโคบอลต์ต้องการสร้างกำแพงเสมือน โคบอลต์จะสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ขึ้นตามแนวกำแพง ซึ่งในการควบคุมแบบบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่จะบังคับไม่ให้โคบอลต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางการเคลื่อนที่ได้ทั้งสองด้าน คือ ทั้งด้านเป็นกำแพงและด้านที่เป็นบริเวณเคลื่อนที่อิสระ ในการอนุญาตให้โคบอลต์เคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพงเมื่อผู้ใช้งานดึงโคบอลต์ออกจากกำแพง จะใช้การเปลี่ยนรูปแบบการควบคุมจากการบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่ไปเป็นการเคลื่อนที่อิสระ ซึ่งในการเปลี่ยนรูปแบบการควบคุมนี้มีช่วงเวลาหนึ่งเกิดขึ้น ส่งผลให้การควบคุมยังคงอยู่ในรูปแบบของการบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่ไปอีกช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งทำให้การขยายตัวของลมในกระบอกลมสร้างแรง  $F_p$  หลังจากโคบอลต์เคลื่อนที่ออกจากแนวกำแพงต่อไปอีกระยะหนึ่ง

## 8.2 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมด จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและข้อจำกัดของข้อต่อโคบอลต์แบบของไหล ในการทดลองแรกจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างจากยูนิไซเคิล โคบอลต์ทำให้ระบบควบคุมของยูนิไซเคิลโคบอลต์ไม่สามารถนำมาใช้ได้ จากนั้นการทดลองที่สองจะแสดงถึงข้อจำกัดของโคบอลต์ที่เป็นอุปสรรคมากที่สุดได้แก่ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับชุดวาล์วควบคุมอัตราการไหล ที่ไม่สามารถแบ่งจ่ายอัตราการไหลได้ตามที่ตั้งสมมุติฐานไว้ได้อย่างสมบูรณ์

สาเหตุของความผิดพลาดของการไหลเกิดจากอัตราการไหลเชิงมวลที่ผ่านออริฟิตหรือช่องต่างๆแล้วจะเป็นฟังก์ชันของพื้นที่หน้าตัดของออริฟิต, ความดันก่อนออริฟิตและความดันหลังออริฟิต แต่ว่าถ้าควบคุมการไหลจะถูกออกแบบให้ควบคุมได้เพียงอัตราการไหลด้วยการปรับพื้นที่หน้าตัดของออริฟิตเพียงอย่างเดียวและยังออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดรวมให้คงที่ตลอด ดังนั้น

การควบคุมการไหลจึงมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้เนื่องจากความดันของห้องต่างๆในกระบอกสูบขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำกับหัวลูกสูบ และวาล์วไม่ได้ถูกออกแบบให้แก้ไขหรือควบคุมความดันได้

จากสาเหตุดังกล่าวนี้ การออกแบบระบบควบคุมและข้อต่อโคโบติก จึงต้องพิจารณาเพิ่มการควบคุมที่การควบคุมอัตราส่วนแรงที่หัวลูกสูบ และการควบคุมอัตราทดของการเคลื่อนที่ไปด้วยกัน แทนที่จะควบคุมอัตราทดของการเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว

เนื่องจากการสร้างเส้นทางเดินได้ไม่สมบูรณ์ในทุกแนว ทำให้โคบอตไม่สามารถสร้างกำแพงในทุกๆแนวได้ ด้วยสาเหตุนี้จะทำให้โคบอตไม่สามารถสร้างแนวกำแพงที่มีความชันต่อเนื่องได้ อย่างไรก็ตามวาล์วควบคุมอัตราการไหลยังสามารถควบคุมอัตราการไหลได้ถูกต้อง เมื่อเส้นทางเคลื่อนที่อยู่ในแนว  $\pm 0$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  และ  $\pm 180$  องศา ซึ่งสามารถนำไปสร้างแนวกำแพงได้ในแนวเดียวกับเส้นทางเคลื่อนที่ คือ  $\pm 0$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  และ  $\pm 180$  องศา

เมื่อนำโคบอตมาทดลองสร้างกำแพงเสมือนในแนวต่างๆ ซึ่งได้แก่ กำแพงในแนว 90, 45 ในกำแพงแต่ละแนวจะทำการทดลอง 3 แบบ คือ เมื่อความดันเริ่มต้นในระบบเป็น 1 บาร์, 4 บาร์ และ 4 บาร์พร้อมด้วยการทำนายการเข้าชน ในการสร้างแนวกำแพงที่ 90 และ 45 องศาที่ความดันประมาณ 1 บาร์ ผู้ใช้สามารถเคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพงที่กำหนดเข้าไปได้มากและการสร้างเส้นทางเดินเพื่อนำผู้ใช้ออกจากกำแพงเสมือนจะตอบสนองช้า เนื่องจากการยุบตัวของลมในระบบ แต่ผู้ใช้ก็สามารถรู้สึกถึงแรงต้านได้เมื่อลมในระบบอัดตัวจากแรงของผู้ใช้ถึงระดับหนึ่ง เมื่อเพิ่มความดันเริ่มต้นเป็น 4 บาร์แนวกำแพงที่ได้จะแข็งแรงขึ้น ระยะที่โคบอตเคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพงเข้าไปลดลง และการสร้างเส้นทางเดินเพื่อนำผู้ใช้ออกจากกำแพงจะมีผลตอบสนองเร็วขึ้น และเมื่อเพิ่มการทำนายการเข้าชนก็จะสามารถสร้างแนวกำแพงได้ค่อนข้างสมบูรณ์ โดยที่ผู้ใช้สามารถไกลไปตามแนวกำแพงได้

เมื่อนำโคบอตมาสร้างกำแพงเสมือนเป็นรูปแปดเหลี่ยม กำแพงรูปแปดเหลี่ยมนี้จะได้นำกำแพงในแนวต่างๆ มาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งความเร็วในการตอบสนองและความแข็งของกำแพงสามารถเพิ่มได้ด้วยการเพิ่มความดันในระบบเช่นเดียวกับแนวกำแพงอื่นๆ แต่ในแนวกำแพงแปดเหลี่ยมจะมีการเปลี่ยนแนวกำแพงตามตำแหน่งต่างๆ ซึ่งในช่วงที่เปลี่ยนแนวกำแพงนี้จะมีเวลาหน่วงเกิดขึ้น ทำให้ในช่วงเปลี่ยนแนวกำแพง โคบอตจะมีโอกาสที่จะทะลุผ่านแนวกำแพงออกไปได้ เป็นผลมาจากชุดวาล์วควบคุมอัตราการไหลต้องใช้โซลินอยด์วาล์วช่วยในการทำงานหลายตัวเป็นสาเหตุให้เวลาหน่วงในการตอบสนองต่อการสร้างเส้นทางเดินมีค่ามาก ส่งผลให้ในช่วงเปลี่ยนแนวกำแพงผู้สมารถเคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพงออกไปได้ ปัญหาดังกล่าวนี้จะลดลงเมื่อการเคลื่อนที่ช้าลง

โดยสรุปโคบอตสามารถสร้างกำแพงเสมือนได้ดีในบางแนว การเพิ่มความดันในระบบเป็นการช่วยลดการยุบตัวของกำแพงทำให้แนวกำแพงแข็งขึ้นและลดปัญหาที่เกิดจากการอัดตัวของลมในระบบ สามารถรับแรงของผู้ใช้ได้มากขึ้น ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มการทำนายความเร็วในการเข้าชนกำแพงเพื่อชดเชยเวลาหน่วงของโคบอต จะทำให้การสร้างกำแพงสามารถป้องกันการฝ่าเข้าไปในแนวกำแพงได้ดียิ่งขึ้น แต่จะทำให้เกิดแนวกำแพงก่อนแนวกำแพงที่ต้องการให้เกิดขึ้น ซึ่งระยะผิดพลาดระหว่างแนวกำแพงที่สร้างขึ้นกับแนวกำแพงที่ต้องการนี้จะขึ้นอยู่กับที่ตั้งค่าเวลาหน่วงว่ามากหรือน้อย ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้โคบอตเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแนวกำแพงได้ แต่ถ้ามากเกินไปจะทำให้เกิดแนวกำแพงก่อนแนวกำแพงที่ต้องการมากเกินไป

ส่วนข้อจำกัดส่วนอื่นๆ ได้แก่ วัลล์มีแรงเสียดทานแบบ stick-slip สูงมาก, ความละเอียดและความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งต่ำ เวลาหน่วงที่เกิดขึ้นในชุดวัลล์ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการพัฒนาการออกแบบวัลล์ให้ดียิ่งขึ้น

### 8.3 แนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยในอนาคต

จากผลของงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสร้างกำแพงเสมือนด้วยการใช้ข้อต่อโคโบติกแบบของไหล และความผิดพลาดที่เกิดขึ้น สาเหตุหลักของความผิดพลาดได้แก่ การควบคุมการไหลที่ไม่สมบูรณ์ในช่วงการไหลที่มีการไหล bypass และการตอบสนองที่ไม่เร็วพอของชุดวัลล์ควบคุมการไหล ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของโคบอต ควรเริ่มจากการออกแบบวัลล์ควบคุมอัตราการไหลใหม่ให้มีความแม่นยำและความละเอียดสูงขึ้น และลดเวลาหน่วงในการตอบสนองให้น้อยกว่า 1 ใน 100 วินาที ในส่วนของระบบควบคุม จากการทดลองเบื้องต้นจะเห็นแนวโน้มของการตอบสนองของวัลล์ควบคุมการไหลว่า การควบคุมการไหลจะเป็นฟังก์ชันของความดันหรือแรงจากผู้ใช้นั่นเอง ดังนั้นในการควบคุมอัตราทดของข้อต่อโคโบติกแบบของไหล จึงต้องใช้ระบบควบคุมที่สามารถควบคุมการไหลที่เป็นฟังก์ชันของแรงจากผู้ใช้ได้ หรือเปลี่ยนการควบคุมการไหลระหว่างกระบอกสูบเป็นการเปลี่ยนปริมาตรของห้องสูบแทน ถ้ามีกระบอกสูบสองกระบอกที่เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดไม่เท่ากัน เมื่อนำมาต่อเข้าด้วยกัน กระบอกสูบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าจะเคลื่อนที่ได้มากกว่ากระบอกสูบที่เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า ดังนั้นการควบคุมอัตราทดระหว่างกระบอกสูบสองตัวนี้จะได้ด้วยการควบคุมอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นต้น

สำหรับการทำนายการเข้าชนแนวกำแพง ที่ในปัจจุบันใช้เพียงความเร็วและเวลาหน่วงในการคำนวณระยะชดเชยในการสร้างกำแพง สามารถเพิ่มความแม่นยำได้ด้วยการนำความเร่งที่เกิดขึ้นมาคำนวณด้วย นอกจากนั้นการทำ Dynamic model ของระบบที่รวม inertia, แรงเสียดทาน และการยุบตัวของกำแพงที่ความดันต่างๆ จะทำให้การทำนายระยะชดเชยทำได้แม่นยำขึ้น

นอกจากนั้นควรลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระบบ ซึ่งในปัจจุบันแรงเสียดทานดังกล่าวทำให้  
ผู้ใช้รู้สึกถึงความฝืดในการเคลื่อนที่ จึงควรเปลี่ยนกระบอกลมเป็นแบบกระบอกลมที่มีลูกสูบ  
เคลือบกราไฟท์ซึ่งมีแรงเสียดทานต่ำมาก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1]. M.A. Peshkin.; J.E. Colgate.; C.A. Moore.; W. Wannasuphoprosit.; R.B. Gillespie.; and P. Akella, Cobot Architecture. IEEE Trans. Robot. Automat. 17 (August 2001): 377-389.
- [2]. W. Wannasuphoprasit.; R. Brent Gillespic.; J. Edward Colgate.; and Michael A. Peskin, Cobot Control. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 4 (April 1997): 20-25
- [3]. Moore, C. A.; Peshkin, M. A.; and Colgate.; and J. E., Design of a 3R Cobot using continuous variable transmissions. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 4 (May 1999): 3244-3254.
- [4]. Akella, P.; Peshkin, M.; Colgate, E.; Wannasuphoprasit, W.; Nagesh, N.; Wells, J.; Holland, S.; Pearson, T.; and Peakcock, B., Cobots for the automobile assembly line. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1 (May 1999): 728-733
- [5]. D. Ben-Dov.; and S. E. Salcudean, A Force-Controlled Pneumatic Actuator. IEEE trans. Robot. Automa. 11 (December 1995): 906-911.
- [6]. N.O. Vaughan.; and J.B. Gamble, The Modeling and Simulation of a Proportional Solenoid Valve. J. of Dyn. Sys. Meas. Cont. 118 (March 1996.): 120-125,
- [7]. X. Lin.; F. spettel.; and S. Scavarda.; Modeling and Test of an Electropneumatic Servovalve Controlled Long Rodless Actuator. J. of Dyn. Sys. Meas. Cont. (September 1996): 457-462.
- [8]. E. Richard.; and S. Scavarda, Comparison Between Linear and Nonlinear Control of an Electropneumatic Servodrive. J. of Dyn. Sys. Meas. Cont. 118 (June 1996): 245-252.
- [9]. E. Richer.; and Y. Hurmuzlu, A High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part I---Nonlinear Mathematical Model. J. of Dyn. Sys. Meas. Cont. 122 (September 2000): 416-425.
- [10]. Al-Ibrahim, A. M.; and Otis, D. R., Transient Air Temperature and Pressure Measurements During the Charging and Discharging Processes of an Actuating Pneumatic Cylinder. Proceedings of the 45<sup>th</sup> National Conference on Fluid Power 1992.
- [11]. ปานเพชร ชินินทร.; และขวัญชัย สิ้นทิพย์สมบูรณ์.; นวัตกรรมอุตสาหกรรม. ซีอีเคยูเคชั่น. กรุงเทพฯ. 2541

- [12]. D. McCloy.; and H.R. Martin, Control of fluid Power : Analysis and Design. John wiley & sons. 1980.
- [13]. Chester, C.R., Techniques in Partial Differential Equations. McGraw-Hill. New York. 1971.
- [14]. Munson, B.R.; Young, D.F.; and Okiidhi, T.H., Fundamentals of Fluid Mechanics. John Wiley. New York. 1990.
- [15]. Schuder, C.B.; and Binder, R.C.; The Response of Pneumatic Transmission Lines to Step Inputs. ASME J. Basic Eng. 81 (1959): 578-584.
- [16]. บรรณานุกรม ตรีนิล.; และ ศศ. ประเสริฐ กัญจสมบูรณ์.; ตารางงานโลหะ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ. 2524
- [17]. Grigore C. Burdea., Force and Touch Feedback for Virtual Reality. John Wiley. New York. 1996.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.  
รายละเอียดของอุปกรณ์

ก.1. อุปกรณ์ตรวจรู้แรง FT Mini 45



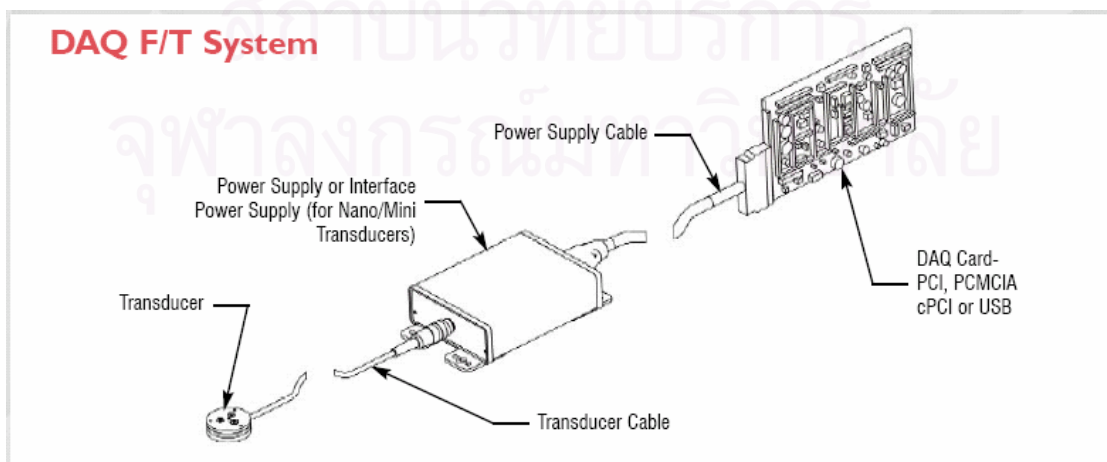
รูปที่ ก.1 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงรุ่น FT Mini 45

รายละเอียดของอุปกรณ์

- วัดแรงในแนวแกน x และ y ได้แกวละ  $\pm 145$  N
- วัดแรงในแนวแกน z ได้  $\pm 290$  N
- วัดแรงบิดในแนวแกน x, y และ z ได้  $\pm 5$  N-m

เมตริกซ์การแปลงของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

$$T = \begin{bmatrix} -7.4854 \times 10^{-3} & -3.21349 \times 10^{-2} & -1.16337 & 2.04007 \times 10 & 3.43107 & -2.62071 \times 10 \\ 3.98756 & -2.33106 \times 10 & -1.40029 & 1.19606 \times 10 & -2.13043 & 1.48934 \times 10 \\ -2.99197 \times 10 & 3.5587 \times 10^{-1} & -2.95689 & 8.32993 \times 10^{-1} & -3.18063 \times 10 & -4.68967 \times 10^{-1} \\ 3.63456 \times 10^{-2} & -1.59143 \times 10^{-1} & 4.82822 \times 10^{-1} & 7.93243 \times 10^{-2} & -5.39206 \times 10^{-1} & 7.99843 \times 10^{-2} \\ -5.70808 \times 10^{-1} & -7.90185 \times 10^{-1} & 3.07183 \times 10^{-1} & -1.45086 \times 10^{-1} & 2.66236 \times 10^{-1} & 1.98165 \times 10^{-1} \\ -3.51209 \times 10^{-2} & 2.98412 \times 10^{-1} & -2.56798 \times 10^{-2} & 2.98798 \times 10^{-1} & -5.99018 \times 10^{-2} & 3.97699 \times 10^{-1} \end{bmatrix}$$



รูปที่ ก.2 ส่วนประกอบในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

## ก.2. แผงวงจรนับสัญญาณแอนโคเดออร์ PCL-833



รูปที่ ก.3 แผงวงจรนับแอนโคเดออร์

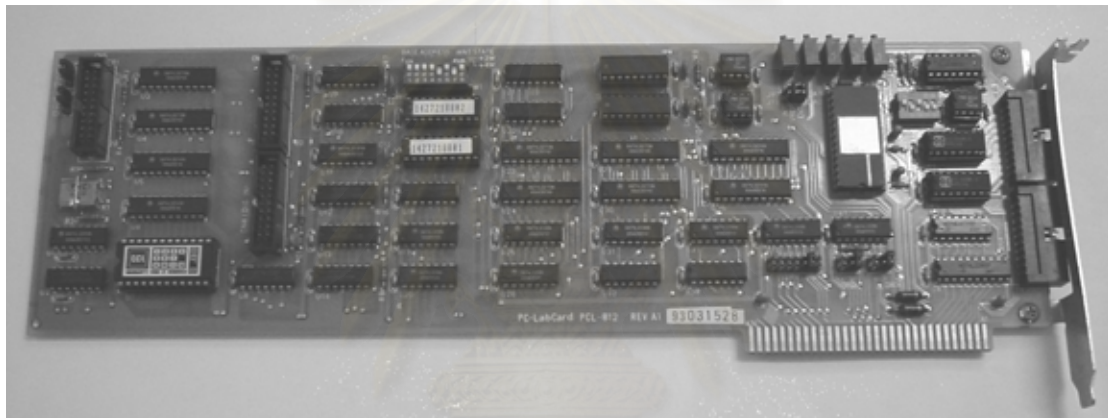
### รายละเอียดของแผงวงจรนับสัญญาณแอนโคเดออร์

- นับสัญญาณป้อนเข้าได้ทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ
- นับสัญญาณได้ที่ความถี่สูงสุด 2.4 MHz และนับสัญญาณเมื่อทำการควอดราเจอร์ ได้ที่ความถี่สูงสุด 1 MHz
- สามารถเลือกตัวคูณความละเอียดได้ 3 ระดับ คือ x1, x2 และ x4
- รับสัญญาณป้อนเข้าได้ทั้งแบบ single-end และ differential
- นับสัญญาณได้ 24 บิตต่อหนึ่งช่องสัญญาณ และสามารถนำมาต่อกันเพื่อเพิ่มหน่วยนับเป็น 48 บิต
- รูปแบบการนับจะนับได้ทั้งแบบควอดราเจอร์, นับสัญญาณขาขึ้นลง และนับสัญญาณพลัสและทิศทาง
- มีตัวกรองสัญญาณแบบดิจิตอล 4 ระดับ
- สัญญาณนาฬิกาสำหรับอัตราการสุ่มสัญญาณ 8, 4 และ 2 MHz.
- รับสัญญาณป้อนเข้าแบบดิจิตอลได้ 5 ช่องสัญญาณ และนำไปใช้เป็นสัญญาณอินเทอร์รัพท์ได้
- สามารถสร้างสัญญาณอินเทอร์รัพท์จากฐานเวลา 1 Hz, 10 Hz, 1kHz, และ 10 kHz กับตัวคูณสัญญาณที่สามารถเลือกได้ตั้งแต่ 1 ถึง 255

### ก.3. แผงวงจร multifunction data acquisition PCL-812

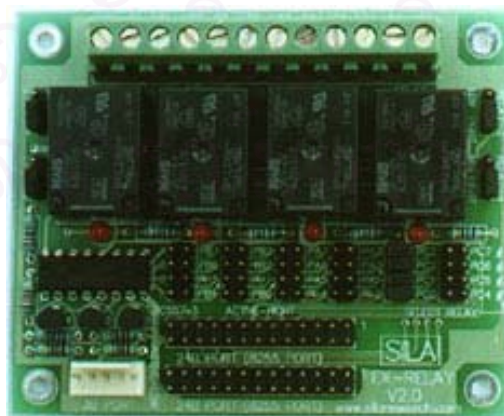
รายละเอียดของแผงวงจร multifunction data acquisition PCL-812

- รับสัญญาณป้อนเข้าแบบอนาลอกได้ 16 ช่องสัญญาณแบบ single-ended สามารถอ่านสัญญาณได้ที่มีความละเอียด 12 บิต อัตราสุ่มข้อมูลสูงสุด 30 kHz
- จ่ายสัญญาณแอนาลอกความละเอียด 12 บิต จำนวน 2 ช่อง ในช่วง 0 ถึง 5 V และ 0 ถึง 10 V โดยใช้แหล่งจ่ายอ้างอิง -5 V และ -10 V ตามลำดับ
- มีช่องจ่ายและรับสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต อย่างละ 1 ช่องสัญญาณ
- มีไอซี Intel 8253 Programmable Timer/Counter สำหรับสร้างสัญญาณ trigger ในช่วงความถี่ 0.5 MHz ถึง 35 นาทีต่อพลัส



รูปที่ ก.4 แผงวงจร multifunction data acquisition PCL-812

### ก.4. แผงวงจรขั้วรีเลย์ SILA EX-RELAY



รูปที่ ก.5 แผงวงจรขั้วรีเลย์

### รายละเอียดของแผงวงจรรีเลย์ SILA EX-RELAY

- บอร์ดรีเลย์จำนวน 4 ตัว โดยมีหน้าสัมผัส 3A 120VAC พร้อมขั้วต่อไขนอตทั้ง NO และ NC
- สามารถเลือกบิตของพอร์ทที่จะใช้ได้อย่างอิสระ
- มีช่องสัญญาณ 8255 2 ชุด ต่อพ่วงกันได้
- มี LED แสดงสถานะการทำงานของรีเลย์แต่ละตัว
- สามารถเลือกช่องสัญญาณของ 8255 ได้ 3 ช่องเพื่อเพิ่มทางเลือกในการควบคุม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ก.5. ระบบปฏิบัติการ QNX

ระบบปฏิบัติการ QNX เป็นระบบปฏิบัติการสำหรับงาน Real time ระบบปฏิบัติการ QNX ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นรุ่นที่แจกฟรี และมีเครื่องมือสำหรับพัฒนาโปรแกรมชื่อ Photon Application Builder (PhAB) ซึ่งเป็นโปรแกรมภาษา C แบบ visual design เช่นเดียวกับโปรแกรม Virtual Studio ของไมโครซอฟท์ แต่ใน QNX จะอนุญาตให้ผู้เขียนโปรแกรมสามารถสร้างชุดคำสั่งที่ตอบสนองสัญญาณอินเทอร์รัพท์ได้ เพื่อใช้ในการกำหนดคาบเวลาที่เที่ยงตรงของวงรอบการควบคุมได้ รายละเอียดของระบบปฏิบัติการ QNX และวิธีการเขียน โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย อยู่ใน [www.qnx.com](http://www.qnx.com)

### ก.6. เอนโคเดอร์ Koyo TRD-S2500VA



รูปที่ ก.6 เอนโคเดอร์ Koyo TRD-S2500VA

รายละเอียดของเอนโคเดอร์

- ความละเอียด 2500 พัลส์ต่อรอบ
- สัญญาณจ่ายออกเป็นแบบ Line driver 5 โวลต์
- ขนาดเพลา 6 ม.ม.
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเรื่อเอนโคเดอร์ 38 ม.ม.
- แรงบิดที่เกิดจากความฝืดขณะเริ่มต้นสูงสุด 0.001 นิวตัน-เมตร
- รับภาระสูงสุดในแนวรัศมี 20 นิวตันและแกน 10 นิวตัน
- ความเร็วสูงสุด 6000 รอบต่อนาที
- ความยาวสายเคเบิล 2 เมตร น้ำหนัก 150 กรัม

### ก.7. โซลินอยด์วาล์ว VT307



รูปที่ ก.7 โซลินอยด์วาล์ว VT307

#### รายละเอียดของโซลินอยด์วาล์ว VT307

- จับแกนวาล์วด้วยโซลินอยด์โดยตรง
- ช่วงความดันทำงาน 0-0.9 MPa
- ใช้กับของไหลที่เป็นลมอัด อุณหภูมิ 0 ถึง 50 องศา
- เวลาตอบสนองน้อยกว่า 20 ms ทำงานได้ที่ความถี่ 10 Hz
- ลมสามารถไหลเข้าหรือออกได้ทุกช่องลมไหล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

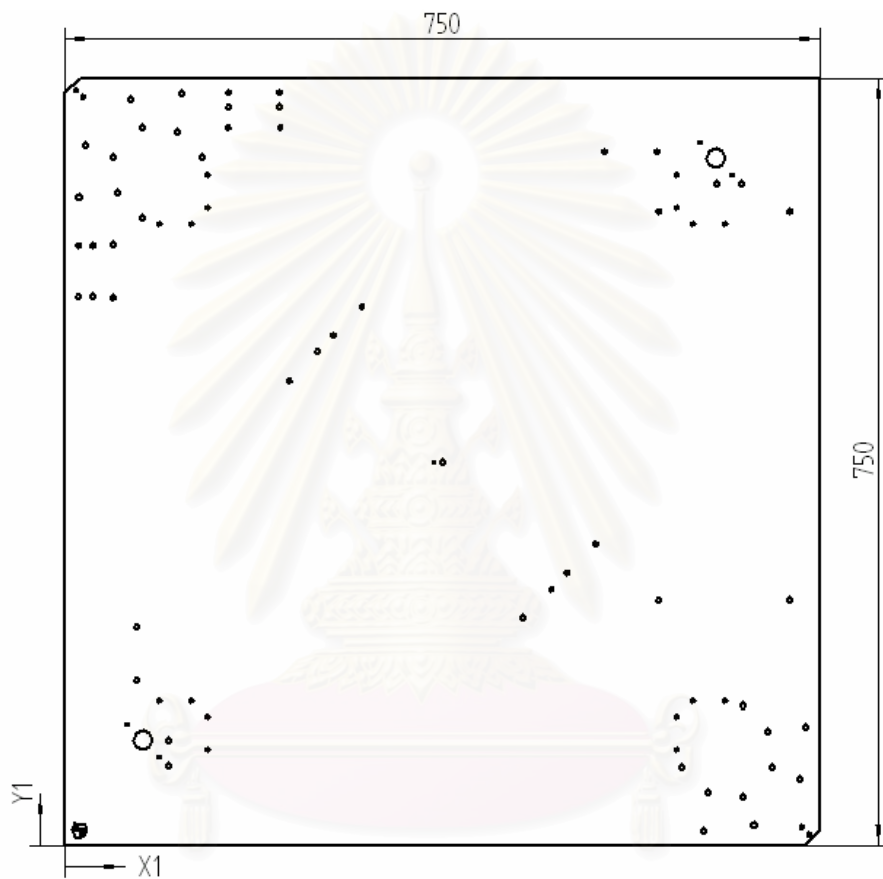


ภาคผนวก ข  
แบบเครื่องกลของส่วนประกอบที่สำคัญ

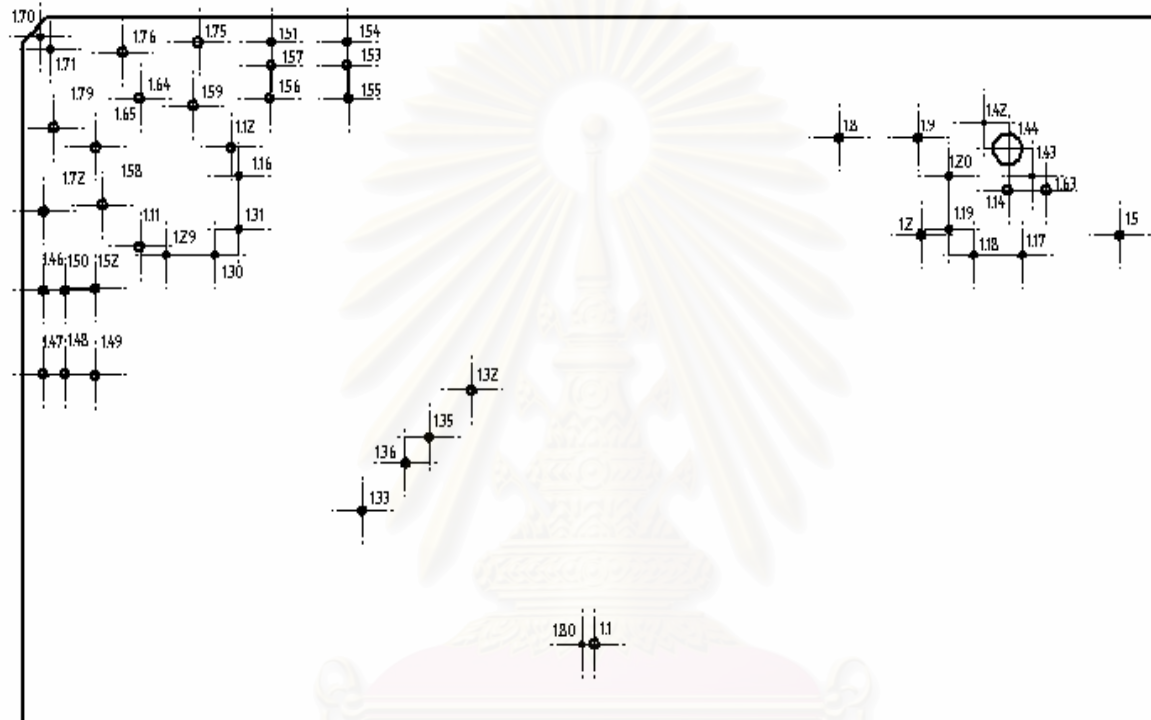
ในการออกแบบโคบอตแบบของไหล ชิ้นส่วนสำเร็จ, สลักเกลียว, และการให้ขนาดพิถีพิถันความเผื่อต่างๆ จะอ้างอิงจากหนังสือตารางโลหะ [16] ซึ่งเป็นคู่มือวัสดุที่จัดทำขึ้นตามมาตรฐานของเยอรมัน แบบเครื่องกลที่แสดงดังต่อไปนี้ คือแบบของชิ้นส่วนหลายๆ ที่ส่งให้โรงกลึงเพื่อจัดสร้าง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

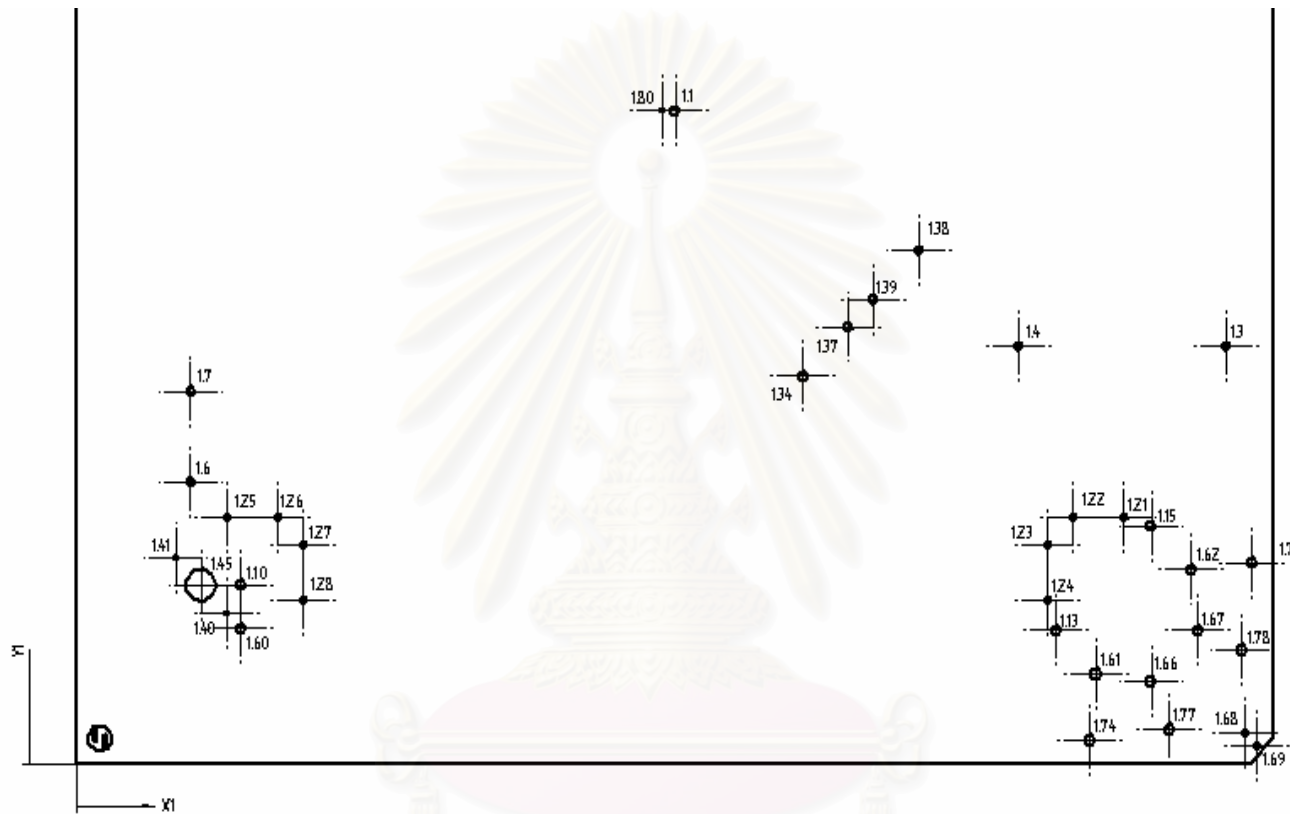


รูปที่ ข.1 แผ่นฐานของโคบอด  
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 a) แสดงรูเงาบนส่วนบนของแผ่นฐาน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 b) แสดงรูเงาะบนส่วนล่างของแผ่นฐาน

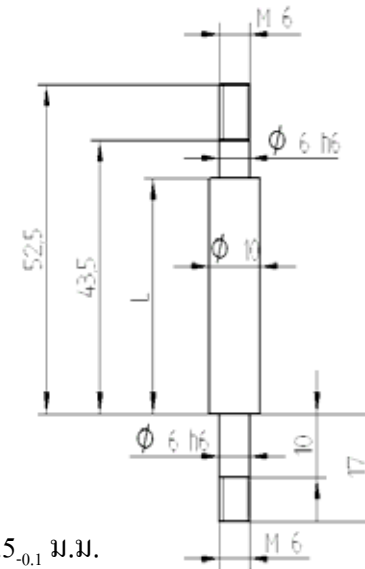
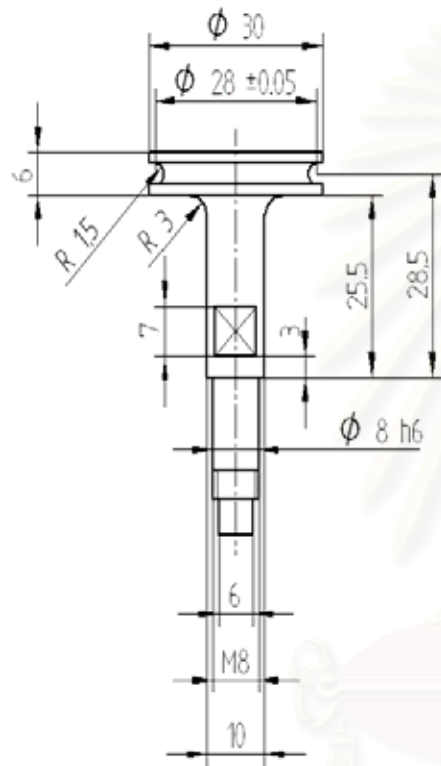
สถาบันวิจัยวิศวกรรม  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Hole	X	Y	Size
1.1	375	375	6
1.2	590	620	5
1.3	720	240	5
1.4	590	240	5
1.5	720	620	5
1.6	71,5	162	5
1.7	71,5	214	5
1.8	536	678,5	5
1.9	588	678,5	5
1.10	103	103	6
1.11	77	613,25	6
1.12	136,75	673	6
1.13	613,25	77	6
1.14	647	647	6
1.15	673	136,75	6
1.16	142	656	M 5
1.17	656	608	M 5
1.18	624	608	M 5
1.19	608	624	M 5
1.20	608	656	M 5
1.21	656	142	M 5
1.22	624	142	M 5
1.23	608	126	M 5
1.24	608	94	M 5
1.25	94	142	M 5
1.26	126	142	M 5

Hole	X	Y	Size
1.28	142	94	M 5
1.29	94	608	M 5
1.30	126	608	M 5
1.31	142	624	M 5
1.32	294,92	527,2	5
1.33	222,8	455,08	5
1.34	455,08	222,8	5
1.35	266,64	498,92	5
1.36	251,08	483,36	5
1.37	483,36	251,08	5
1.38	527,2	294,92	5
1.39	498,92	266,64	5
1.40	93,91	87,09	M 3
1.41	62,09	118,91	M 3
1.42	631,09	687,91	M 3
1.43	662,91	656,09	M 3
1.44	647	672	19
1.45	78	103	19
1.46	13,75	587	5
1.47	13,75	537	5
1.48	27,75	537	5
1.49	47,75	536	5
1.50	27,75	587	5
1.51	163	736,25	5
1.52	47,75	588	5
1.53	213	722,25	5

Hole	X	Y	Size
1.55	214	702,25	5
1.56	162	702,25	5
1.57	163	722,25	5
1.58	52	638,25	6
1.59	111,75	698	6
1.60	103	78	6
1.61	638,25	52	6
1.62	698	111,75	6
1.63	672	647	6
1.64	77	702,34	6
1.65	47,66	673	6
1.66	673	47,66	6
1.67	702,34	77	6
1.68	731,89	18,11	4
1.69	738,96	11,04	4
1.70	11,04	738,96	4
1.71	18,11	731,89	4
1.72	14	634,39	6
1.73	736	115,61	6
1.74	634,39	14	6
1.75	115,61	736	6
1.76	65,61	730	6
1.77	684,39	20	6
1.78	730	65,61	6
1.79	20	684,39	6
1.80	367	375	M 3

ตารางที่ ข.1 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูเจาะบนแผ่นฐาน



$$L_1 = 14.5_{-0.1} \text{ มม.}$$

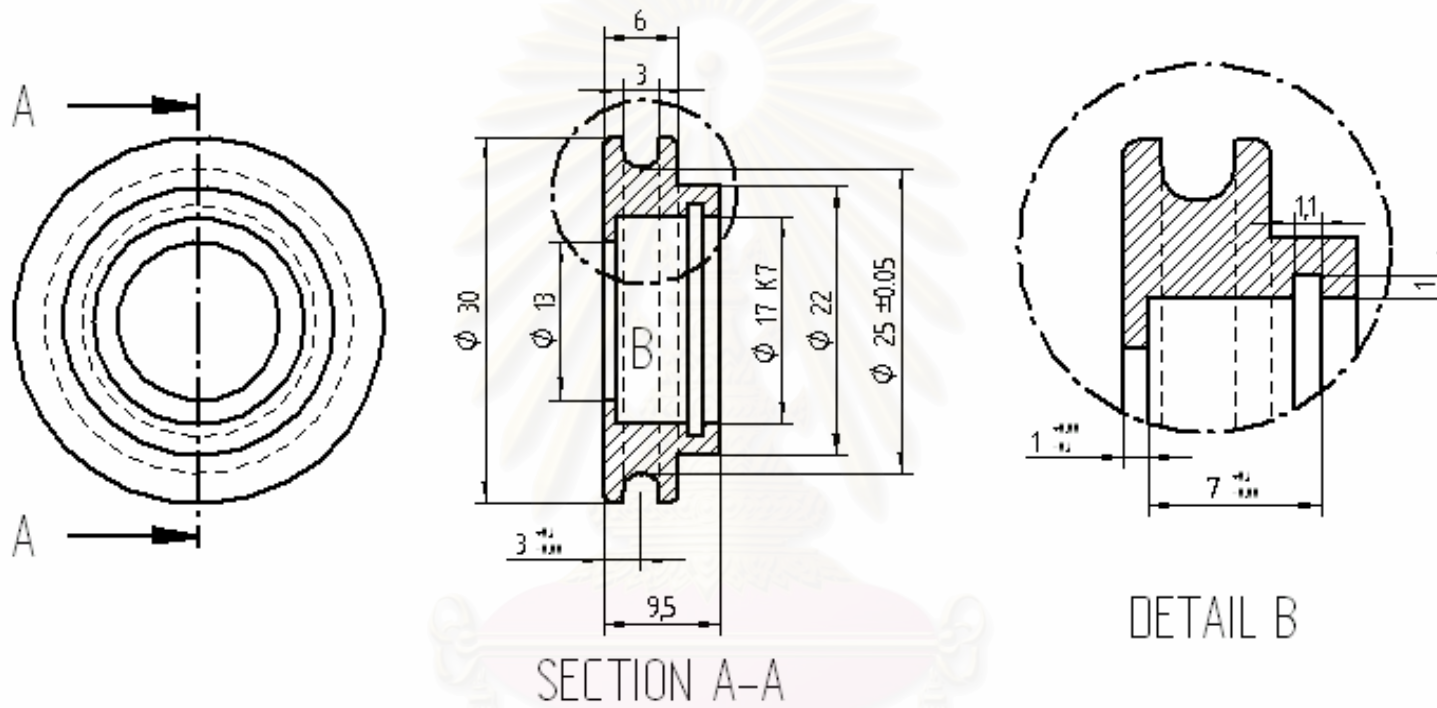
$$L_2 = 26_{-0.1} \text{ มม.}$$

$$L_3 = 37.5_{-0.1} \text{ มม.}$$

รูปที่ ข.2 พู่ต่อเข้ากับเพลลาของเอน โคดเดอร์

รูปที่ ข.3 เสาของพู่ซึ่งมีความสูง L สามระดับแสดงในตาราง

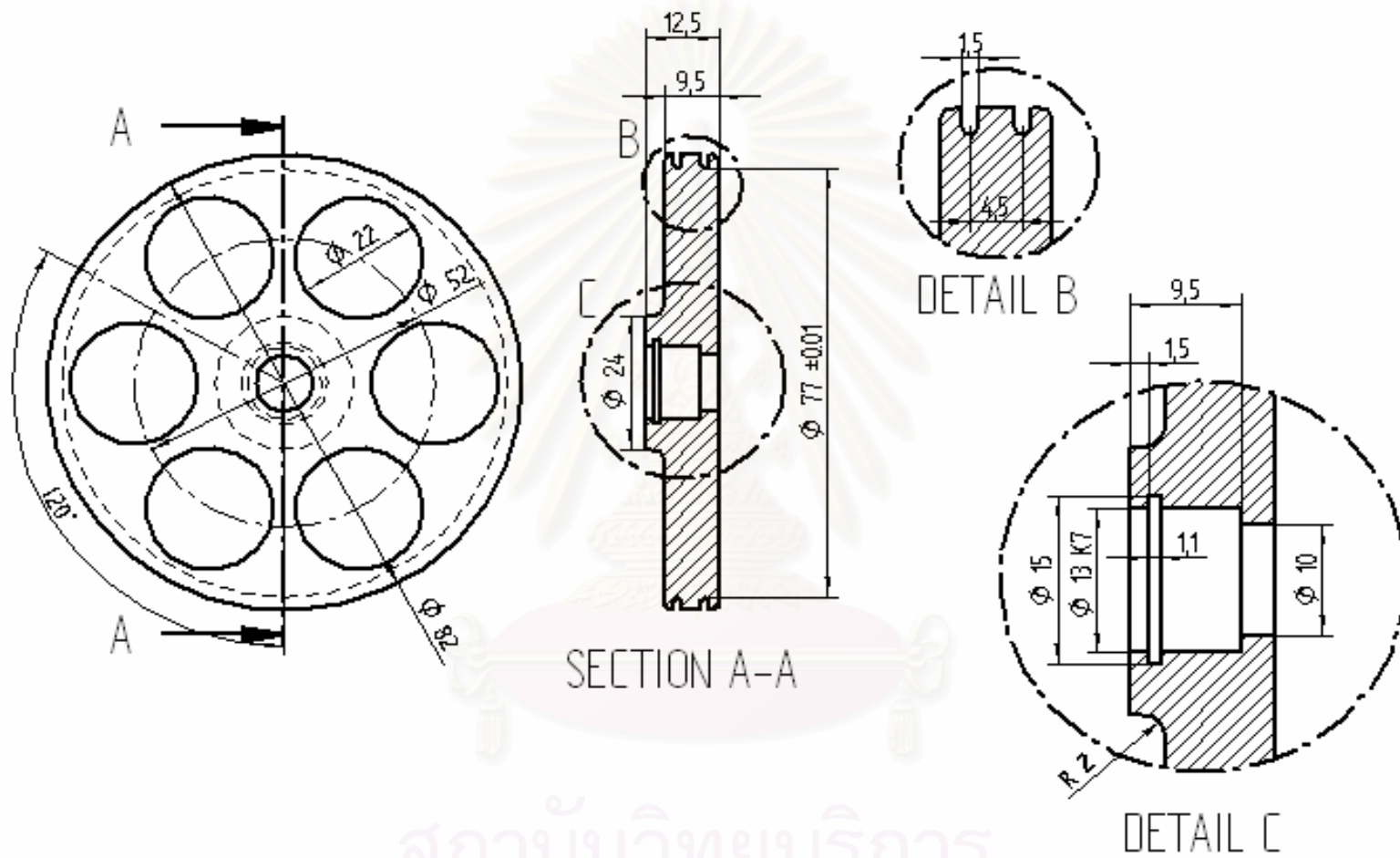
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.4 พูเล่ร้อยสายเคเบิลเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ม.ม.

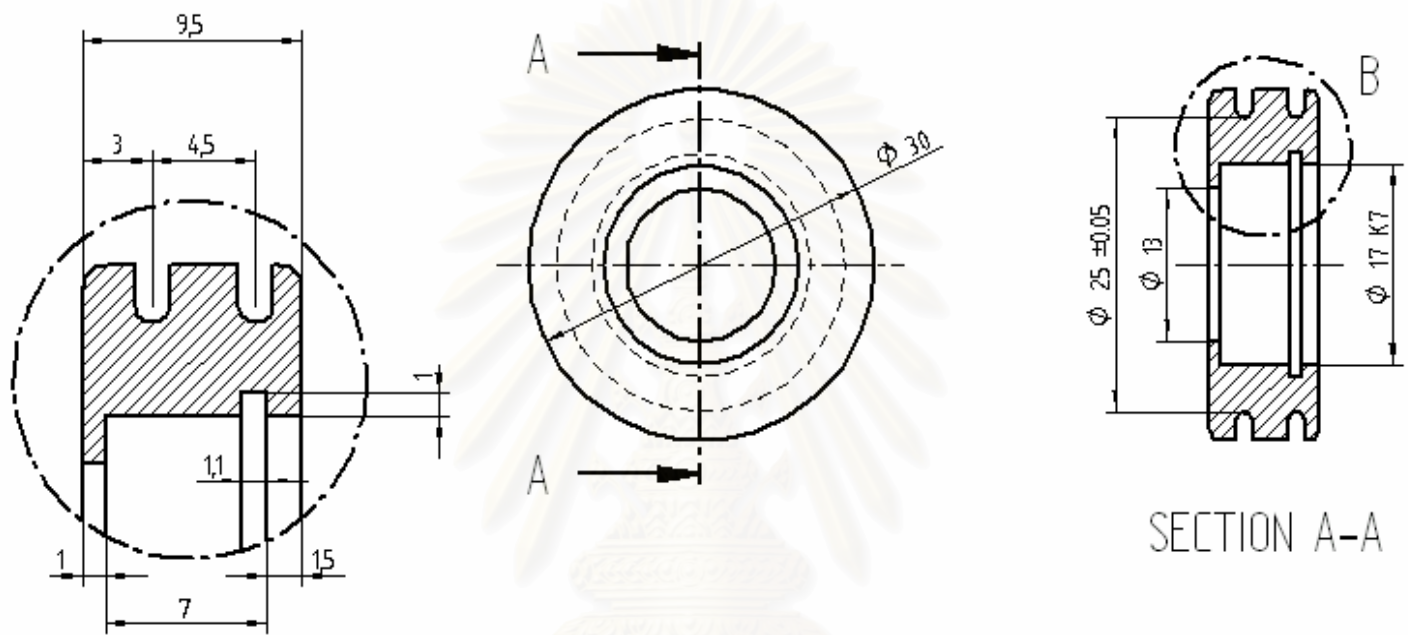
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ ข.5 พูเล็ร้อยสายเคเบิลเส้นผ่านศูนย์กลาง 77 ม.ม.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

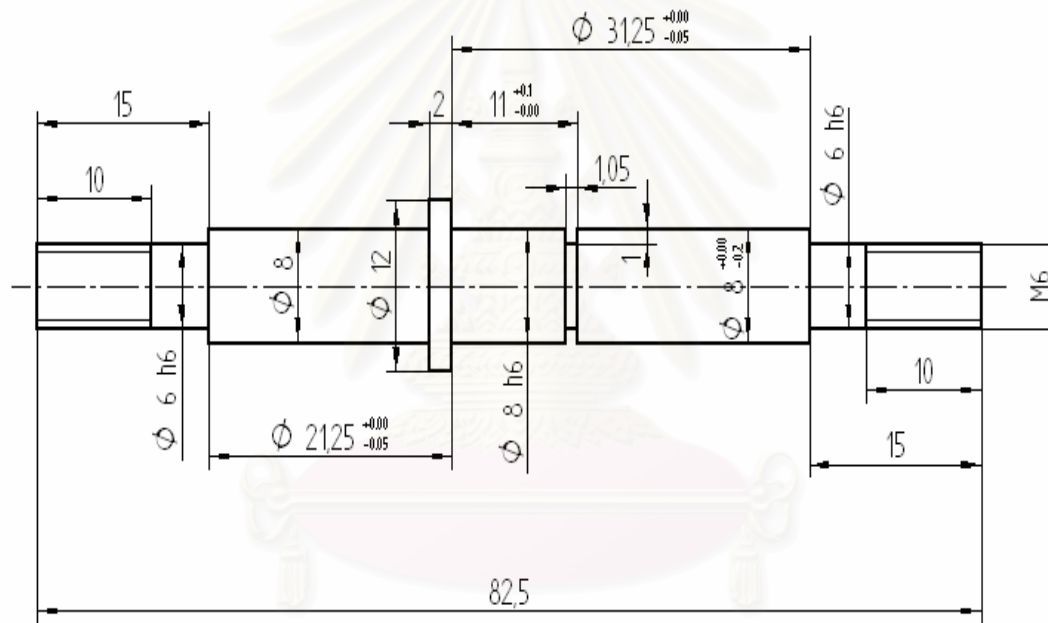


DETAIL B

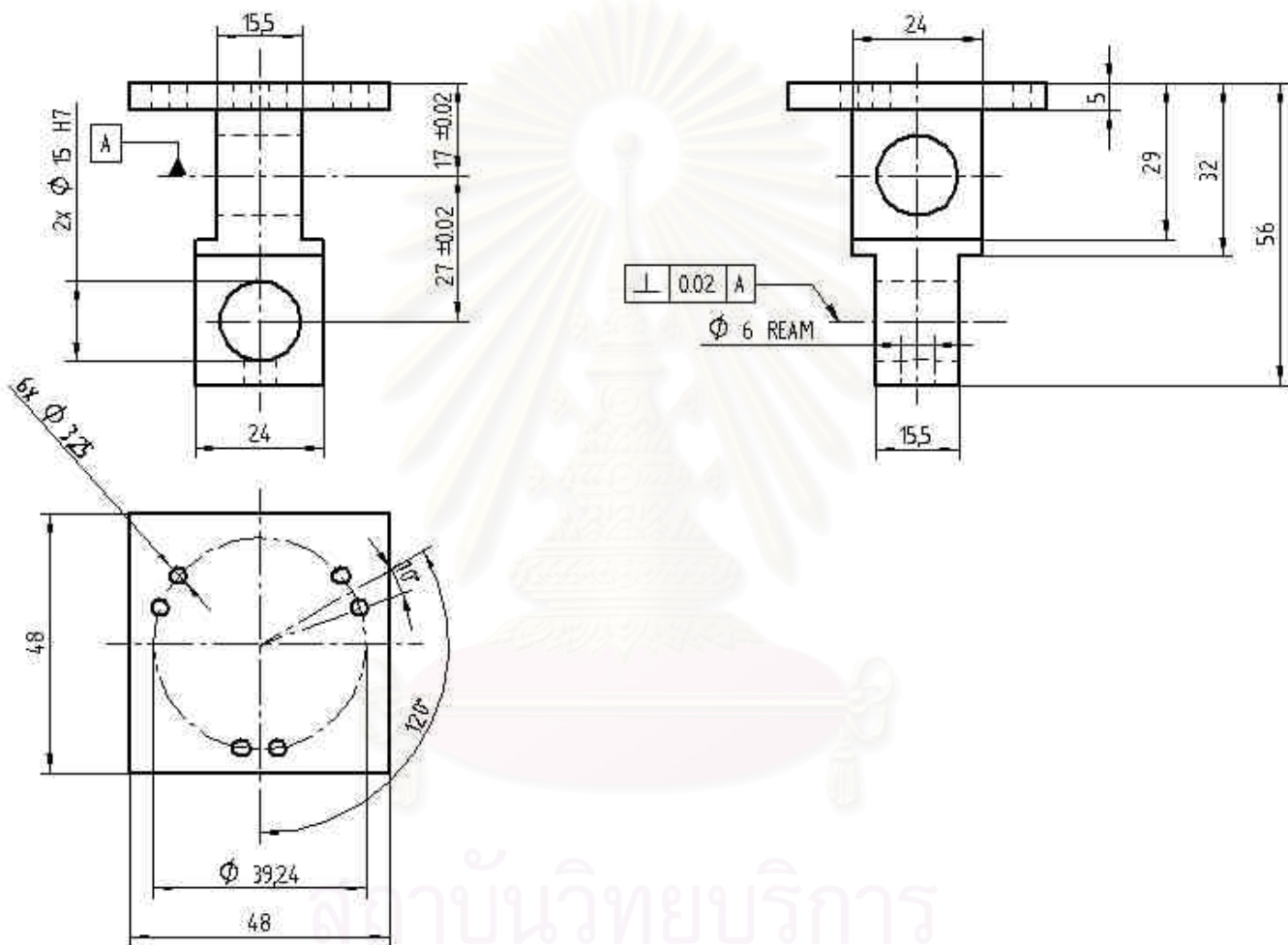
SECTION A-A

รูปที่ ข.6 พู่เล่ของกระบอกสูบ

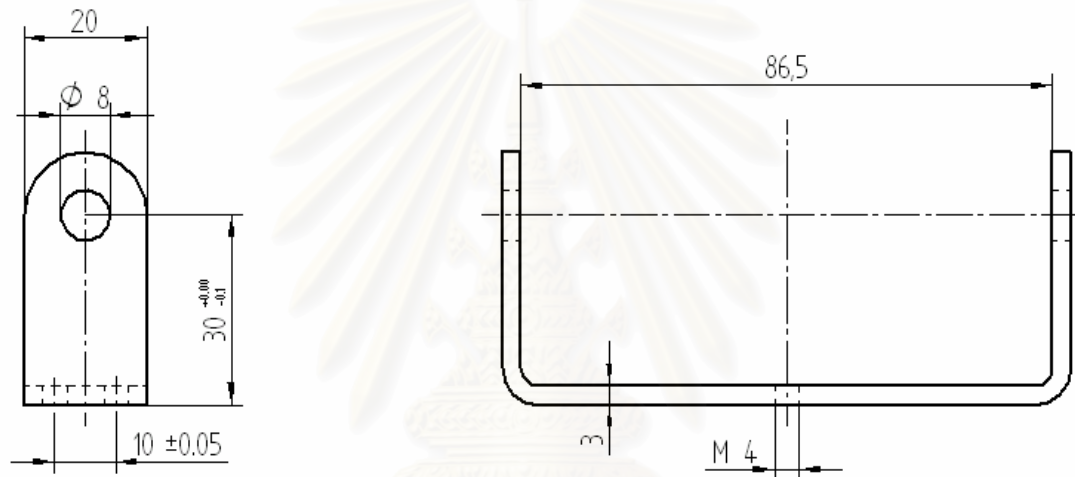
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.7 เพลางองพู่เล่ 77 ม.ม.  
 สถาบันวิจัยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

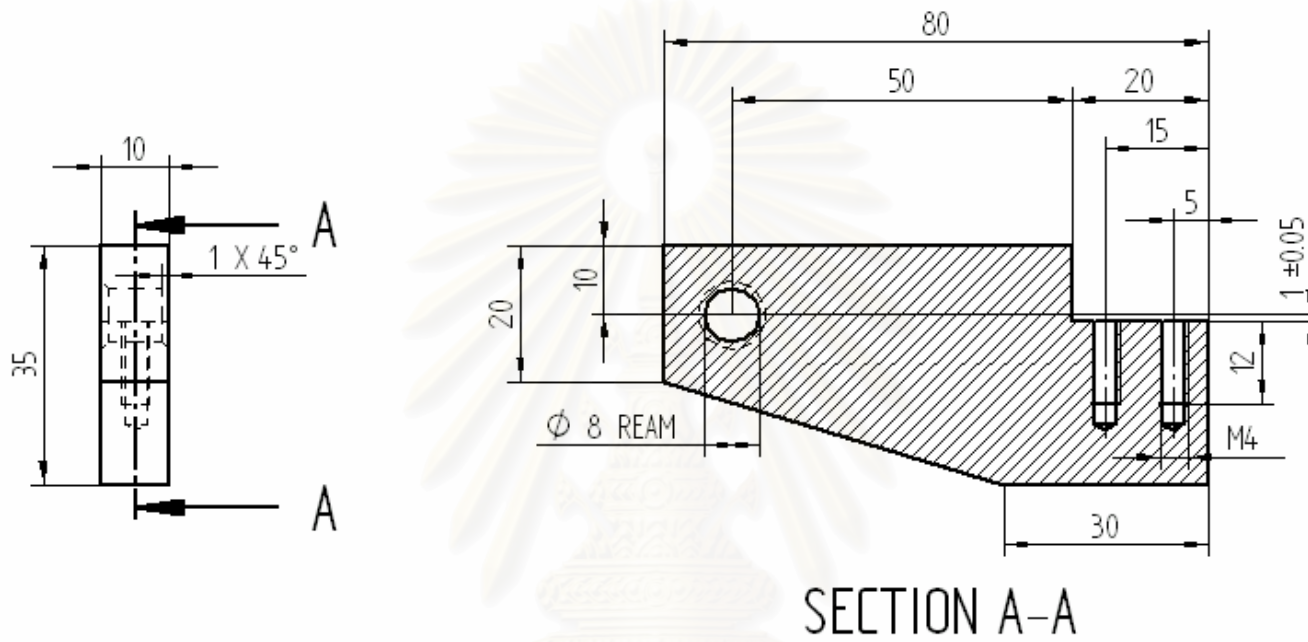


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ ข.8 Handle ของไคบอต



รูปที่ ข.9 คานเปลี่ยนระดับสายเคเบิล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

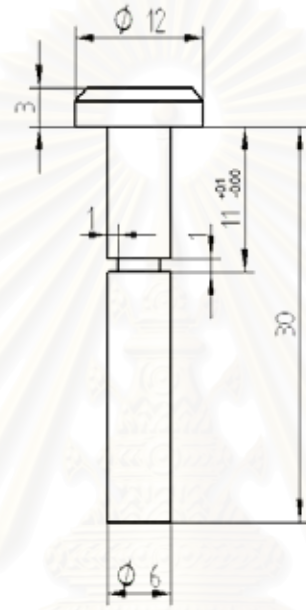


รูปที่ ข.10 คานของพู่เล่ 77 ม.ม.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

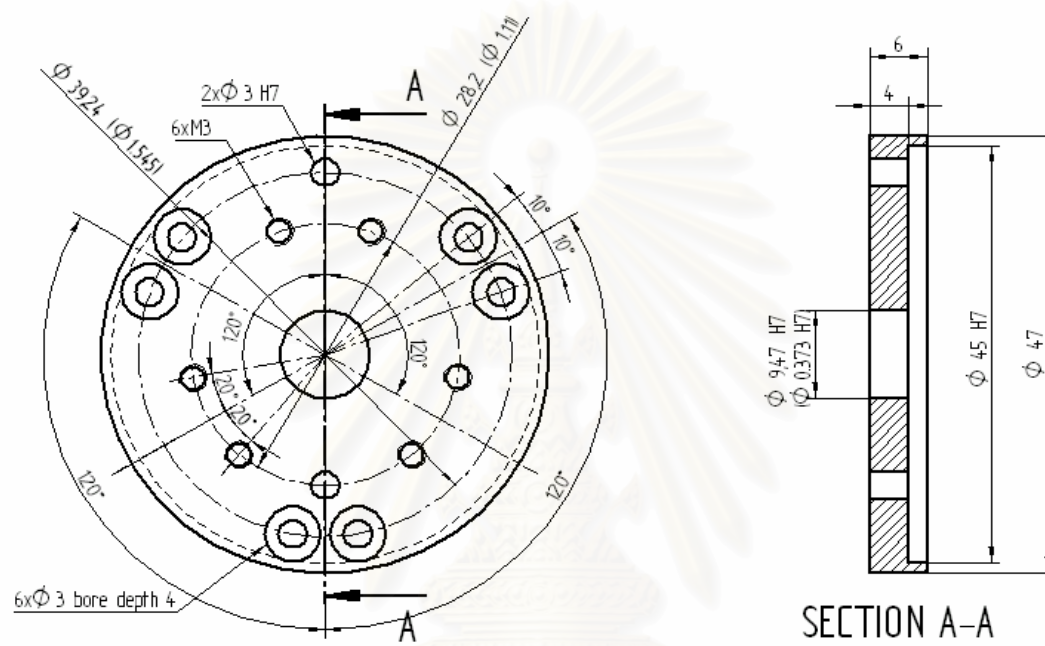






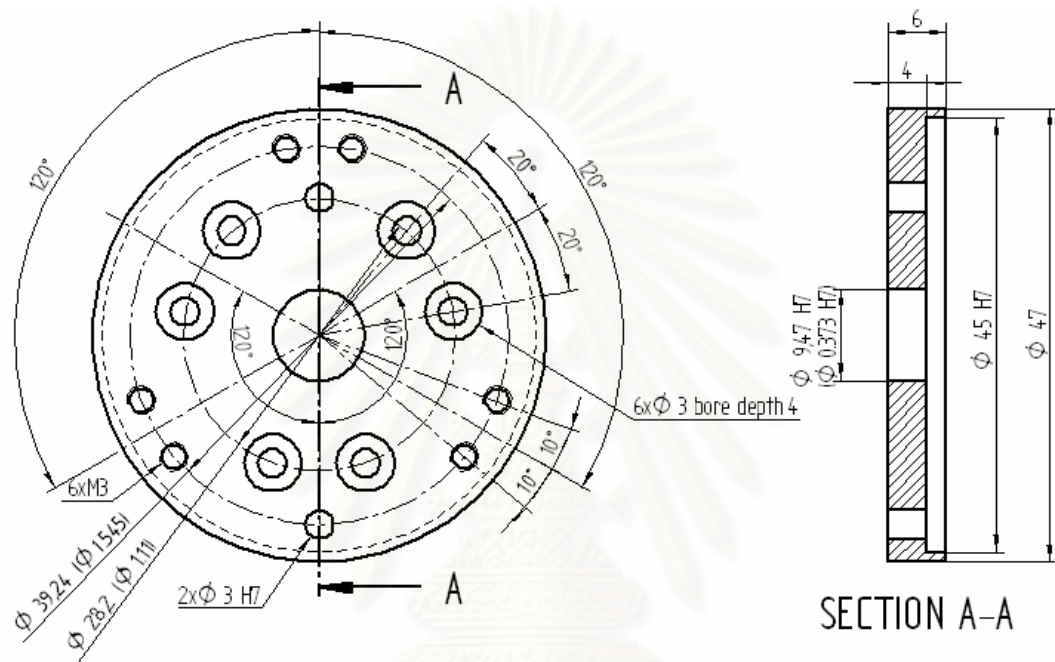
รูปที่ ข.12 หมุดสำหรับร้อยสายเคเบิล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.13 แผ่นประกบอุปกรณ์วัดแรงดันล่าง

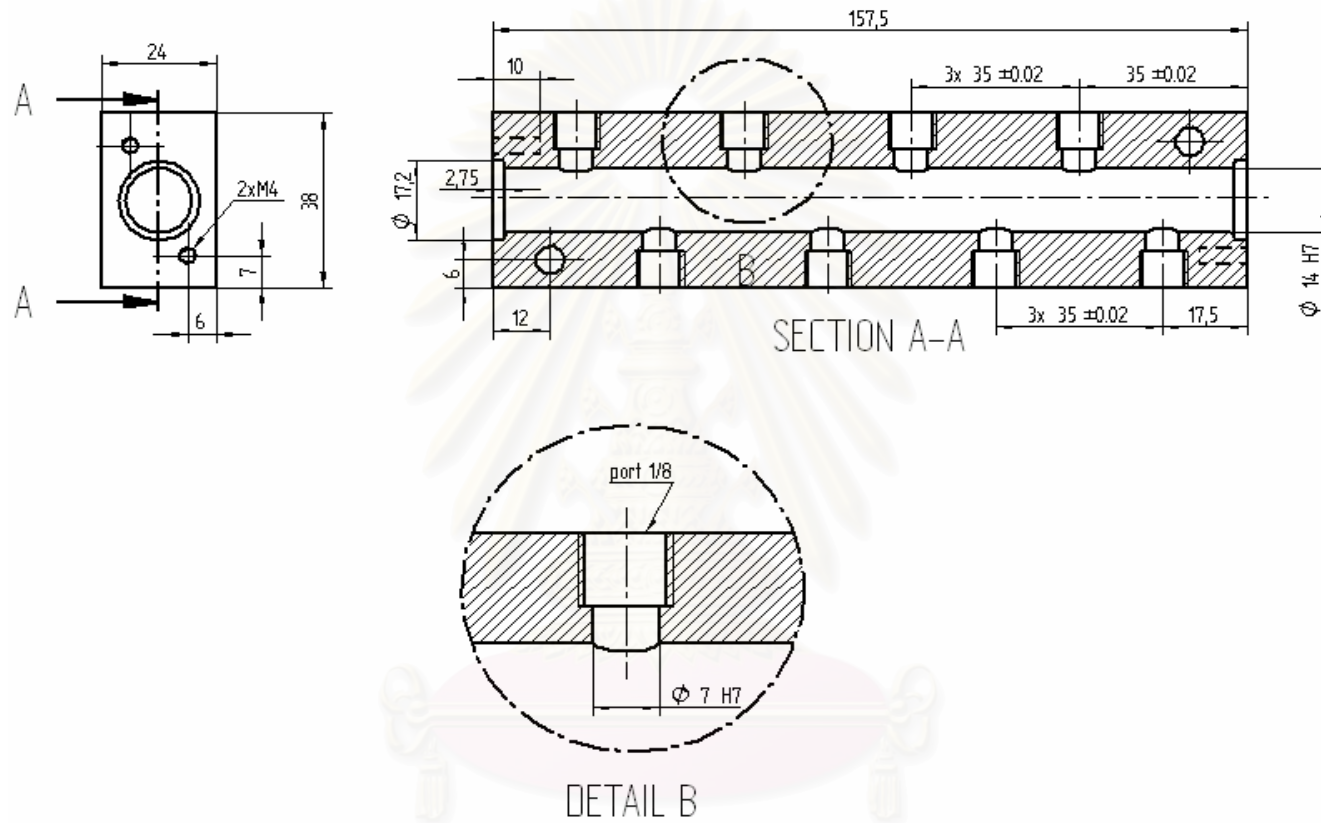
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.14 แผ่นประกอบอุปกรณ์วัดแรงดันบน

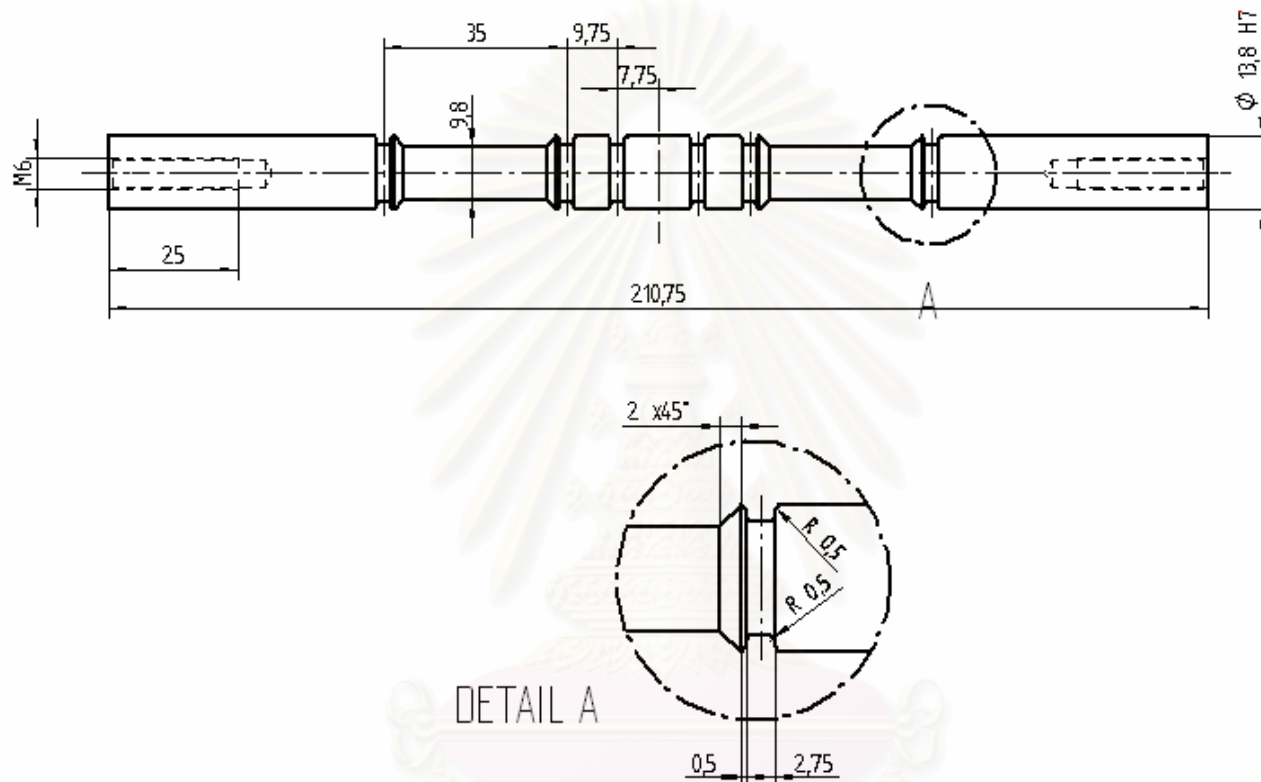
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ ข.16 เรือนวาล์วควบคุมการไหล

สถาบันวิจัยปฏิบัติการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.17 แกนवालควบคุมอัตราการไหล

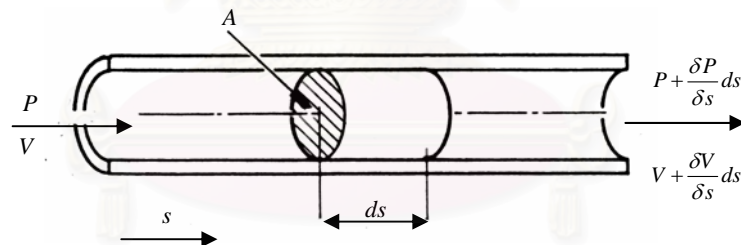
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.  
ทฤษฎีเพิ่มเติม

ในภาคผนวกนี้เป็นการกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลผ่านท่อ ซึ่งในงานวิจัยไม่ได้คำนึงผลจากการไหลผ่านท่อ เนื่องจากท่อลมในงานวิจัยมีความยาวไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ท่อลมมีความยาวมาก การไหลผ่านท่อจะมีผลต่อระบบรวม

ค.1 การจำลองผลของท่อลมในระบบ

การจำลองผลของท่อลมในระบบ ผลกระทบของท่อลมในระบบมี 2 อย่าง อย่างแรกคือ ความดันตกคร่อมระหว่างท่อลม ทำให้ลดอัตราการไหลของมวลผ่านท่อในสถานะอยู่ตัวและอย่างที่สองคือ รูปแบบการไหลที่ทางออกของท่อมีเวลาหน่วง ที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของ acoustic wave เป็นปรากฏการณ์การแพร่ของคลื่นความดันที่เกิดในการไหลแบบอัดตัวได้ผ่านความยาวท่อ สิ่งเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อช่วงการตอบสนองแบบชั่วคราวของกระบอกสูบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลผ่านท่อต้องมีรูปแบบในการคำนวณไม่ซับซ้อนจนเกินไปนัก เนื่องจากต้องการคำนวณแบบจำลองนี้ขณะทำงานจริงซึ่งตรงกับงานวิจัย [15] สมการการไหลผ่านท่อกลมจะเริ่มจากสมการพื้นฐานที่เป็นแบบจำลองของระบบในรูปแบบที่ ค.1



รูปที่ ค.1 แสดงปริมาตร  $ds$  ของการไหลแบบอัดตัวได้ในท่อ

พิจารณาปริมาตร  $ds$  ของการไหลผ่านท่อ ปริมาณการไหลสุทธิในหนึ่งหน่วยเวลาเท่ากับการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตร คือ

$$\rho u A_t - \rho A_t \left( u + \frac{\partial u}{\partial s} ds \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho A_t) ds \quad (c.1)$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A_t) ds = - \frac{\partial}{\partial s} (\rho u A_t) ds \quad (c.2)$$



โดยที่  $P$  เป็นความดันตลอดความยาวท่อ,  $u$  เป็นความเร็วในการไหล,  $\rho$  เป็นความหนาแน่น,  $c$  เป็นความเร็วเสียง,  $s$  เป็นโคออดิเนตของท่อลม, และ  $A_t$  เป็นพื้นที่หน้าตัดในการไหล จากสมการที่ (c.2) หอนุพันธ์จะได้

$$A_t \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial A_t}{\partial t} = - \left( u A_t \frac{\partial \rho}{\partial s} + \rho A_t \frac{\partial u}{\partial s} + \rho u \frac{\partial A_t}{\partial s} \right) \quad (c.3)$$

สมมติให้พื้นที่หน้าตัดในการไหลคงที่ตลอดความยาวท่อสมการที่ (c.3) ลดรูปเหลือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left( u \frac{\partial \rho}{\partial s} + \rho \frac{\partial u}{\partial s} \right) \quad (c.4)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในท่อ หาได้จาก bulk modulus

$$d\rho = \frac{\rho}{\beta} dP \quad (c.5)$$

หอนุพันธ์ของสมการ (3.21) เทียบเวลาและระยะทางจะได้สมการ (c.6) และ (c.7) ตามลำดับ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho}{\beta} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (c.6)$$

และ

$$\frac{\partial \rho}{\partial s} = \frac{\rho}{\beta} \frac{\partial P}{\partial s} \quad (c.7)$$

แทนสมการ (c.6), (c.7) ลงใน (c.5) ได้

$$\frac{1}{\beta} \frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{u}{\beta} \frac{\partial P}{\partial s} - \frac{\partial u}{\partial s} \quad (c.8)$$

ในระบบนิวเมติกความเร็วเฉลี่ยในการไหล  $u$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วเสียงดังนั้นเทอม

$-\frac{u}{\beta} \frac{\partial P}{\partial s}$  สามารถละทิ้งได้ และความสัมพันธ์ความเร็วเสียงกับค่า bulk modulus

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad (\text{c.9})$$

สมการ (c.8) ลดรูปเป็น

$$\frac{\partial u}{\partial s} = -\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (\text{c.10})$$

ซึ่งก็คือสมการ continuity พิจารณาผลต่างความดันของด้านทั้งสองด้านของปริมาตร  $ds$

$$P - \left( P + \frac{\partial P}{\partial s} ds \right) = \Delta P = \frac{F}{A_r}$$

$$F = -A \frac{\partial P}{\partial s} ds \quad (\text{c.11})$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม  $M_r$  สำหรับปริมาตร  $ds$  เป็น

$$F = \left( \frac{d}{dt} M_r \right) = \frac{\partial}{\partial s} (\rho A u^2) dx + \frac{\partial}{\partial t} (\rho u A) dx \quad (\text{c.12})$$

จากสมการที่ (c.11), (c.12) และสมมุติฐานว่าพื้นที่หน้าตัดของการไหลคงที่ตลอดความยาวท่อ

$$-\frac{\partial P}{\partial s} = u^2 \frac{\partial \rho}{\partial s} + \rho \frac{\partial u^2}{\partial s} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{c.13})$$

แทนค่าจากสมการ (c.6) และ (c.7)

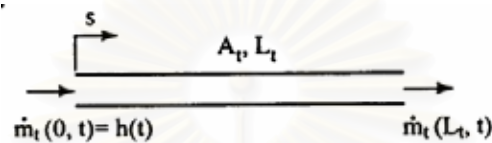
$$-\left( 1 + \frac{u^2 \rho}{\beta} \right) \frac{\partial P}{\partial s} = 2u\rho \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{uP}{\beta} \frac{\partial P}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{c.14})$$

และจากสมมุติฐาน ความเร็วในการไหล  $u$  มีค่าน้อยกว่าความเร็วเสียงมาก สมการ (c.14) ลดรูปเหลือ

$$-\frac{\partial P}{\partial s} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (c.15)$$

ซึ่งก็คือ สมการโมเมนตัม สมการ (c.15) ยังไม่รวมผลของความดันตกคร่อมจากความเสียดทานการไหล  $\Delta P = R_t u$  โดย  $R_t$  เป็นความเสียดทานที่เกิดขึ้นในท่อ ดังนั้นสมการโมเมนตัมที่สมบูรณ์คือ

$$\frac{\partial P}{\partial s} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} - R_t u \quad (c.16)$$



รูปที่ ค.2 แสดงการไหลในท่อโดยมีรูปแบบการไหลที่ทางเข้า  $\dot{m}_t = h(t)$ , พื้นที่หน้าตัดท่อ  $A_t$ , ท่อยาว  $L_t$

จากสมการ (c.10) และ (c.16) แทนสมการอัตราการไหลของมวลผ่านท่อ  $\dot{m}_t = \rho A_t u$

$$\frac{\partial P}{\partial s} = -\frac{1}{A_t} \frac{\partial \dot{m}_t}{\partial t} - \frac{R_t}{\rho A_t} \dot{m}_t \quad (c.17)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_t}{\partial s} = -\frac{A_t}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (c.18)$$

หาอนุพันธ์เทียบเวลา (t) ของสมการ (c.3) และอนุพันธ์ของ  $s$  ของสมการ (c.4) จะได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{\partial^2 \dot{m}_t}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \dot{m}_t}{\partial s^2} + \frac{R_t}{\rho} \frac{\partial \dot{m}_t}{\partial t} = 0 \quad (c.19)$$

สมการที่ (c.5) สามารถหาผลเฉลยโดยสมมุติให้ผลเฉลยอยู่ในรูปแบบ

$$\dot{m}_t(s, t) = \phi(t) v(s, t) \quad (c.20)$$

$\phi(t)$  และ  $v(s, t)$  เป็นฟังก์ชันที่กำหนดขึ้นใหม่ ผลเฉลยของสมการ (c.5) คือ  $\dot{m}_t(s, t)$  อยู่ในรูปการคอนโวลูชันของ  $\phi(t)$  และ  $v(s, t)$  แทนสมการ (c.6) ลงในสมการที่ (c.5)

$$\phi \frac{\partial v^2}{\partial t^2} - c^2 \phi \frac{\partial v^2}{\partial s^2} + \left( \phi \frac{R_t}{\rho} + 2\phi' \right) \frac{\partial v}{\partial t} + \left( \phi' \frac{R_t}{\rho} + \phi'' \right) v = 0 \quad (c.21)$$

เพื่อลดความซับซ้อนของสมการที่ขึ้นกับ  $v$  เราจะเลือกสมการของ  $\phi(t)$  ให้อยู่ในรูปที่เมื่อแทนกลับลงในสมการที่ (c.21) แล้วทำให้เทอมอนุพันธ์อันดับหนึ่งหายไป [13]

$$2\phi' + \phi \frac{R_t}{\rho} = 0 \quad (c.22)$$

ซึ่งมีผลเฉลยเป็น

$$\phi(t) = e^{-(R_t/2\rho)t} \quad (c.23)$$

ดังนั้นสมการสำหรับ  $v$  ที่เหลืออยู่คือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c^2 \phi \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + \frac{R_t^2}{4\rho^2} v = 0 \quad (c.24)$$

ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ dispersive hyperbolic equation.[13] เป็นสมการที่อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านไปตามท่อลม เทอม  $(R_t^2/4\rho)v$  เป็นสมการอธิบายการแพร่ของคลื่น (acoustic wave) ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากท่อลมที่ใช้ในงานวิจัยมีความยาวไม่มากนัก ดังนั้นจึงสามารถตัดผลของการแพร่ของคลื่นผ่านท่อลมออกไปได้ ดังนั้นสมการ (c.24) จะลดรูปเหลือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c^2 \phi \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} = 0 \quad (c.25)$$

สมการนี้จะอยู่ในรูปของสมการคลื่น 1 มิติ และสามารถหาผลเฉลยได้โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต สมมติให้ไม่มีการไหลผ่านท่อที่เวลาเริ่มต้นและการไหลที่ต้นท่อเป็นฟังก์ชันใดๆ  $h(t)$  และไม่มีผลจากกระบอกสูบที่ต่อกับปลายท่อ สมการเงื่อนไขข้างต้นคือ

$$v(s, 0) = 0; \frac{\partial v}{\partial t} = 0; v(0, t) = h(t) \quad (c.26)$$

ซึ่งทำให้ได้ผลเฉลยเป็น

$$v(s,t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < s/c \\ h\left(t - \frac{s}{c}\right) & \text{if } t > s/c \end{cases} \quad (\text{c.27})$$

คลื่นที่ทางเข้าจะเดินทางถึงปลายท่อในคาบเวลา  $\tau = L_t/c$  โดยที่  $L_t$  คือ ความยาวของท่อ แทน  $t$  ด้วย  $L_t/c$  และแทน  $\rho = P/RT$  ลงในสมการ (c.23) จะกลายเป็น

$$\phi(t) = e^{-(R_t RT/2P)L_t/c} \quad (\text{c.28})$$

ความดัน  $P$  ในสมการเป็นความดันที่ปลายท่อ สมการอัตราการไหลเชิงมวลที่ปลายท่อ ( $s = L_t$ ) คือ

$$\dot{m}_t(L_t, t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < L_t/c \\ e^{-R_t RT/2P L_t/c} h\left(t - \frac{L_t}{c}\right) & \text{if } t > L_t/c \end{cases} \quad (\text{c.29})$$

สมการที่ (c.29) จะเป็นสมการที่ใช้หาอัตราการไหลเชิงมวลที่ปลายท่อสำหรับการไหลที่ต้นท่อใดๆ สมการจะแสดงถึงการลดลงของอัตราการไหลและเวลาหน่วงที่เกิดจากเวลาที่คลื่นใช้เวลาเดินทางจากต้นท่อสู่ปลายท่อ อย่างไรก็ตามสมการ (c.29) ไม่สามารถใช้ได้ในกรณีลมที่ไหลเข้าท่อที่มีความถี่สูง การต้านทานการไหลในท่อ หาได้จากสมการความดันตกคร่อมในท่อ

$$\Delta p = f \frac{L_t}{D} \frac{\rho u^2}{2} = R_t u L_t \quad (\text{c.30})$$

โดย  $f$  เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, และ  $D$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านใน สำหรับการไหลแบบ fully developed lamina  $f = 64/\text{Re}$   $\text{Re}$  เป็น Reynolds No. ความต้านทานของท่อจะเป็น [14]

$$R_t = \frac{32\mu}{D^2} \quad (c.31)$$

เมื่อ  $\mu$  เป็น dynamic viscosity ผลที่ได้นี้จะตรงกับงานวิจัย[15] ซึ่งขยายการวิเคราะห์เป็นการไหลแบบ turbulent ในท่อที่มีผิวเรียบ ความต้านทานการไหลจะคำนวณจากสมการของ Blasius

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad (c.32)$$

สมการความต้านทานการไหลสำหรับการไหลแบบ turbulent เป็น

$$R_t = 0.158 \frac{\mu}{D^2} Re^{3/4} \quad (c.33)$$

ในการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลจะคำนวณ Re ของลมที่ทางเข้าท่อ และคำนวณความต้านทานจากสมการ (c.31) หรือ (c.33) ตามความเหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16  
14-16 ตุลาคม 2545 จังหวัดภูเก็ต

การศึกษาและพัฒนาหุ่นยนต์โคโบติกแบบของไหล  
**A Study and Development of Fluid Cobot**

อ.ดร. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ และ นาย ศุภพน จันทรพัฒน์  
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889 E-mail: [Supapon.C@student.chula.ac.th](mailto:Supapon.C@student.chula.ac.th)

Witaya Wannasuphoprasit and Supaphon Chanphat  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn  
University  
Payatai Rd. Patumwan Bangkok 10330, Thailand,  
Tel : (662)0-2218-6610-1 Fax : 0-2252-8889 E-mail: [Supapon.C@student.chula.ac.th](mailto:Supapon.C@student.chula.ac.th)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทคัดย่อ

หุ่นยนต์โคโบตแบบของไหล (A fluid cobot) เป็นหุ่นยนต์รูปแบบใหม่ ซึ่งจะพัฒนาโดยใช้ระบบของไหล เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแกนเจเนอรัลไลส์ (Generalize Coordinate) ของโคโบต ในโคโบตตัวนี้ อุปกรณ์แบ่งจ่ายอัตราการไหลจะทำหน้าที่ในการแบ่งจ่ายของไหลระหว่างอุปกรณ์ต้นกำลัง เป็นการทำหน้าที่เช่นเดียวกับข้อต่อโคโบตที่ผ่านมา ในงานวิจัยชิ้นนี้จะสร้างโคโบตแบบของไหลด้วยระบบนิวเมติก ซึ่งจะศึกษาพฤติกรรมของวาล์ว กระบอกลม และความไม่เป็นเชิงเส้นของลมเพื่อนำมาประกอบการสร้างโคโบต ในการทดสอบการทำงาน จะทำการสร้าง x-y โคโบตด้วยระบบของไหล และทำการทดสอบประสิทธิภาพของโคโบตในสภาพแวดล้อมเสมือนจริง (Virtual Environment)

## Abstract

A fluid cobot is a new type of cobot. The cobot is developed by using fluid system to produce constraint between motion in each generalized coordinate of cobot. The flow rate divider was used to the diving flow rate between fluid actuators. This acts like a conventional cobotic joint. In this paper, we propose pneumatic system applied to fluid cobot. A characteristic of valve, cylinder and nonlinearity of air was studied. The simple x-y pneumatic cobot and its controller were constructed. An experiment has been set up to test performance of pneumatic cobot in virtual environment.

## 1. บทนำ

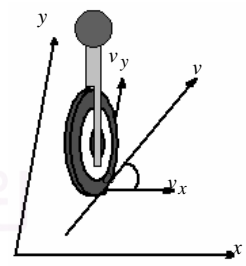
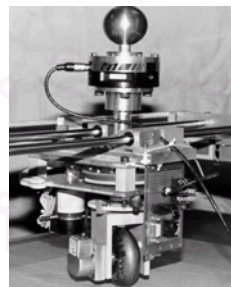
โคโบตจัดเป็นหุ่นยนต์รูปแบบใหม่ มีลักษณะเป็นอุปกรณ์ที่ไม่สามารถสร้างพลังงานกลขึ้นมาได้ด้วยตัวเอง (Passive Device) ซึ่งแตกต่างจากหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยทั่วไปที่ใช้ อุปกรณ์ต้นกำลังที่สามารถส่งกำลังขับให้กับหุ่นยนต์ได้ด้วยตัวมันเอง เช่น การใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนข้อต่อต่างๆ ของหุ่นยนต์ ซึ่งมีโอกาสเกิดความเสียหายได้ถ้าเกิดความผิดพลาดในระบบควบคุมหรือการที่มีสิ่งกีดขวางในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แต่ในกรณีของโคโบต การเคลื่อนที่ของโคโบตจะเกิดจากแรงที่

มนุษย์กระทำกับโคโบต ในขณะที่ตัวโคโบตเองจะทำหน้าที่เพียงกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวเองเท่านั้น ดังนั้นโคโบตจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเอง ประโยชน์หลักของโคโบต คือ โคโบตจะยังคงปลอดภัยถึงแม้ว่าจะเกิดปัญหาใดๆ ขึ้นกับระบบ ดังนั้นโคโบตจึงสามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ในพื้นที่การทำงาน (Work Space) เดียวกันได้อย่างปลอดภัย

ในปัจจุบันนี้โคโบตหลายรูปแบบถูกพัฒนาขึ้น[1] โคโบตแต่ละตัวจะใช้หลักการสร้างอัตราทดระหว่างแต่ละข้อต่อของโคโบต โคโบตตัวแรกที่ถูกพัฒนาขึ้น คือ ยูนิไซเคิลโคโบต (Unicycle Cobot) โคโบตตัวนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงและทดสอบหลักการของโคโบต หลังจากนั้นสก็อตเตอร์โคโบตถูกพัฒนาขึ้นจากยูนิไซเคิลโคโบต และสามารถนำไปใช้กับงานจริงในอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์ ทั้งยูนิไซเคิลโคโบตและสก็อตเตอร์โคโบตจะทำงานอยู่ในพื้นราบ โคโบตทั้งสองจะใช้ล้อในการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ ซึ่งถือเป็นการปรับอัตราทดระหว่างความเร็วเชิงเส้นในการเคลื่อนที่ในแกน x และแกน y ดังภาพที่ 1 ซึ่งแสดงถึงการสร้างอัตราทดระหว่างความเร็วในแกน x ( $v_x$ ) และความเร็วในการเคลื่อนที่ในแกน y ( $v_y$ ) โดยการปรับมุมเลี้ยวของล้อ ( $\alpha$ ) ที่จะเห็นว่าล้อเป็นอุปกรณ์ที่สามารถปรับอัตราทดได้อย่างต่อเนื่อง (Continuously Variable Transmission ; CVT) มีความสัมพันธ์เป็น

$$\tan(\alpha) = \frac{v_y}{v_x}$$

(1)

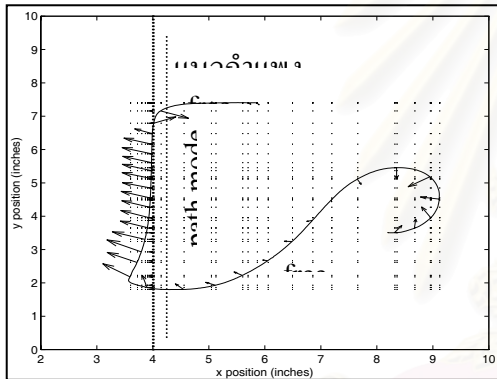


ภาพที่ 1 แสดงยูนิไซเคิลโคโบต [1]

การทำงานของยูนิไซเคิลโคโบตจะแบ่งเป็นสองแบบ คือ การเคลื่อนที่อิสระ (free mode) และการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด (path mode) ใน free mode หรือ ระบบควบคุมของ โคโบตจะปรับมุมเลี้ยวของล้อ ให้อยู่ในทิศทางเดียวกับแรง

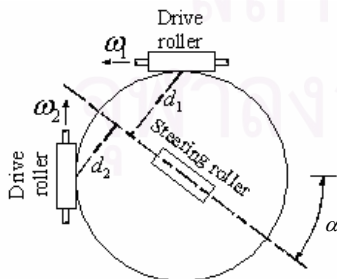
ที่ผู้ใช้กระทำ ทิศทางของแรงจะวัดได้จากอุปกรณ์วัดแรง (force sensor) ที่ติดอยู่กับตัวจับ ในการเคลื่อนที่แบบ path mode ระบบควบคุมจะปรับมุม steering ให้ล้อกลิ้งไปตามเส้นทาง (path) ที่ต้องการ

การใช้งานโคบอลต์แบบหนึ่งที่เป็นประโยชน์มาก คือ การสร้างกำแพงเสมือน (virtual wall) กำแพงเสมือนจะสร้างจากการใช้ path mode และ free mode ร่วมกัน เมื่อโคบอลต์อยู่นอกกำแพงเสมือน โคบอลต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระใน free mode แต่เมื่อโคบอลต์เคลื่อนที่เข้ามาถึงแนวกำแพง ระบบควบคุมจะเปลี่ยนการควบคุมเป็นแบบ path mode จนกระทั่งอุปกรณ์วัดแรงตรวจวัดได้ว่า แรงที่ผู้ใช้กระทำมีทิศทางตั้งฉากจากกำแพง ตัวควบคุมจะเปลี่ยนการควบคุมจาก path mode ไปเป็น free mode ยอมให้ผู้ใช้ดึงโคบอลต์ออกจากแนวกำแพง



ภาพที่ 2 การสร้างกำแพงเสมือนด้วยไซเคิล [3]

จากนั้น C. Moore [1] ได้สร้าง CVT ด้วยทรงกลม (Spherical CVT) ซึ่งเป็น CVT ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุม สามารถนำไปใช้ในกรณีที่โคบอลต์มีลักษณะเป็นแขนกล



ภาพที่ 3 CVT แบบทรงกลม [1]

ในภาพที่ 3 Spherical CVT จะประกอบไปด้วย drive roller ซึ่งเป็นล้อที่จะต่อเพลาออกไปใช้ในงาน follower roller จะเป็นล้อที่ใช้ระบองทรงกลมให้ยึดอยู่กับที่ และ steering roller จะมี 2 ตัวทางด้านหน้า (ล้อตรงกลาง) และด้านหลัง จะทำหน้าที่ในการปรับแกนหมุนของทรงกลม อัตราทดระหว่าง  $\omega_1$  กับ  $\omega_2$  จะขึ้นอยู่กับค่า  $d_1$  และ  $d_2$  และค่า  $d_1$  และ  $d_2$  นี้จะแปรผันกับ steering angle  $\alpha$  ตามความสัมพันธ์

$$\frac{d_2}{d_1} = \tan \alpha \Rightarrow \frac{\omega_2}{\omega_1} = \tan \alpha \quad (2)$$

ดังนั้นการปรับอัตราทดของ Spherical CVT จะทำได้โดยการปรับมุม steering ซึ่งก็คือการบิด steering roller นั้นเอง tetrahedral CVT ได้นำไปใช้ในการสร้างโคบอลต์ที่มีปริมาตรการทำงานเป็นสามมิติ (3D-Cobot)

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนิวเมติก

### 2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบอกกลม

แบบจำลองของกระบอกกลมจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นสมการพลวัตของลูกสูบที่จะรวมถึงก้านสูบและภาวะ ส่วนที่ 2 คือสมการแสดงการอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันในแต่ละห้องของกระบอกกลม สมการพลวัตของลูกสูบคือ

$$M\ddot{x}_p + B\dot{x}_p + F_f + F_L = P_l A_l - P_r A_r - P_a A_{rod} \quad (3)$$

โดยที่  $M$  เป็นมวลของลูกสูบ, ก้านสูบ และภาวะ,  $\beta$  เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบความหนืด (Viscous Coefficient),  $F_L$  เป็นแรงจากภายนอก,  $P_l$  และ  $P_r$  เป็นความดันในห้องสูบข้างซ้ายและขวาตามลำดับ.  $P_a$  เป็นความดันบรรยากาศ,  $A_l$  และ  $A_r$  เป็นพื้นที่หน้าของกระบอกสูบข้างซ้ายและขวา,  $x_p$  เป็นระยะการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ และ  $F_f$  เป็นแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์ [2]

$$F_f = \begin{cases} F_{sf} & \text{if } \dot{x}_p = 0 \\ F_{df} \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) & \text{if } \dot{x}_p \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

โดยที่  $F_{yf}$  เป็นแรงเสียดทานแบบสถิตย์ และ  $F_{df}$  เป็นแรงเสียดทานแบบพลวัต

สมการแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันในแต่ละห้องสูบจะนำมาจาก [2] สมการนี้จะมีพื้นฐานมาจาก สมการก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas), กฎทรงมวล และสมการพลังงาน โดยมีสมมุติฐานว่า ลมอัดเป็นก๊าซในอุดมคติและอุณหภูมิกับความดันเท่ากันทั้งห้องสูบ สมการดังกล่าวจะอยู่ในรูป

$$\dot{P} = \frac{RT}{V_0 + A\left(\frac{1}{2}L \pm x_p\right)} (\alpha_{in} \dot{m}_{in} - \alpha_{out} \dot{m}_{out}) - \alpha \frac{P}{V_0 + A\left(\frac{1}{2}L \pm x_p\right)} \dot{x}_p$$

โดยที่  $P$  เป็นความดันในห้องสูบ  $R$  เป็นค่าคงที่ของก๊าซ  $T$  เป็นอุณหภูมิ  $V_0$  เป็นปริมาตรที่ไม่มีผลต่อการทำงานของกระบอกสูบ  $L$  ระยะชักของกระบอกสูบ  $\dot{m}_{in}, \dot{m}_{out}$  เป็นอัตราการไหลเชิงมวลเข้าและออกจากห้องสูบ  $\alpha_{in}, \alpha_{out}, \alpha$  เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งใน [2] ใช้  $\alpha_{in}$  ไกล่กับค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (Ratio of Specific Heat ;  $k$ ) ใช้  $\alpha_{out}$  ไกล่กับ 1 และค่า  $\alpha$  ประมาณ 1.2

## 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของออริฟิต

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของออริฟิตจะนำมาจาก [2] คือ

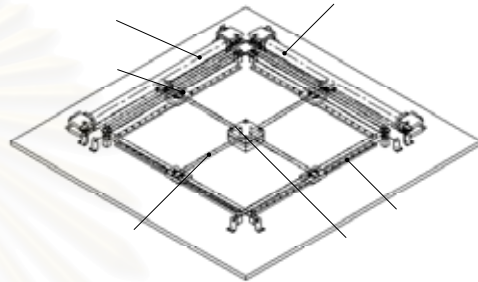
$$\dot{m} = \begin{cases} C_f A_v C_1 \frac{P_u}{\sqrt{T}} & \text{if } \frac{P_u}{P_d} \leq P_{cr} \\ C_f A_v C_2 \frac{P_u}{\sqrt{T}} \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{1/k} \sqrt{1 - \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{(k-1)/k}} & \text{if } \frac{P_d}{P_u} > P_{cr} \end{cases} \quad (5)$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k+1/k-1}}; C_2 = \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}}; C_f = C_c C_d \quad (6)$$

ในกรณีของอากาศค่า  $k = 1.4$  ทำให้  $C_1 = 0.040418$   $C_2 = 0.156174$   $P_{cr} = 0.528$  และ  $C_f$  คือ discharge coefficient,  $A_v$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของออริฟิต,  $P_u$  และ  $P_d$  เป็นความก่อนและหลังออริฟิต และ  $P_{cr}$  เป็นความดันวิกฤต (critical pressure) จากสมการที่ 5 จะเห็นสามารถควบคุมอัตราการไหลผ่านออริฟิตได้โดยการควบคุมพื้นที่หน้าตัดของออริฟิต ซึ่งนำไปใช้ในการควบคุมการแบ่งจ่ายอัตราการไหลให้กับกระบอกสูบได้

## 3. โคบอลต์แบบของไหล

โคบอลต์ที่จะสร้างในงานวิจัยนี้ จะเป็นโคบอลต์ที่มีพื้นที่การทำงานในระนาบแบบเดียวกับยูนิไซเคิลโคบอลต์ ในการสร้างระบบส่งกำลังแบบปรับอัตราทดต่อเนื่องด้วยระบบของไหล จะใช้กระบอกสูบนิวเมติกเป็นตัวส่งผ่านกำลังระหว่างแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามภาพที่ 4



รูปที่ 4 โคบอลต์แบบของไหล

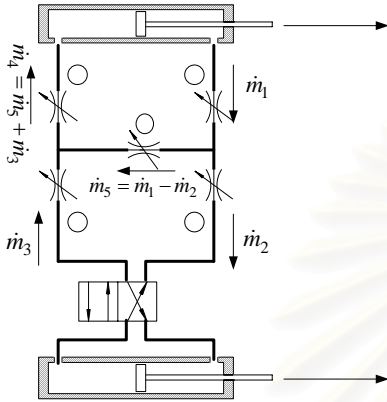
การสร้างอัตราทดระหว่างความเร็วในแกน  $y$  ( $v_y$ ) ต่อความเร็วในแกน  $x$  ( $v_x$ ) ตามสมการ 1 ของโคบอลต์ตัวนี้จะทำได้โดยควบคุมการแบ่งจ่ายของไหลและบังคับทิศทางการไหลระหว่างห้องสูบของกระบอกสูบในแนวแกน  $x$  และในแนวแกน  $y$  ซึ่งจะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ดังกรณีต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การเคลื่อนที่อยู่ในแนวแกน  $x$  หรือแนวแกน  $y$  การควบคุมแบบนี้จะทำได้ง่าย ๆ โดยการต่อท่อลมระหว่างห้องสูบกันเองของกระบอกสูบในแกนใดแกนหนึ่ง ส่งผลให้กระบอกสูบสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ส่วนที่เหลืออีกแกนหนึ่งนั้นจะปิดท่อลมทั้งสองห้องสูบจะเป็นการบังคับให้กระบอกสูบเคลื่อนที่ไม่ได้ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของ โคบอลต์จะมีอัตราทดเป็น 1:0 หรือ 0:1 หรือมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $x$  หรือแนวแกน  $y$  เพียงแนวเดียวเท่านั้น

กรณีที่ 2 สำหรับเส้นทางการเคลื่อนที่มีอัตราทดเป็น 1:1 หรือ 1:-1 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ในกรณีนี้จะต่อสายจากกระบอกสูบในแนวแกน  $x$  เชื่อมกับกระบอกสูบในแนวแกน  $y$  ถ้าต่อแบบไขว้สายจะได้อัตราทดเป็น 1:1 และถ้าไม่ไขว้สายจะได้อัตราทดเป็น 1:-1



กรณีนี้ 3 อัตราการไหลที่มีค่านอกเหนือจากสองกรณีข้างต้น จะต้องการแบ่งจ่ายของไหลระหว่างห้องสูบต่างๆ ของ กระทบสูบทั้งสองให้ถูกต้อง ซึ่งจะทำให้โดยการติดตั้งออร์ฟิต เพื่อควบคุมอัตราการไหลระหว่างกระทบสูบเป็นไปตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงการควบคุมการไหลของของไหลระหว่าง กระทบสูบเพื่อสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ของโคบอลต์

จากภาพที่ 5 อัตราการไหลเชิงมวล  $m_1$  จะไหลออกจาก ห้องสูบทางซ้ายมือของกระทบสูบในแนวแกน x ในกรณีนี้ ออร์ฟิตตัวที่ 1, 3 และ 4 จะเปิดเต็มที่เสมือนการไหลผ่านท่อ ตามปกติ ออร์ฟิตตัวที่ 2 และ 5 จะปรับพื้นที่ของออร์ฟิต เพื่อ แบ่งอัตราการไหลไปสู่กระทบสูบของแกน y และของไหลส่วน หนึ่งจะไหลผ่านออร์ฟิตตัวที่ 5 โดยที่  $m_5 = m_1 - m_2$  ของไหลที่ ไหลผ่านออร์ฟิตตัวที่ 5 จะไหลมารวมกับ  $m_3$  ที่ออกจากห้อง สูบของกระทบสูบในแกน y ได้เป็น  $m_4 = m_5 + m_3$  กลับเข้าสู่ ห้องสูบทางซ้ายมือของกระทบสูบในแนวแกน x เป็นการ บังคับให้กระทบสูบในแนวแกน x เคลื่อนที่ได้มากกว่ากระทบ สูบในแนวแกน y นั่นคืออัตราทดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1:0 กับ 1:1 ดังนั้นการควบคุมอัตราทดของระหว่าง  $v_x$  และ  $v_y$  จะทำ ได้โดยการควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลระหว่างกระทบสูบของ แกน x และ y และการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของกระทบ สูบทั้งสองให้มีทิศทางเดียวกันหรือสวนกันด้วยการเพิ่มวาล์ว 4/2 เพื่อไขว้สายของไหล

เนื่องจากการแบ่งอัตราการไหลจะต้องแบ่งอัตราการไหล จากมาก แบ่งไปสู่กระทบสูบที่มีการไหลน้อย ดังนั้นการแบ่ง

ช่วงของการควบคุมจึงต้องพิจารณาถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ ในแต่ละแนวแกนด้วย เช่น ในช่วงที่อัตราทดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1:0 กับ 1:1 กระทบสูบในแกน x จะมีความเร็วในการ เคลื่อนที่มากกว่าแกน y (อัตราการไหลจะกระทบสูบใน แนวแกน x จะมากกว่าแกน y) ดังนั้นการแบ่งอัตราการไหล จะต้องแบ่งปริมาณของไหลที่ออกจากรับสูบในแนวแกน x ส่วนหนึ่งกลับเข้าสู่ห้องสูบอีกห้องหนึ่งของกระทบสูบใน แนวแกน x เอง และที่เหลือจึงจ่ายให้กับกระทบสูบในแนวแกน y

โดยสรุปการควบคุมอัตราทดช่วงต่างๆ จะมีความสัมพันธ์ กับอัตราการไหลดังต่อไปนี้

- ช่วงอัตราทดระหว่าง 1:0 ถึง 1:1 ( $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ ) การควบคุม อัตราทดจะทำให้จากการปรับอัตราส่วน  $\frac{m_5}{m_3}$  ตามความสัมพันธ์

$$\tan(\alpha) = \frac{v_y}{v_x} = \frac{1}{1 + \frac{m_5}{m_3}} \quad (7)$$

วาล์ว 4/2 จะอยู่ในตำแหน่งไขว้สาย และ ถ้าทิศของ  $v$  อยู่ในค วอดแรนต์ที่ 1 ออร์ฟิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 2 และ 5 ในขณะที่ตัว อื่นเปิดเต็มที่ หรือ ถ้าทิศของ  $v$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 3 ออร์ฟิต ที่ทำงานคือ ตัวที่ 3 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่

- ช่วงอัตราทดระหว่าง 1:1 ถึง 0:1 ( $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) จะได้ ความสัมพันธ์

**X-axis Cylinder**

$$\tan(\alpha) = \frac{v_y}{v_x} = 1 + \frac{m_5}{m_1} \quad (8)$$

วาล์ว 4/2 จะอยู่ในตำแหน่งไขว้สาย และ ถ้าทิศของ  $v$  อยู่ในค วอดแรนต์ที่ 1 ออร์ฟิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 4 และ 5 ในขณะที่ตัว อื่นเปิดเต็มที่ หรือ ถ้าทิศของ  $v$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 3 ออร์ฟิต ที่ทำงานคือ ตัวที่ 1 และ 4 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่

- ช่วงอัตราทดระหว่าง 0:1 ถึง 1:-1 ( $90^\circ < \alpha < 135^\circ$ ) จะได้ ความสัมพันธ์

$$\tan(180^\circ - \alpha) = \frac{v_y}{v_x} = 1 + \frac{m_5}{m_1} \quad (9)$$

วาล์ว 4/2 จะอยู่ในตำแหน่งต่อตรง และ ถ้าทิศของ  $v$  อยู่ในค วอดแรนต์ที่ 2 ออร์ฟิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 1 และ 5 ในขณะที่ตัว

อื่นเปิดเต็มที่ หรือ ถ้าทิศของ  $v$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 4 ออริฟิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 4 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่

4) ช่วงอัตราทดระหว่าง 1:-1 ถึง 1:0 ( $135^\circ < \alpha < 180^\circ$ ) จะได้ความสัมพันธ์

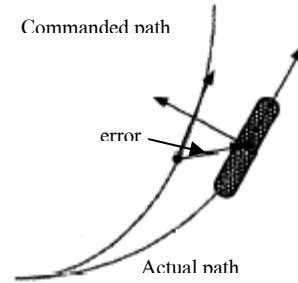
$$\tan(180^\circ - \alpha) = \frac{v_y}{v_x} = \frac{1}{1 + \frac{m_5}{m_3}} \quad (10)$$

วาล์ว 4/2 จะอยู่ในตำแหน่งต่อตรง และ ถ้าทิศของ  $v$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 2 ออริฟิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 3 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่ หรือ ถ้าทิศของ  $v$  อยู่ในควอดแรนต์ที่ 4 ออริฟิตที่ทำงานคือ ตัวที่ 2 และ 5 ในขณะที่ตัวอื่นเปิดเต็มที่

ในการควบคุมโคบอลจะเป็นการควบคุมอัตราทดเพื่อให้โคบอลไหลไปตามกำแพง คือ การควบคุมให้มุม  $\alpha$  เท่ากับมุมของแนวเส้นสัมผัสของกำแพง ( $\beta$ ) ตัวอย่างเช่น การสร้างกำแพงเสมือนเป็นรูปวงกลม ซึ่งความชันของกำแพงที่ตำแหน่งต่างๆ จะเท่ากับ

$$\beta = 90^\circ \operatorname{sgn}(y) + \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (11)$$

โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นตำแหน่งของโคบอลบนแนวกำแพงเสมือน ดังนั้นหากโคบอลอยู่ในแนวกำแพงระบบควบคุมก็จะทำการปรับอัตราการไหลเพื่อควบคุมให้มุม  $\alpha$  เท่ากับมุม  $\beta$  หากสมมุติให้โคบอลอยู่ที่ตำแหน่ง  $x = 0.866, y = 0.5$  บนแนวกำแพงเสมือนที่เป็นวงกลมรัศมี 1 หน่วย ดังนั้นมุม  $\alpha = \beta = 120^\circ$  ซึ่งอยู่ในช่วงที่ 3) แทนสมการ 9 จะได้อัตราส่วน  $\frac{m_5}{m_1} = 0.732$  และวาล์ว 4/2 อยู่ในตำแหน่งต่อตรง แต่ในความเป็นจริงแล้วการเคลื่อนที่ของโคบอลจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ตามรูปที่ 6 ดังนั้นระบบควบคุมจึงต้องออกแบบให้สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนให้หมดไป ซึ่งอยู่ระหว่างทำการศึกษาและออกแบบระบบควบคุม



รูปที่ 6 ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด [3]

#### 4. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างโคบอลรูปแบบใหม่ คือ โคบอลที่ใช้ระบบของไหลในการส่งกำลัง คุณลักษณะเด่นของโคบอลแบบของไหล คือ สามารถนำไปสร้างโคบอลที่มีความซับซ้อนสูง ระดับความเสรีในการเคลื่อนที่ (degree of freedom) สูง และทำให้การประยุกต์ใช้งานหลากหลายยิ่งขึ้น แตกต่างจากโคบอลที่มีมาก่อนหน้านี้ ที่เป็นโคบอลที่ใช้ระบบแมคคานิคซึม ในการสร้าง CVT ซึ่งทำให้การออกแบบโคบอลที่มีความซับซ้อนสูงทำได้ยาก

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Peshkin, J.E. Colgate, C.A. Moore, W. Wannasuphopsit, R.B. Gillespie, and P. Akella, "Cobot Architecture", IEEE Trans. Robot. Automat., vol.17, pp. 377-389, Aug. 2001.
- [2] E. Richer, and Y. Hurmuzlu, "A High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part I---Nonlinear Mathematical Model", J. of Dyn. Sys. Meas, Cont., vol. 122, pp. 416-425, Sep 2000
- [3] W. Wannasuphopsit, R.B. Gillespie, J.E. Colgate and M.A. Peshkin, "Cobot Control", IEEE conference. Robot. Automat., pp. 3571-3576, Apr. 1997.

## A Study and Develop of Fluid Cobot

Witaya Wannasuphprasit  
 Supaphon Chanphat

Mechanical Engineering Department  
 Faculty of Engineer  
 Chulalongkorn University  
 Phayathai Road, Bangkok 10330, Thailand  
 fmewwn@eng.chula.ac.th

### ABSTRACT

Cobots are a class of passive robotic devices that utilize steering joints to impose nonholonomic constraints on their joints. These steering joints are a subclass of transmission called *Continuous Variable Transmission, CVT*. Here we purpose to develop a cobot that utilizes a CVT joint based on flow rate divider of pneumatic actuators. We studied characteristics of a valve and a cylinder. We designed and built a multi channel flow divider. Further more, To test our concept we constructed a simple x-y pneumatic cobot.

### 1. INTRODUCTION

A cobot is a mechanically passive robotic device that designed to direct interact with human operator. Cobots utilize nonholonomic constraints to control ratio of their joint velocities. The most important element in cobot is the steerable joint. The Cobot steering joint is essentially a well-know mechanical transmission class , called *continuously variable transmission* or *CVT*.

In the past, many Cobot prototypes and architecture have been developed and purposed [1]. Each cobot utilizes two types of CVTs between their joints; wheel joint CVT and spherical joint CVT.

The first and simplest cobot is a unicycle cobot. This unicycle cobot was constructed to verify and evaluate cobotic concept. After that, a higher dimensional C space Cobot, nicknamed *Scooter* was developed. With a promising performance, the extended industrial prototype of scooter was applied to real world application in an assembly line of an automobile assembly plant.

Both a unicycle and scooter cobots have a planar task space that utilize wheel joint CVT that couples linear velocities.

Moore, C. A. proposed a spherical CVT that can adjust ratio between angular velocities. This type of CVT

is used in various types of cobot such as serial link cobots, a Gantry Cobot at Ford, and a 3DOF powered arm cobot [1].

All of the cobots mentioned above require a rigid mechanical element to couple each CVTs. For examples, Scooter uses a rigid floor and a 3 DOF powered cobot uses a circular plate. For this reason, designing a higher DOF cobot is a challenging task and limit to those rigid coupling elements.

In our work, we purpose to develop a fluid system as a novel steering joint for cobot. The main idea is to divide flow between actuators<sup>1</sup> while they are mechanically connected. One advantage of a fluid system is the flexible fluid line that enables complex design of higher dimensional C Space Cobots.

### 2. RELATED PNEUMATIC RESSEARCH

There are many researchers studied about pneumatic systems in a robotic field. Scavarda, Betemps and Jutard [2] proposed a modeling of a pneumatic PWM solenoid valve for engineering applications that show essential effects of solenoid valve and mass flow rate characteristic in PWM method. Ben-Dov and Salcudean [3] proposed a force-controlled in pneumatic actuator. They used flapper-valve to control mass flow rate in a cylinder chamber that relate to chamber pressure and force exerting on a piston rod. In 1996, Scavarda presented a nonlinear controller for pneumatic actuator [4] as well as an effect in a long rodless cylinder [5]. Vaughan and Gamble[6] also studied about nonlinearly modeling and simulation of a proportional valve. Varseveld and Bone[7] enhanced accuracy in positioning control by using PWM

<sup>1</sup> Non powered actuator



technique. This results in a high accuracy control strategy with a low price. Richer and Hurmuzlu [8] proposed nonlinear mathematic model of pneumatic system for general application.

**3 FLOW DIVIDER**

In developing a fluid cobot, A cobotic joint (or CVT) can be achieved by dividing flow rate between fluid actuators. For example, a fluid cobot can be simply construct by two cylinders as shown in Fig 1.

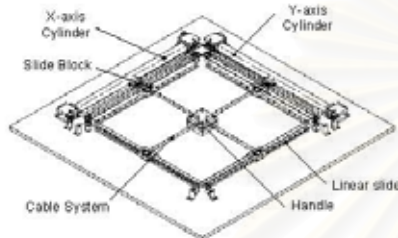


Figure 1: An example of x-y fluid Cobot

The motions of each axis are coupled directly to the pistons via a cable transmission. The cylinders are double acting. Both chambers of the cylinders are connected via a fluid line and flow divider valves. An schematic example of these connection is shown in Fig 2 and Fig 4 (see details below).

There are two dividing flow rate techniques between cylinders that we have been considered; PWM techniques and variable area orifice techniques.

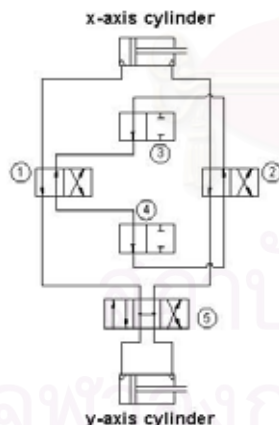


Figure 2.: A diagram using PWM technique

**3.1 PWM TECHNIQUE**

In PWM technique, solenoid valve switches pneumatic lines to divide flow rate between each line. The schematic is shown in Fig 2. Varseveld and Bone [7] increase linearity between control signal and flow diving by open and close some valves slightly ahead, to compensate for air nonlinearity and delay time on solenoid actuator. The diagram in Fig.3 describes the algorithm of flow diving. After pre-study we concluded that PWM technique is not suitable for our objective.



Fig.3 Valve diagram of the PWM technique. The figure 1-5 are valve number,  $F_x$  and  $F_y$  are a direction of force act on piston, X and Y are the motion of cylinder present only direction.

For example, when we implement a virtual wall with slope between  $0^\circ$ - $45^\circ$ . As shown in Fig.4.a, if a force applies in direction between  $90^\circ$ - $135^\circ$ , when the PWM switching between each cylinder, the user can penetrate the virtual wall. In other hand, we can view PWM technique as a high bandwidth programmable on-off brake.

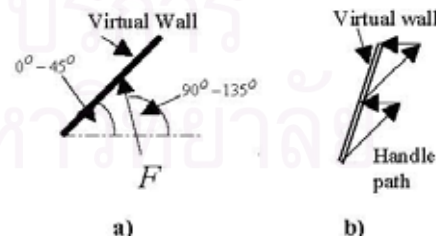


Fig. 4 A fail case of the PWM technique.

### 3.2 ORIFICE TECHNIQUE

The other approach for flow divider is variable area orifice. This method provides continuous and smooth flow without noise. If we apply orifice valves to the cobot shown in Fig 1, a transmission between x-axis velocity and y-axis velocity of the fluid cobot can be obtained by dividing flow between two cylinders. The motion of fluid cobot can be expressed in the following cases

For transmission ratio of zero or infinite, the motion in x-axis or y-axis can be simply controlled by connecting their left and right chambers together. While the other cylinder both chambers was kept close. The handle of fluid cobot can move in only x-direction or y-direction up to the connecting cylinder. Thus the transmission ratio in this case is 0:1 (move in x-direction only) or 1:0 (move in y-direction only).

For a motion that have transmission ratio = 1, the right chamber of the x-axis cylinder is connected to the left chamber of the y-axis cylinder and vice versa. The transmission will be -1, if the right chambers are connected together and the left chambers are also connected together.

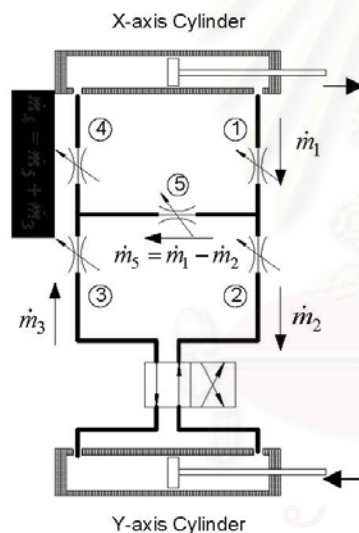


Fig.5 A schematic of flow in a fluid Cobot

For other ratios of transmission, orifice valves control flow rate between each chamber of the cylinders. A schematic of flow dividers of a fluid cobot is shown in Fig 5. There are five proportional valves and one 4/2 switching valve. For the purpose of explaining key operations, let ignore the nonlinearity, compressibility, and any loss of the fluid.

For transmission ratio between 0-1 or ( $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ , and  $180^\circ < \alpha < 225^\circ$ ) (here  $\alpha$ , transmission angle, is an angle measured from x-axis, where  $\tan(\alpha) = y/x$ ), The transmission ratio can be control by adjusting flow rate ratio of  $\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_3}$  and the transmission relation can be express as:

$$\tan(\alpha) = \frac{v_y}{v_x} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_3}}$$

Here the 4/2 valve is in the cross position. For  $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ , the orifice number 2 and 5 will be controlled. The rest of valves are fully opened. The orifice number 3 and 5 will used and other valves are fully opened, when  $180^\circ < \alpha < 225^\circ$ .

For transmission ratio from 1:1 to 0:1 ( $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ , and  $225^\circ < \alpha < 270^\circ$ ). The 4/2 valve is also in the cross position. The transmission ratio can be expressed by relation:

$$\tan(\alpha) = \frac{v_y}{v_x} = 1 + \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_1}$$

If transmission angle is in 1<sup>st</sup> quadrant  $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ , the orifice number 4 and 5 will be controlled, and the rest of valves are fully opened. Else if velocity direction is in the 3<sup>rd</sup> quadrant ( $225^\circ < \alpha < 270^\circ$ ), then we control orifice number 1 and 5.

The other transmission ratios and can be found in the similar manner with the 4/2 valve is in the straight position.

### 4 CONTINUOUS MULTI PORT PROPORTIONAL VALVE

As explained in Sec 3, in order control the flow rates (transmission) in all ratios, this requires several proposal valves and good switching control.

In order to reduce a complication of schematics and number of valves, we designed and developed a continuous multi port proportional valve (CMP valve). The CMP valve is consists of a spool (slider) and a valve body as displayed in Fig 7.

The valve body has 8 ports, called XL XR, YL, YR, R1, R2, R3, and R4 ports. The XL and XR ports are connected to the left and right chambers of the x cylinder. Also, the YL and YR ports are connected to the left and right chambers of the y cylinder. R1 to R4 are internal return ports that connected together as displayed in Fig 7.

The spool has two main grooves. Each groove is able to connect two adjacent ports. By control spool position we are able to control opening areas between two ports.

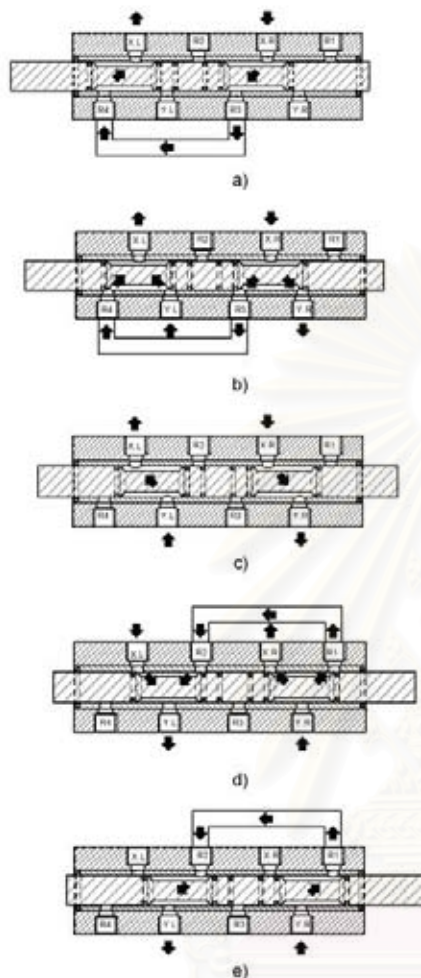


Fig 7: Continuous multi port proportional valve (CMP valve)  
 a)  $\alpha = 0^\circ$ , and  $\alpha = 180^\circ$  b)  $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ , and  $180^\circ < \alpha < 225^\circ$   
 c)  $\alpha = 45^\circ$  and  $\alpha = 225^\circ$  d)  $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ , and  $225^\circ < \alpha < 270^\circ$   
 e)  $\alpha = 90^\circ$  and  $\alpha = 270^\circ$

In Fig 7a, in this beginning position, the spool controls the transmission ratio to infinity (1/0). The device can only be moved in the x direction.

Once the spool position starts to move rightward as shown in Fig 7b. The opening area of Y1 increases but the YR. At the same time, both opening areas of R3 and R4 are decreased. The transmission ratio of the device will gradually change from infinity (1/0) to 1 (1/1), or the steering angle  $\alpha$  is changing from 0 to 45 deg and from 180 to 225 deg.

Once the spool is moved to the position as shown in Fig 7c, the transmission ratio is equal to 1 or  $\alpha = 45^\circ, 225^\circ$ .

From the position shown in Fig 7D, when the spool starts to move rightward, the opening area of Y1 and YR ports are continued to reduce while the opening area of R1 and R2 increase. The ratio is changed from 1 (1/1) to infinity (1/0), or the steering angle  $\alpha$  is changing from 45 to 90 deg and from 225 to 270 deg, and the ratio is infinity when the spool is in the end position in Fig 7e.

The relation of the transmission ratio and the spool position is displayed in Fig 8 below. The transmission ratio of the CMP valve is calculated based on the model purposed by McCloy and Martin[9]. For simplicity, we assume that the fluid is incompressible and pressure difference between upstream and downstream is constant.

In Fig 8, the vertical axis is the transmission angle and the horizontal axis is the spool position. Only transmission angle in the 1<sup>st</sup> quadrant is shown. The mirror 3<sup>rd</sup> quadrant has similar shape. Note that, at  $\alpha = 45^\circ$  the transmission ratio remain the same for some range of spool positions.

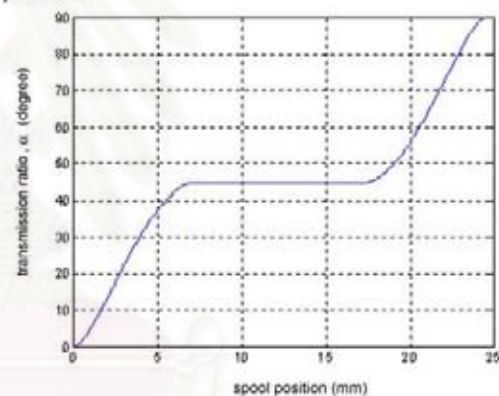


Fig 8: Graph displays Transmission angle and spool position of the CMP valve

The prototype of the CMP valve was constructed. The valve body is made from brass and the spool valve is made from stainless steel.

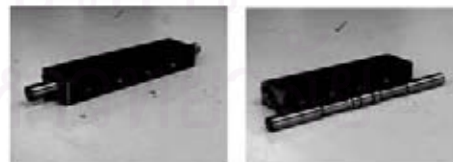


Fig 9: Picture of the CMP valve prototype



The CMP valve we developed only covers transmission angle range of 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> quadrant s ( $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  and  $180^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ ). Thus we purposely add a 4/2 valve to switch flow between YL and YR. The CMP valve together with 4/2 valve enable full transmission range of  $0 \leq \alpha \leq 360^\circ$ . The schematic diagram is shown in Fig 10.

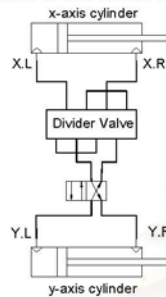


Fig 10: The diagram connection of CMP valve and a 4/2 valve

**5 COBOTIC TEST BED**

In order to explore our fluid cobotic concepts, we developed a two DOF cobotic test bed shown in Fig 11. The test bed consists of an square aluminum base plate, two identical double-acting/double-rod cylinders, x-y parallel rails, CMP Valve assembly, handle, intend sensor (not shown) and cable transmission.

The base plate supports all components. The x-y parallel rails are placed on top of the base. The handle is connected to the parallel rails by two sets of shafts and low friction sliding units. The handle can be move in x and y directions. The handle workspace is 30x30 cm. See Fig 11b. The cylinders and the valve assemble are hidden from the operator and attached on the bottom of the base. The cylinders are aligned in diagonal. The movement of the cylinder rods and x-y rail mechanism are connected together via cable transmissions. Four pulleys shown in Fig 11, divert the cables from bottom to the top of the plate.

We built a prototype of the x-y cobotic test bed. The picture of the prototype is displayed in Fig 12.

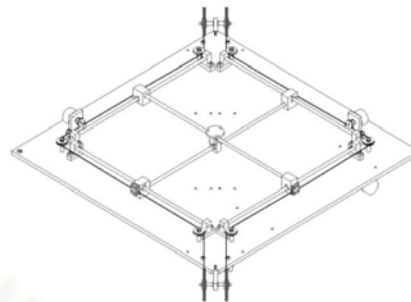


Fig 10a: Isometric top view of Fluid Cobotic Test bed

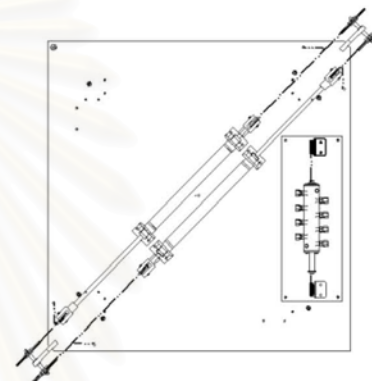


Fig 10b: Bottom view displayed two double rod cylinders and CMP valve

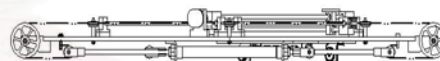


Fig 10c: side view of Fluid Cobotic Testbed

สงวนลิขสิทธิ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## A Novel Fluid Haptic Interface

W. Wannasuphprasit and S. Chanphat  
 Dept. of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University  
 Payatai Rd. Patumwan Bangkok 10330, Thailand  
 Phone: +66-2218-6610-1 Fax: +66-2252-2889  
 Email: wituya.w@eng.chula.ac.th

### Abstract

This paper proposed a novel method for developing a Haptic Interface based on a fluid system. This haptic device uses fluid flow dividers to control velocity relations between its generalized coordinates. Since, there is no power add to the system, the novel fluid haptic interface is intrinsically passive and thus safe to directly interact with human operator. We designed and developed a planar fluid haptic interface prototype. In addition, we reviewed characteristics of valve, cylinder and nonlinearity of air. The simulations of the device also included.

### 1. Introduction

A haptic interface is a device that lets a user touch, feel and manipulate a virtual environment. Haptic research has grown significantly more than a decade, which covers topics ranging from mechanical design to real-time simulation, to psychophysics and neurophysiology. Applications of haptic interface include teleoperation, virtual prototyping, computer-assisted surgery, human assisted guidance and virtual training.

A key feature of haptic device is an ability to implement virtual surfaces. Virtual surfaces are simulated constraint. Virtual surfaces have been proved to be a great tool to increase performance of human operator in several applications such as robot assisted surgery and assembly operation in an automobile plant [10].

Most of haptic devices are active systems that require high gain servo control and sizable actuators to create stiff virtual surfaces. However safety is a big concern because humans can induce instability in such systems [14].

### 2. Passive Haptic Interfaces

For reasons mentioned above, passive haptic interfaces have great appeal. Delnondedieu and Troccaz introduced "PADyC" [13]. PADyC is a manipulator using overrunning clutches. At each joint are two such clutches, each of which runs on a motor-driven drum. One drum rotates clockwise and the other counterclockwise. The rotational speeds of these drums determine the maximum clockwise and counterclockwise joint angular velocities that an operator can generate without engaging a clutch.

Thus, an operator is effectively speed-limited in the joint space. As in the example discussed above, however, limited directions of constraint are available so that achieving a smooth feel is an inherently difficult problem.

Controllable brake is a passive element that can build a passive interface. However, there are some shortcomings for virtual surface implementation. Brakes not conserve but absorb energy. In addition orientations of virtual surfaces are limited and in some configurations will result in a struck mechanism [10].

In 1996, Colgate, Peshkin, and Wannasuphprasit [12] introduced a novel concept and prototype of a nonholonomic haptic display, later called Cobot: Collaborative Robot. Unlike conventional active system that use actuated joints, Cobots employ steering joints. This device is energetically passive because Cobots redirect operator-applied forces and thus conserve momentum. Virtual surfaces implemented by cobots are smooth, hard, and frictionless. Later, several higher C-Space cobotic prototypes had been developed. These include Scooter Cobot [10], 3R Cobot [15], and Extreme Joystick Cobot [1]. Because of their great potentials, industrial prototypes were built to assist human operator in an automobile assembly plant [11].

### 3. Passive Constraints Through Fluid System

In this work, we propose to develop a fluid system as a novel approach to a passive haptic interface by generating passive constraints between its generalized coordinate. We instrument each motion with non-powered fluid actuators (such as pneumatic cylinder) and we control flow rate relation between these actuators while they are mechanically connected. One advantage of fluid system is the flexible fluid line that couple between actuators.

Before getting in more details, let us explain the general concepts through a prototype, being developed, shown in Fig 1. Refer to Fig 1, the fluid

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

haptic interface has two DOF. It consists of a x-y rail system, a flat base panel, two pneumatic cylinders, an handle, and flow divider system (not shown in the picture). There are two parallel linear slides in each axis. The pistons of x and y cylinders are connected to x-axis and y-axis sliding blocks, respectively.

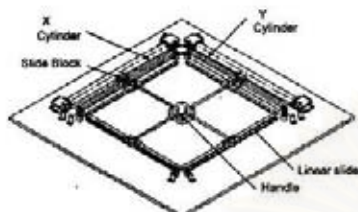


Fig.1 The x-y Fluid Passive Haptic Interface

The cylinders are double acting. Both chambers of the cylinders are connected via a fluid line and flow divider valves. Schematic examples of these connections are shown in Fig 3 and Fig 6 (see details below).

We can simply explain the operation of this device in two modes, free mode and constraint mode. In free mode, an operator can move the handle freely in x and y direction. This can be done easily by open all four chambers of both cylinders. Alternatively for each cylinder, the controller can connect left chamber to the right chamber (preferred).

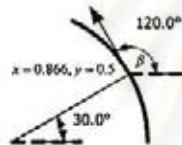


Fig.2 A circular path

In constraint mode, the operator will allow to be on a simulated path only. For example, in Fig 2, the device simulates a circular path. The flow rate in x and y cylinder will be controlled so that their velocity ratio ( $V_y/V_x$ ) equals to the current path tangent. The device splits flow rate to each cylinder by using flow dividers. Since there is no additional power added into the system, this fluid haptic interface is passive and suitable for safety critical task.

**4. Flow Divider**

As expressed in the last section, the most important element in the fluid haptic interface is the flow divider system. There are two dividing flow rate techniques between cylinders that we have been considered; PWM techniques and variable area orifice techniques.

**4.1 PWM technique**

In PWM technique, solenoid valve switches pneumatic line to divide flow rate between each lines. The schematic is shown in Fig.3. Varseveld and Bone [7] improved linearity between control signal and flow diving by opening and closing the valve slightly before and after to compensate for a delay in solenoid actuators.

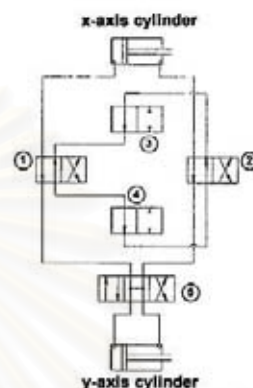


Fig.3 A diagram using PWM technique

The algorithm of flow diving is described by diagram in Fig.4. After pre-study we concluded that PWM technique is not suitable for our objective.



Fig.4 Valve diagram of the PWM technique. The number 1-5 is valve number,  $F_x$  and  $F_y$  are a direction of force act on piston, X and Y are the motion of cylinder present only direction.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



For example, when we implement a straight virtual wall with slope between  $0^\circ-45^\circ$ . As shown in Fig.5.a, if a force applies in direction between  $90^\circ-135^\circ$ , when the PWM is switching between each cylinder, the user can penetrate the virtual wall. In other ways, we can view PWM technique as a high bandwidth programmable on-off brake.

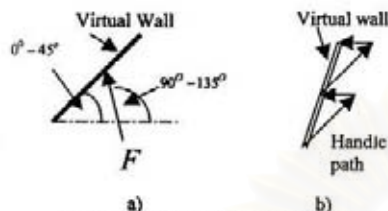


Fig.5 A fail case of the PWM technique.

4.2 The orifice technique

The other approach for flow divider is variable area orifice. This method provides continuous and smooth flow without noise. Consider Fig.6. If one pulls the x cylinder forward, air from x-axis cylinder right chamber will flow through orifice valve #2 and valve #5. Depending on the ratio of areas of these orifices, part of air will flow in the y-axis cylinder right chamber. The rest of air will bypass back to the x-cylinder left chamber. By controlling the ratio of orifice areas between two cylinders, we can effectively adjust a transmission ratio between both actuators.

5. System Modeling

There are many researchers studied about pneumatic systems in a robotic field. Scavarda, Betemps and Jutard[2] proposed modeling of a pneumatic PWM solenoid valve for engineering applications that shown essential effects of solenoid valve and mass flow rate characteristics in PWM method. Ben-Dov and Salcudean[3] proposed a force control in a pneumatic actuator. They used flapper-valve to control mass flow rate that flow into a cylinder chamber. In 1996, Scavarda presented a nonlinear controller for pneumatic actuator [4] as well as an effect in a long rodless cylinder [5]. Vaughan and Gamble[6] also studied about nonlinearly modeling and simulation of a proportional valve. Varseveld and Bone[7] enhanced in accuracy position control by using PWM technique that give a high accuracy control with a low cost.

The modelings of pneumatic system have been developed by many researchers. In this paper, most of models refer to work of Richer and Hurmuzlu [8]. Their models were proven that suitable for our research.

5.1 A Cylinder model

A Cylinder model is separated in two parts. The first part is a dynamic model of piston and the second part is rate

change of pressure in chambers. The dynamic model of piston in Fig.7 can be express as

$$M\ddot{x} + \beta\dot{x} + F_f + F_L = P_l A_l - P_r A_r - P_o A_{rod} \quad (1)$$

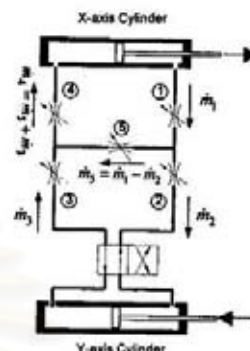


Fig.6 schematic of flow in Fluid Cobot

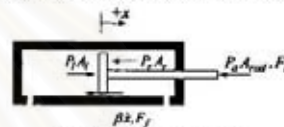


Fig.7 cylinder schematic

where  $M$  is all mass that include the piston mass and an external load,  $\beta$  is the viscous friction coefficient,  $F_L$  is an external force,  $P_l$  and  $P_r$  is the pressure in left and right chamber.  $P_o$  is the ambient pressure,  $A_l$  and  $A_r$  is the area of left and right chamber,  $x$  is the piston displacement, and  $F_f$  is the Coulomb friction which can be expressed as

$$F_f = \begin{cases} F_{sf} & \text{if } \dot{x} = 0 \\ F_{df} \operatorname{sgn}(\dot{x}) & \text{if } \dot{x} \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Here  $F_{sf}$  is the static friction and  $F_{df}$  is the dynamic friction. Richer and Hurmuzlu proposed the model of pressure in chamber based on three equations, ideal gas law, continuity equation, and energy equation. Other assumptions are: air is perfect gas, and pressure and temperature of air in each chamber are homogeneous. The final expression is

$$p = \frac{RT}{V_o + A\left(\frac{1}{2}L \pm x\right)} (\sigma_o \dot{m}_o - \sigma_{in} \dot{m}_{in}) - \alpha \frac{P}{V_o + A\left(\frac{1}{2}L \pm x\right)} \dot{x} \quad (3)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



where  $R$  is the gas constant,  $T$  is the ambient absolute temperature,  $V_{in}$  is the inactive volume at end of stroke,  $A$  is an area of piston,  $L$  is stroke length,  $\dot{m}_{in}$  and  $\dot{m}_{out}$  are mass flow rate in and out the chamber,  $\alpha_i, \alpha_{in}, \alpha_{out}$  are constant from experiment. Their values are between 1 to  $k$ . For the charging process, a value of  $\alpha_{in}$  should be close to  $k$ , but for discharging process the value of  $\alpha_{out}$  should be close to 1.

5.2 Proportional valve model

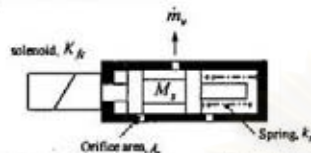


Fig.8 Schematic of a proportional valve

A model of Proportional valve is consists of spool model and mass flow rate equation through orifice. The schematic of solenoid valve is shown in Fig.8. By using current amplifier, the force of solenoid valve is proportional to given current. So the dynamic model of solenoid valve can be express as

$$M_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + F_f + k_s x_s = K_k i_s \tag{4}$$

where  $M_s$  is the spool valve mass,  $C_s$  is the viscous friction coefficient,  $k_s$  is the spring stiffness,  $K_k$  is the coil force coefficient,  $i_s$  is the coil current, and  $x_s$  is the spool displacement.

The model of orifice is refer to McCloy and Martin[9] that has been use in many papers. The model of mass flow rate  $\dot{m}_o$  is

$$\dot{m} = \begin{cases} C_f A_o C_1 \frac{P_u}{\sqrt{T}} & \text{if } \frac{P_u}{P_a} \leq P_{cr} \\ C_f A_o C_2 \frac{P_u}{\sqrt{T}} \left(\frac{P_u}{P_a}\right)^{1/4} \sqrt{1 - \left(\frac{P_u}{P_a}\right)^{(k-1)/k}} & \text{if } \frac{P_u}{P_a} > P_{cr} \end{cases} \tag{5}$$

where  $C_f$  is discharge coefficient,  $A_o$  is an orifice area,  $P_u$  is the upstream pressure,  $P_a$  is the down stream pressure,  $P_{cr}$  is the critical pressure,  $k$  is the ratio of specific heat ( $k=1.4$  for air), and

$$C_1 = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}}; C_2 = \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}}; C_f = C_c C_d$$

$$P_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$$

The area of orifice  $A_o$  is up to valve type that can be calculated from position of spool valve  $x_s$ .

5.3 Connecting tube model

There are two equations to describe characteristic of flow in a tube. The first one is continuity equation, expressed as

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \tag{5}$$

, and the momentum equation expressed as

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} - R_s u \tag{6}$$

These equations have presented by McCloy and Martin. The solution have been shown in Richer and Hurmuzlu work as

$$\dot{m}_o(L_1, t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < L_1/c \\ e^{-R_s R T / 2 P u L_1 / c} h\left(t - \frac{L_1}{c}\right) & \text{if } t > L_1/c \end{cases} \tag{7}$$

where  $L_1$  is tube length,  $h(t)$  is boundary condition at upstream of tube, and  $R_s$  is tube resistance. For laminar flow  $R_s$  can be expressed as

$$R_s = \frac{32\mu}{D^2} \tag{8}$$

For turbulence flow  $R_s$  is expressed as

$$R_s = 0.158 \frac{\mu}{D^2} Re^{0.25} \tag{9}$$

6. Characteristic of flow divider

In order to control transmission ratio of  $x$  and  $y$  motion (that effect to path slope  $\dot{\phi}/\dot{x}$  of fluid haptic interface), we need to control an area of each orifices. The characteristic of flow divider should be study. First we simulate the diving flow rate in system that shown in Fig.9. Assume that upstream and downstream pressure is a constant. By keeping the total area of orifices constant ( $A_{o1} + A_{o2} = \text{constant}$ ), we use the relation

$$A_{o1} = (1-r_o) A_{max} \tag{10}$$

$$A_{o2} = r_o A_{max} \tag{11}$$

where  $r_o$  is ratio of orifices area that vary from 0 to 1. In Fig.10 show a response of the ratio of orifices area respect to ratio of orifices area.

**7. Simulation result**

By the above mathematic models and the flow divide algorithm. We simulate the fluid haptic interface as shown in Fig.11.



Fig.9 flow rate dividing

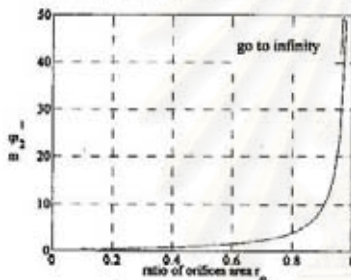


Fig.10 Relation between mass flow rate ( $m_2/m_1$ ) and ratio of orifices area

Some orifices are not used and neglect effect of them in the simulation. By giving, a force magnitude -5 N in x direction to the handle, the cylinders stroke is 450 mm, the ambient pressure is 101325 kPa, and the air in system is pressurized for a five time of ambient pressure. First we simulate with fixed area of both orifices where the second and the fourth orifices are fully opened, while the fifth orifice is closed. The result is shown in Fig.12.

The effective transmission ratio of this simulation is one. This handle moves in diagonal of the workspace with a constant slope.

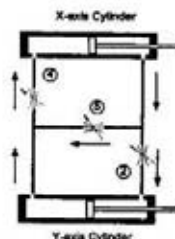


Fig.11 schematic of simulation system.

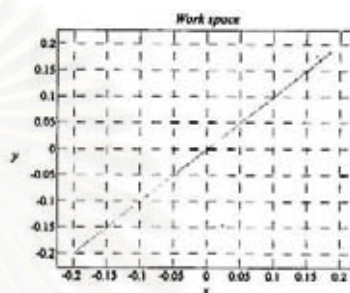


Fig.12 The result of 1st simulation.

In the second simulation, we use the varying area of orifices as explained in section 3. We vary ratio  $r_o$  of orifices (valve #2 and valve #5) as shown in Fig.13. The forth orifice is fully opened. The resulted trajectory of the second simulation is shown in Fig.14. Form this result, it is evident that, we can effectively control human trajectory by varying orifice areas to adjust transmission ratio between x and y motions.

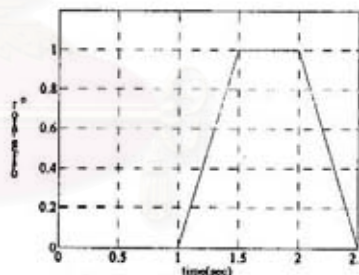


Fig.13 the orifice ratio respect to time

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

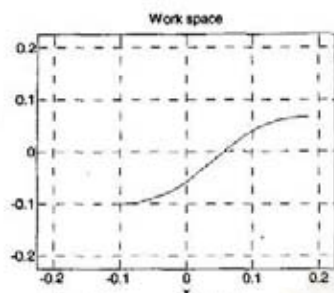


Fig.14 The result of 2nd response

### 8. Conclusions and Future Work

A new type of passive fluid haptic interface has been introduced. We utilize flow divider in pneumatic system to adjust transmission between its joints. The mathematic model was studied and used to simulate the characteristic of the device. A planar platform was designed and being constructed to investigate our algorithm and device's performance. This preliminary study suggested that this new method is a promising candidate for a passive class of human-robot interaction devices. Further study in nonlinearity of the air, coupling and bypass effects are on its way. The other type of fluid is also considered.

### References

- [1]. M.A. Peshkin, J.E. Colgate, C.A. Moore, W. Wannasuphosphit, R.B. Gillespie, and P. Akella, "Cobot Architecture", *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol.17, pp. 377-389, Aug. 2001.
- [2]. N. Ye, S. Scavarda, M. Betemps, and A. Jutard, "Model of a Pneumatic PWM Solenoid Valve for Engineer Application", *J. of Dyn. Sys. Meas. Con.*, vol. 114, pp. 680-686, Dec. 1992.
- [3]. D. Ben-Dov and S. E. Salcudean, "A Force-Controlled Pneumatic Actuator", *IEEE trans. Robot. Automa.*, vol. 11, pp. 906-911, Dec. 1995.
- [4]. E. Richard, and S. Scavarda, "Comparison Between Linear and Nonlinear Control of an Electropneumatic Servodrive", *J. of Dyn. Sys. Meas. Cont.*, vol. 118, pp. 245-252, Jun 1996.
- [5]. X. Lin, F. spettel, S. Scavarda, "Modeling and Test of an Electropneumatic Servo Valve Controlled Long Rodless Actuator", *J. of Dyn. Sys. Meas. Cont.*, vol. 118, pp. 457-462, Sep 1996.
- [6]. N.D. Vaughan, and J.B. Gamble, "The Model and Simulation of a Proportional Solenoid Valve", *J. of Dyn. Sys. Meas. , Cont.*, vol. 118, pp. 120-125, Mar 1996.
- [7]. R.B. van Varseveld, and G.M. Bone, "Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics.*, vol. 2, 195-204, Sep 1997.
- [8]. E. Richer, and Y. Hurmuzlu, "A High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part I—Nonlinear Mathematical Model", *J. of Dyn. Sys. Meas. Cont.*, vol. 122, pp. 416-425, Sep 2000.
- [9]. D. McCloy, and H.R. Martin, *Control of fluid Power : Analysis and Design*, John Wiley & sons., 1980.
- [10]. Wannasuphosphit, W., Akella, P., Peshkin, M., Colgate, J. E. *Cobots: A Novel Material Handling Technology*, J.E. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, ASME 98-WA/MH-2, 1998
- [11]. Wannasuphosphit, W., Gillespie, R. Brent, Colgate, J. E. and Peshkin, M. A., *Cobot Control*, 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, Vol. 4, pp. 3571-3576
- [12]. Colgate, J. E., M. A. Peshkin, and W. Wannasuphosphit, *Nonholonomic Haptic Display: 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis , Vol. 1, pp. 539-544.
- [13]. Delnondedieu, Y. and J. Troccaz. PADyC: a Passive Arm with Dynamic Constraints; a prototype with two degrees of freedom. *Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. Baltimore, Maryland. pp. 173-180, IEEE, 1995.
- [14]. Colgate, J. E. and J. M. Brown. Factors Affecting the Z-width of a Haptic Display. *International Conference on Robotics and Automation*. San Diego, CA. pp. 3205-10, IEEE R&A Society, 1994.
- [15]. Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions. C.A. Moore, M.A. Peshkin, and J.E. Colgate. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3249-3254, 1999

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภพน จันทร์พัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2521 เข้าศึกษาในระดับมัธยมที่โรงเรียนสามเสนวิทยาลัย หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือและสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2542 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย