

โปรแกรมช่วยสอนวิชากลศาสตร์เรื่องแรงเสียดทาน

COMPUTER ASSISTED INSTRUCTION FOR FRICTION IN  
MECHANICS



เดชชาติ วัฒนพานิช  
วรรณวิภา ศรีเลอจันทร์  
สุพรรณษา ทศพี้อง

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 43012  
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ย. 2545

.b.....
.i.....

ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์  
วิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2544

# COMPUTER ASSISTED INSTRUCTION FOR FRICTION IN MECHANICS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF MATHEMATICS AND COMPUTER SCIENCE  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2001

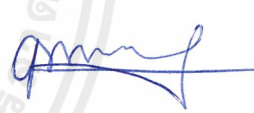



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปัญหาพิเศษ โปรแกรมช่วยสอนวิชาการศาสตร์เรื่องความเสียดทาน  
COMPUTER ASSISTED INSTRUCTION FOR FRICTION IN  
MECHANIC

ชื่อนักศึกษา นายเดชชาติ วัฒนพานิช 41051019  
นางสาววรรณวิภา ศรีเลอจันทร์ 41051042  
นางสาวสุพรรณษา ทศพี่น้อง 41051056

ภาควิชา คณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์  
สาขาวิชา คณิตศาสตร์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ภคคินี ชิตสกุล  
อาจารย์พรชัย เจนจิระพงศ์เวช

ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นำปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2544

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภคคินี ชิตสกุล	
กรรมการ อาจารย์พรชัย ชัยสนิท	
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ภคคินี ชิตสกุล	
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์พรชัย เจนจิระพงศ์เวช	



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพโรบลย์ พันธรัักษ์พงษ์)

หัวหน้าภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์

ลิขสิทธิของภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปัญหาพิเศษ	โปรแกรมช่วยสอนวิชากลศาสตร์เรื่องแรงเสียดทาน	
ชื่อนักศึกษา	นายเดชชาติ วัฒนพานิช	41051019
	นางสาววรรณวิภา ศรีเลอจันทร์	41051042
	นางสาวสุพรรณษา ทักพิน้อง	41051056
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
ภาควิชา	คณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์	
สาขาวิชา	คณิตศาสตร์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2544	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ภคินี ชิตสกุล	
	อาจารย์พรชัย เจนจิระพงศ์เวช	

### บทคัดย่อ

ในการศึกษาวิชากลศาสตร์ภาคสถิตยศาสตร์ในระดับอุดมศึกษา ภาพประกอบเนื้อหาส่วนใหญ่จะแสดงในมุมมอง 2 มิติแบบภาพนิ่ง ทำให้การศึกษาเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ในบางครั้งเป็นไปโดยลำบาก เพราะการแก้ปัญหาเรื่องแรงเสียดทานนั้น ปัญหาส่วนใหญ่เป็นปัญหาที่เกิดจากความเป็นจริง และวิชากลศาสตร์เป็นวิชาทางด้านกายภาพของวัตถุ เราจึงต้องทราบ ทิศทางและขนาดของแรง และ ทิศทางของการเคลื่อนที่ ดังนั้นเราจึงนำภาพ 3 มิติที่สามารถเคลื่อนไหวได้มาประยุกต์ใช้เพื่อสื่อประโยชน์ในการศึกษาปัญหา นอกจากนั้นภาพ 3 มิติสามารถแสดงมุมมองทั้ง ด้านบน ด้านหน้า ด้านข้าง และมุมมองปกติ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องกลหรือวัตถุอื่นๆได้อีกมากมาย และเพิ่มความน่าสนใจและความสนุกสนานในการศึกษาปัญหา

Special Project Title	Computer Assisted Instruction for Friction in Mechanics	
Students	Mr.Detchat Wattanapanich	41051019
	Miss Wanwipa Srilurchan	41051042
	Miss Suphansa Tuspnong	41051056
Degree	Bachelor's Degree of Science	
Department	Mathematics and Computer Science , Faculty of Science	
Programmer	Applied Mathematics	
Academic Year	2001	
Special Project Advisor	Associate Professor Pakkinee Chitsakul	
	Lecturer Pornchai Janejirapongvech	

## ABSTRACT

Mechanics Statics, In education, the most pictures displayed are just 2-dimensional pictures with non-animating. Sometimes, it's hard to make the education in friction and motion because the most of problems in friction was taken from real situations. Since mechanics is a subject of physics and engineering, we have to know the direction and magnitude of forces, and the direction of motion. Therefore, we applied the 3-dimensional animating pictures and are displayed in top, front, side, and perspective view to advantage. And we could also applied these to the other and it's easy and enjoy to learn in mechanics.

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปัญหาพิเศษเรื่อง โปรแกรมช่วยสอนเรื่องแรงเสียดทาน สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดีคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ภัคคินี ชิตสกุล และอาจารย์พรชัย เจนจิระพงศ์เวช อาจารย์ผู้รับผิดชอบปัญหาพิเศษฉบับนี้ที่กรุณาให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆรวมทั้งเป็นผู้ตรวจสอบความถูกต้องของปัญหาพิเศษฉบับนี้

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้สนับสนุนทางด้านกำลังใจ และทุนทรัพย์ จนการทำปัญหาพิเศษครั้งนี้สำเร็จด้วยดี รวมทั้งเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความร่วมความช่วยเหลือทางด้านต่างๆเกี่ยวกับปัญหาพิเศษไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ  
มีนาคม 2544



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปัญหาพิเศษ.....	1
1.3 ขอบเขตของปัญหาพิเศษ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปัญหาพิเศษ.....	2
<b>บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 ความเสียดทาน.....	3
2.1.1 ความหมาย.....	3
2.1.2 ชนิดของความเสียดทาน.....	3
2.1.3 ความเสียดทานแห้ง.....	6
2.2 ความเสียดทานในเครื่องจักรกล.....	14
2.2.1 ลิ้ม(Wedge).....	14
2.2.2 สกรู(Screw).....	15
2.2.3 ลูกปืน(Journal Bearing).....	16
2.2.4 จานและพิวอท(Disk and Pivot).....	18
2.2.5 สายพาน(Belt).....	19
2.3 คอมพิวเตอร์ช่วยสอน.....	26
2.3.1 คอมพิวเตอร์ช่วยสอน(CAI)คืออะไร.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2 คุณลักษณะของคอมพิวเตอร์ช่วยสอน.....	26
2.3.2 ประโยชน์ของคอมพิวเตอร์ช่วยสอน.....	27
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>28</b>
3.1 การกำหนดเนื้อหา.....	28
3.1.1 ความเสียหาย.....	28
3.1.2 ความเสียหายในเครื่องจักรกล.....	28
3.2 การพัฒนาโปรแกรมช่วยสอน.....	28
3.3 โปรแกรมที่ประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมช่วยสอน.....	28
3.4 ฝั่งงานของโปรแกรมช่วยสอนเรื่องความเสียหาย.....	29
3.5 การออกแบบฟอร์มของโปรแกรม.....	30
<b>บทที่ 4 การประเมินผลระบบ.....</b>	<b>50</b>
4.1 การประเมินผลด้านการแสดงภาพ.....	50
4.2 การประเมินผลด้านเนื้อหา.....	50
<b>บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>51</b>
5.1 บทสรุป.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>52</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1.1 ค่าความเหน็ดสัมบูรณ์ของของไหลบางอย่าง.....	5
2.1.2 ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1.1 ทิศทางการไหลของวัตถุและแรงกระทำที่เกิดขึ้น.....	4
2.1.2 ความเสียดทานกลิ้งของวัตถุที่มีลักษณะกลม.....	6
2.1.3 แรงเสียดทานลักษณะต่างๆ(ก)ภาพซ้าย(ข)ภาพขวา.....	7
2.1.4ก เมื่อวัตถุไม่มีการเคลื่อนที่.....	10
2.1.4ข เมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ขึ้น.....	11
2.1.4ค เมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ลง.....	11
2.1.5ก เมื่อวัตถุเริ่มต้นอยู่กับที่.....	12
2.1.5ข เมื่อมีแรง P มากกระทำ.....	12
2.1.6 แท่งวัตถุมวล $m$ วางอยู่บนพื้นราบได้รับแรงกระทำ P.....	13
2.2.1 แรงที่มากกระทำต่อลิ่ม.....	14
2.2.2 แรงที่กระทำต่อสกรู.....	15
2.2.3 แรงที่มากกระทำต่อ Journal Bearing.....	17
2.2.4 แรงที่มากกระทำต่อจานและพิวอท.....	18
2.2.5 แรงที่มากกระทำต่อสายพาน.....	19
2.2.6 แรงที่มากกระทำต่อคอนกรีตมวล500กก.วางบนพื้นราบ ถูกดันโดยลิ่ม 5 องศา มีแรง P มากกระทำ.....	21
2.2.7 แรงที่มากกระทำต่อปากกา.....	22
2.2.8 แรงที่มากกระทำต่อกระเดื่อง.....	24
2.2.9 เมื่อแรงปฏิกิริยา R ทำมุมกับเส้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัสและสัมผัสกับวงกลม.....	24
3.4.1 ผังงานของหน้าจอน้ำ.....	29
3.5.1 แสดงฟอร์ม Content.....	30
3.5.2 แสดงฟอร์ม Angle of friction.....	32
3.5.3 แสดงฟอร์ม Problem Involving Dry Friction.....	34
3.5.4 แสดงฟอร์มของ For Example 4(Content).....	36
3.5.5 แสดงฟอร์มของ Wedge.....	38
3.5.6 แสดงฟอร์มของ For Example(Wedge).....	40
3.5.7 แสดงฟอร์มของ Skrew.....	42
3.5.8 แสดงฟอร์มของ Journal Bearing.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5.9 แสดงฟอร์มของ Disk Friction.....	46
3.5.10 แสดงฟอร์มของ Belt Friction.....	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การศึกษาวិชาการศาสตร์ภาคสัตวศาสตร์ในระดับอุดมศึกษานั้นนอกจากจะมีเนื้อหาในด้านวิชาการแล้วยังต้องมีภาพประกอบเพื่อความเข้าใจอย่างถ่องแท้ด้วย เพราะวิชาสัตวศาสตร์เป็นวิชาที่ศึกษาทางด้านกายภาพของวัตถุ ปัญหาส่วนใหญ่จึงนำมาจากความเป็นจริง เช่น ฟันเขี้ยว ลิ้มรอก สายพานและลูกสูบ เป็นต้น ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้จะเป็นการใช้ภาพ 3 มิติ มาประยุกต์ใช้ประกอบกับเนื้อหาการเรียนเพื่อช่วยให้เกิดความเข้าใจในปัญหามากยิ่งขึ้น และนำไปสู่การแก้ปัญหาในเรื่องความเสียหายได้อย่างถูกต้อง เพราะปัญหาทางด้านนี้ไม่มีรูปแบบตายตัว ทั้งยังสามารถนำแนวคิดไปประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องกลหรือวัตถุอื่นๆได้อีกมากมาย ซึ่งการใช้ภาพ 3 มิติสื่อถึงปัญหาในรูปแบบที่หลากหลายยังช่วยดึงดูดให้ผู้ที่มีความสนใจมากยิ่งขึ้นและยังทำให้เรียนรู้ได้รวดเร็วยิ่งขึ้นอีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการทำ

1. เพื่อเอื้ออำนวยในการศึกษาวិชาการศาสตร์เรื่องความเสียหาย
2. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมช่วยสอนวิชาสัตวศาสตร์ในเรื่องอื่นๆ
3. เพื่อกระตุ้นให้เกิดความสนใจไม่แต่เฉพาะนักศึกษาแต่ยังประโยชน์ไปสู่บุคคลที่สนใจ

### 1.3 ขอบเขตของปัญหา

1. ศึกษาเนื้อหาของวิชาสัตวศาสตร์เรื่องความเสียหายพร้อมทั้งตัวอย่างปัญหาต่างๆ
2. ศึกษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในโปรแกรมช่วยสอน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ประหยัดเวลาในการศึกษาในวิชาสัตวศาสตร์เรื่องความเสียหาย
2. ดึงดูดความสนใจสำหรับผู้ศึกษา
3. พัฒนาแนวความคิดทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาวิชาสัตวศาสตร์เรื่องความเสียหาย
4. ทำให้การศึกษาวิชาการศาสตร์เรื่องความเสียหายทำได้ง่ายขึ้นเนื่องจากสามารถมองเห็นภาพประกอบในรูปแบบเคลื่อนที่ 3 มิติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิชากลศาสตร์เรื่องความเสียดทาน
2. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ศึกษามาเพื่อวางแผนในการทำโครงงาน
3. ออกแบบโปรแกรม
4. สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้งานได้จริง
5. ทดสอบโปรแกรม และแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
6. สรุปผล และเขียนข้อเสนอแนะ

### 1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปัญหาพิเศษ

1. กระดาษ A4
2. แผ่นดิสก์ 3.5 นิ้ว
3. แผ่นใส
4. ปากกาเขียนแผ่นใส
5. คอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความเสียดทาน

#### 2.1.1 ความหมาย

เมื่อวัตถุ 2 ชิ้นสัมผัสกันและถูกกดด้วยแรงกระทำอันหนึ่ง การเคลื่อนไหวยหรือพยายามที่จะเคลื่อนไหวยของวัตถุแต่ละชิ้น เมื่อเทียบกับอีกชิ้นหนึ่งในทิศทางขนานกับผิวสัมผัส จะถูกต่อต้าน การต่อต้านอันนี้ก็คือ *ความเสียดทาน(friction)* และแรงต่อต้านนี้ก็เป็นแรงในแนวสัมผัสกับผิวของวัตถุทั้งสอง(Tangential force) เรียกว่า*แรงเสียดทาน(friction force)*

ความเสียดทานนี้มีทั้งประโยชน์และโทษ ในเครื่องจักรกลหรือขบวนการบางอย่างเราจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องลดค่าความเสียดทานให้เหลือน้อยที่สุด เช่น ในเกลิยวส่งกำลัง การไหลของของเหลวในท่อ ระบบเฟืองและการเคลื่อนที่ของจรวดในบรรยากาศ เป็นต้น แต่ในสภาวะบางอย่างการที่ความเสียดทานมีค่าสูงสุดก็ให้ประโยชน์อย่างยิ่งเช่น ในระบบห้ามล้อ ระบบคลัทช์ความเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนนต้องมีมากพอจึงจะทำให้รถเคลื่อนที่หรือหยุดได้ ความเสียดทานระหว่างพื้นดินนี้ก็มีผลต่อการเดินเช่นเดียวกัน ถ้าผิวสัมผัสกันอยู่กับที่ เราเรียกว่า*ความเสียดทานสถิต* ถ้าผิวสัมผัสมีการเคลื่อนไหวย เราเรียกว่า*ความเสียดทานจลน์* โดยทั่วไปแล้วความเสียดทานจะมีอยู่เสมอระหว่างผิวสัมผัสภายใต้การกดดัน ในกรณีที่ความเสียดทานมีค่าน้อยมาก จนเราละทิ้งได้ในเวลาคำนวณ เราเรียกสภาวะนี้ว่า*สภาวะอุดมคติ(Ideal)* ถ้าต้องนำความเสียดทานมาร่วมในการคำนวณด้วย เรียกสภาวะนี้ว่า *สภาวะเป็นจริง(Real)*

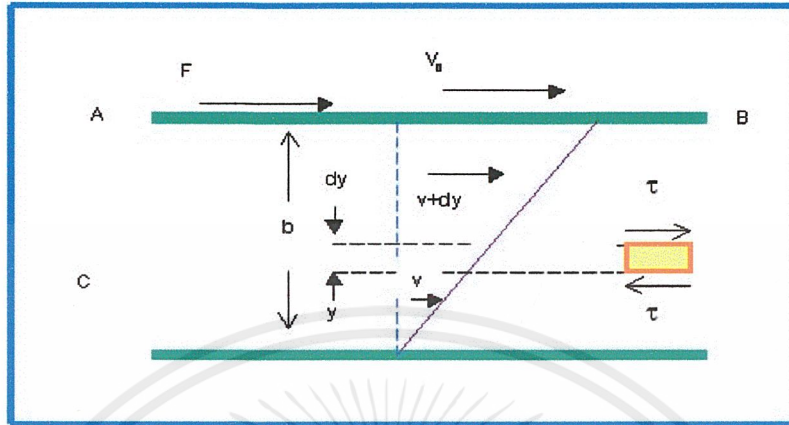
#### 2.1.2 ชนิดของความเสียดทาน

ในทางกลศาสตร์เราสามารถแบ่งชนิดของความเสียดทานออกได้เป็นหลายชนิดด้วยกัน ดังต่อไปนี้

1. **ความเสียดทานแห้ง (Dry friction)** เป็นความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่ไม่มี การหล่อลื่น แรงเสียดทานจะอยู่ในแนวเส้นสัมผัสกับผิวที่สัมผัสกันและจะเกิดขึ้นในระหว่างที่มีความพยายามในการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองและภายหลังเมื่อมีการเคลื่อนที่เกิดขึ้นแล้ว และแรงเสียดทานจะกระทำในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่หรือความพยายามเคลื่อนที่เสมอ ความเสียดทานชนิดนี้มีอีกชื่อหนึ่งว่า *ความเสียดทานของคูลอมบ์(Coulomb friction)*

2. **ความเสียดทานของไหล (Fluid friction)** ความเสียดทานชนิดนี้เกิดขึ้นระหว่างชั้นของของไหล (ของเหลวหรือก๊าซ) ที่อยู่ติดกันและกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน ดังนั้น แรงเสียดทานของของไหลจะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างชั้นของของไหล ถ้าไม่มีความเร็วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพัทธ์ก็จะเป็นความเสียดทาน นอกจากความเร็วสัมพัทธ์แล้ว ความเสียดทานของของไหลก็ยังขึ้นอยู่กับความหนืดของของไหลด้วย (ความหนืด: ความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่างชั้นของของไหล)



รูปที่ 2.1.1 ทิศทางการไหลของวัตถุและแรงกระทำที่เกิดขึ้น

จากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากความหนืดของของไหล ในการไหล 1 มิติ เราจะเห็นพื้นผิวหน้าตัดของไหล AB ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_0$  ขนานกับผิว C ซึ่งอยู่กึ่งที่ ระหว่างผิวทั้ง 2 มิติของไหลที่มีความหนืดอยู่ ดังนั้นทุกๆอนุภาคของของไหลจะพยายามเคลื่อนที่ไปตามทิศของ  $v_0$  การไหลที่แสดงนี้เรียกว่า การไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) โดยที่แต่ละชั้นของของไหลจะคงไหลไปตามชั้นของตนจะไม่มาปะปนกับชั้นอื่นๆ และที่  $y = 0$  ของไหลจะอยู่ติดกับผิว C และไม่มีการเคลื่อนที่ที่  $y = b$  ของไหลจะติดกับผิว AB และจะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว  $v_0$  เช่นกัน จากรูปจะเห็นว่าความเร็ว  $v$  จะแปรผันเป็นสมการเส้นตรงกับระยะ  $y$

พิจารณาชั้นของของไหลที่มีความหนา  $dy$  ความเค้นเฉือน  $\tau$  กระทำต่อชั้นของไหลนี้เพื่อรักษาความเร็วสัมพัทธ์  $dv$  ระหว่างชั้น ความเค้นนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มของความเร็ว เราจึงอาจเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

ค่า  $\mu$  คือค่าความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity) มีหน่วยเป็น  $N \cdot s / m^2 = Pa \cdot s$  (Pascal-second) แต่หน่วยที่ใช้ทั่วไปเป็น millipascal-second (mPa.s) หรือ centipoise ตารางข้างล่างนี้แสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลบางอย่าง

### ตารางที่ 2.1.1 ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลบางอย่าง

ของไหล	อุณหภูมิ(°C)	ค่าความหนืดสัมบูรณ์, $\mu$ centipoise, (mPa.s)
อากาศ	20	0.018
น้ำ	20	1.000
น้ำมันหล่อลื่น		
SAE10	15	100
SAE30	15	400

แรงกระทำสัมผัสทั้งหมดบนผิวของโลหะ AB เนื่องจากความเสียดทานของของไหลจะเท่ากับ  $\tau A$  เมื่อ  $\tau$  เป็นฟังก์ชันของพื้นที่ แรงกระทำทั้งหมดเป็น  $\int \tau da$

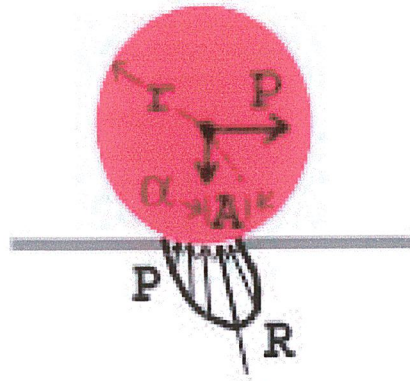
ถ้าการไหลของของไหลเป็นไปอย่างสับสนวุ่นวาย เราเรียกว่า การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ (Turbulent flow) และสมการที่ (2.1) จะใช้ไม่ได้อีกต่อไป การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ (turbulent flow) เป็นการไหลที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่

ความเสียดทานของของไหลมีความสำคัญมากในการออกแบบลูกปืน (bearing) ทุกชนิด ส่วนใหญ่แล้วลูกปืนจะทำงานในสภาวะหล่อลื่นบางส่วน กล่าวคือ ของไหลหล่อลื่นจะแยกผิวสัมผัสของโลหะออกจากกัน กรณีเช่นนี้เรียกว่า การหล่อลื่นตามผิว (boundary lubrication) และมีสภาวะอยู่ระหว่างความเสียดทานแห่งกับความเสียดทานของของไหล การหาสมการทางทฤษฎีในสภาวะเช่นนี้ทำได้ยาก ดังนั้นข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากการทดลอง

3. ความเสียดทานกลิ้ง (Rolling friction) ความเสียดทานกลิ้งเกิดจากความต้านทานต่อการ กลิ้งของวัตถุที่มีลักษณะกลม พิจารณาวงล้อซึ่งรับภาระ  $L$  และแรง  $P$  เพื่อให้เกิดการกลิ้ง ความกดตัน  $p$  ที่ผิวสัมผัสจะกระจายไปดังรูป และแรงดัด  $R$  ของความกดตัน  $p$  จะกระทำผ่านจุด  $A$  จุดหนึ่งในทิศทางผ่านจุดศูนย์กลางของวงล้อเพื่อให้วงล้ออยู่ในสมดุล แรง  $P$  ที่จะรักษาการกลิ้งไว้หาได้จากการหาโมเมนต์รอบจุด  $A$  จะได้ว่า

$$\sum M_A = 0, P = \frac{a}{r} L = \mu_r L$$

โดยเราถือว่าค่าแขนของโมเมนต์ของแรง  $P$  เป็น  $r$  ค่า  $\mu_r$  คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้ง และเป็นอัตราส่วนระหว่าง แรงต้านทานกับแรงตั้งฉาก กล่าวคือไม่มีการลื่นไถลของวงล้อ นอกจากการหมุนไปเท่านั้น



รูปที่ 2.1.2 ความเสียดทานกลิ้งของวัตถุที่มีลักษณะกลม

ค่าของ  $a$  นั้นขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายตัวด้วยกัน จึงมีผลให้การหาทฤษฎีแบบง่าย ๆ ของการกลิ้งเป็นไปได้ ตัว  $a$  นี้เป็นฟังก์ชันของ คุณสมบัติทางอิลาสติก (elastic) และพลาสติก (plastic) ของวัตถุทั้งสอง, รัศมีของวงล้อ, ความเร็วและความหยาบของพื้น ค่า  $a$  จึงมักถือว่าไม่ขึ้นกับขนาดวงล้อ

4. ความเสียดทานภายใน (Internal friction) ความเสียดทานชนิดนี้พบในเนื้อของของแข็งที่ได้รับภาระ แบบวงจร (cyclical loading) จากการวาดกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัตถุที่ได้รับภาระแบบวงจรมานี้ เราจะพบว่าเส้นกราฟประกอบขึ้นเป็นวงจร เรียกว่า ฮิสเตอรีซิส (hysteresis) พื้นที่ที่อยู่ในวงจรมีค่า พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความเสียดทานภายในเนื้อโลหะนั่นเอง

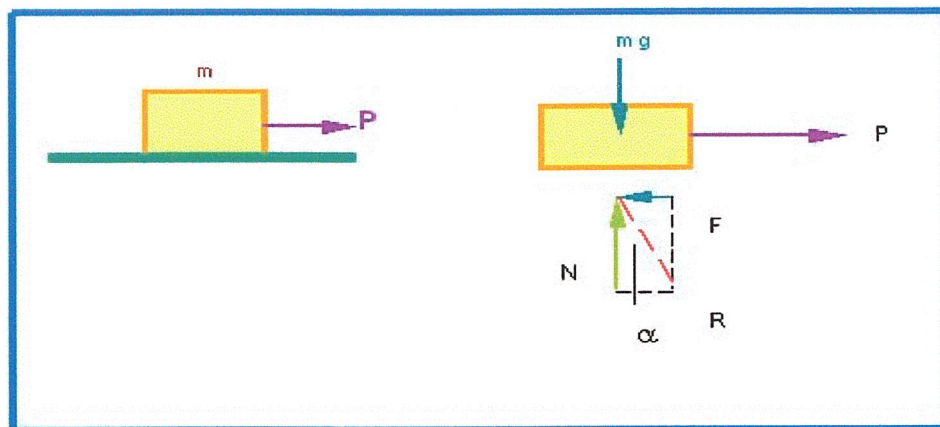
### 2.1.3 ความเสียดทานแห้ง

เราสามารถอธิบายกลไกของความเสียดทานแห้งได้โดยวิธีง่าย ๆ คือ พิจารณาของแข็งแท่งหนึ่งมีมวล  $m$  วางอยู่กับพื้นราบและถูกกระทำด้วยแรง  $P$  ขนานกับพื้นเมื่อเราพิจารณาฝั่งวัตถุอิสระของแท่งวัตถุนี้ จะเห็นว่าเวลาที่วัตถุยังคงอยู่กับที่ได้จะต้องมีแรงมากระทำในทิศตรงกันข้ามกับ  $P$  ดังนั้นจากสมการของการสมดุลจะได้ว่า

$$\text{แรงในแนวสัมผัสกับผิวสัมผัส } F = P$$

$$\text{แรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส } N = mg$$

เมื่อเราเพิ่มแรง  $P$  ขึ้นแรง  $F$  ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และคงมีขนาดเท่ากับ  $P$  ตราบเท่าที่แท่งวัตถุยังคงหยุดนิ่ง จนถึงค่าของ  $P$  ค่าหนึ่งที่แท่งวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ จากการทดลองได้พบอีกว่าเมื่อแท่งวัตถุเคลื่อนที่ค่าของ  $F$  จะลดลงและมีค่าคงที่ไม่ว่า  $P$  จะมีขนาดเท่าไร ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้โดยการพิจารณาอย่างละเอียดที่ผิวสัมผัส จะเห็นได้ว่า แรง  $F$  คือผลบวกของแรง  $R_1, R_2, R_3, \dots$  ในแนว  $t$  ทั้งหมด เมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ผ่านกัน ผิวสัมผัสจะเกิดขึ้นที่ส่วนยอดของรอยขรุขระ ทำให้ผลรวมของแรง  $R$  ในแนว  $t$  ลดลงและมีผลให้  $F$  ลดลงด้วย



รูปที่ 2.1.3 แรงเสียดทานลักษณะต่างๆ (ก)ภาพซ้าย (ข)ภาพขวา

เมื่อเราทดลองเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $F$  กับ  $P$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1.3 ซึ่งเราแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่วัตถุหยุดนิ่ง เราจะได้กราฟเส้นตรง  $F_s = P$  ส่วนนี้อยู่ในช่วงความเสียดทานสถิต (Static friction) จากการทดลองได้ค้นพบว่า สำหรับผิวสัมผัสต่างๆ จะได้ค่า  $F_s$  มากที่สุด เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า  $N$  คือ

$$F_{s\max} = \mu_s N$$

$\mu_s$  มีค่าคงที่สำหรับผิวสัมผัสแต่ละคู่ เราเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction) ควรระวังว่าสมการนี้ใช้ได้เฉพาะเมื่อ  $F_s$  มีค่ามากที่สุด (วัตถุกำลังจะเริ่มเคลื่อนที่) เท่านั้น

ในช่วงต่อมาคือ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่แล้ว เราเรียกว่าอยู่ในช่วงความเสียดทานจลน์ (kinetic friction) เราพบอีกด้วยว่า

$$F_k = \mu_k N$$

เมื่อ  $\mu_k$  เป็น สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานจลน์ (Coefficient of kinetic friction) โดยทั่วไปค่า  $\mu_k$  จะน้อยกว่า  $\mu_s$  และค่า  $\mu_k$  จะน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วมีค่าสูงจะมีอิทธิพลของการหล่อลื่นเนื่องจากฟิล์มของของไหลที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองด้วย

โดยทั่วไปเรานิยมเขียนสมการข้างต้นทั้งสองเป็นสมการเดียวคือ

$$F = \mu N \quad (2.2)$$

จะใช้  $\mu_s$  หรือ  $\mu_k$  ก็แล้วแต่สถานะของความเสียดทานขณะนั้น และค่า  $\mu_s$  จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อวัตถุอยู่ในสภาพที่กำลังจะเคลื่อนที่พอดีเท่านั้น

ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานแสดงถึงความหยาบ ความขรุขระของผิวสัมผัสคู่หนึ่งพร้อมทั้งบอกถึงคุณสมบัติทางเรขาคณิตของพื้นที่ผิวที่สัมผัสกันคู่นั้นด้วย ทิศทางของแรงลัพธ์  $R$  ที่พื้นที่รองรับกระทำต่อแท่งวัตถุเมื่อวัดจากแนวแรง  $N$  หาได้จากสมการ  $\tan \alpha = \frac{F}{N}$  ดังนั้นเมื่อค่าแรงเสียดทานสถิตถึงค่าที่กำหนด มุม  $\alpha$  จะเป็นมุมที่มีค่ามากที่สุดเป็น  $\phi_s$  ดังนั้น  $\tan \phi_s = \mu_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อวัตถุเคลื่อนที่เราจะได้มุม  $\alpha$  จะเป็นมุมที่มีค่ามากที่สุดเป็น  $\phi_k$  ดังนั้น  $\tan\phi_k = \mu_k$  ซึ่งโดยทั่วไปเราจะเขียนรวมกันว่า

$$\tan\phi = \mu \quad (2.3)$$

มุม  $\phi_s$  คือ มุมของความเสียดทานสถิต (angle of static friction) ในขณะที่มุม  $\phi_k$  คือ มุมของความเสียดทานจลน์ (angle of kinetic friction)

ปัญหาที่เกี่ยวกับความเสียดทานแห่งที่พบโดยทั่วไปในทางกลศาสตร์มีอยู่ 3 ประเภทคือ

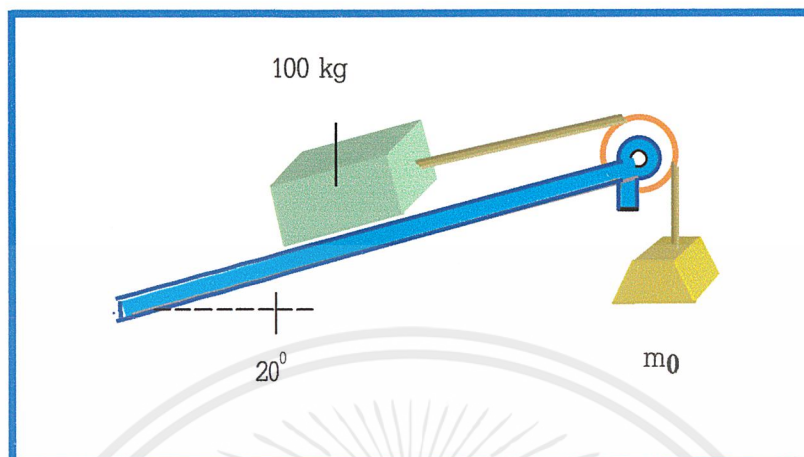
- 1) วัตถุอยู่ในสภาวะเริ่มจะเคลื่อนที่ ในลักษณะนี้ค่าขีดจำกัดของความเสียดทานสถิตเป็นสิ่งที่จะนำมาใช้
- 2) เราไม่ทราบว่าวัตถุอยู่ในสภาวะใด เราจะหาค่าแรงเสียดทานได้จากสมการสมดุล หลังจากนั้นจากการเปรียบเทียบระหว่างค่าของแรงเสียดทานนี้กับค่าขีดจำกัดของแรงเสียดทานสถิตซึ่ง  $\mu = \mu_s$  เราจะทราบสภาวะของวัตถุได้ถ้าแรงที่คำนวณได้น้อยกว่าขีดจำกัด แสดงว่าวัตถุยังคงอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง แต่ถ้าแรงนี้มากกว่าขีดจำกัด ก็แสดงว่าวัตถุกำลังเคลื่อนที่ และแรงเสียดทานที่แท้จริงเป็นแรงเสียดทานจลน์
- 3) เป็นเรื่องเกี่ยวกับการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง ดังนั้นในกรณีนี้ใช้  $\mu = \mu_k$   
 ในตารางที่ 2.1.2 นี้แสดงถึงค่าบางอย่างของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งอาจนำมาใช้ได้สำหรับการคำนวณหา

ตารางที่ 2.1.2 ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ชนิดของคู่มือสัมผัสด	สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน, $\mu$	
	สถิต	จลน์
Steel on steel (dry)	0.6	0.4
Steel on steel (greasy)	0.1	0.05
Teflon on steel	0.04	0.04
Steel on babbitt (dry)	0.4	0.3
Steel on babbitt (greasy)	0.1	0.07
Brass on steel (dry)	0.5	0.4
Brake lining on cast iron	0.4	0.3
Rubber tires on smooth pavement (dry)	0.9	0.8
Wire rope on iron pulley (dry)	0.2	0.15
Hemp rope on metal	0.3	0.2
Metal on ice	-	0.02
สัมประสิทธิ์ของ ความเสียดทานกลิ้ง, $\mu_r$		
Pneumatic tires on smooth pavement	0.02	
Steel tires on steels rails	0.006	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตัวอย่างที่ 2.1** จงหาค่าของมวล  $m_0$  ในรูปที่จะทำให้แท่งวัตถุหนัก 100 กก. ไม่มีการเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตามระบบ กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานสถิตของผิวสัมผัสเป็น 0.3



รูปที่ 2.1.4 ก เมื่อวัตถุไม่มีการเคลื่อนที่

#### วิธีทำ

เขียนผังวัตถุอิสระของมวล 100 กก. ในขณะเวลา 2 ขณะ คือ

1. เมื่อจะเริ่มเคลื่อนที่ขึ้น
2. เมื่อจะเริ่มเคลื่อนที่ลง

น้ำหนักของมวล 100 กก. คือ 981 N

#### กรณีที่ 1

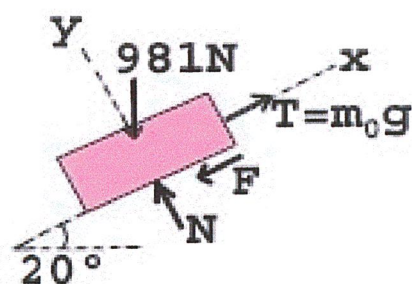
จากสมการของการสมดุล

$$[\sum F_y = 0] \quad N - 981 \cos 20^\circ \quad N = 922$$

เพราะ

$$[F = \mu N] \quad F = 0.30(922) = 277N$$

$$M_0(9.81) + 227 - 981 \sin 20^\circ = 0, m_0 = 62.4 \text{ kg.} \quad \text{ตอบ}$$

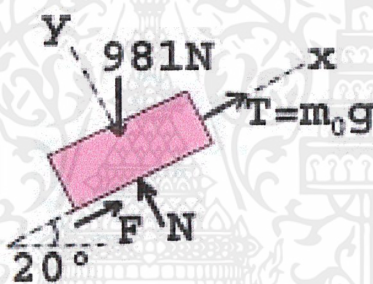


รูปที่ 2.1.4 ข เมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ขึ้น

กรณีที่ 2

$$[EF = 0] \quad m_0 (9.81) + 277 - 981 \sin 20^\circ = 0, m_0 = 6.0 \text{ kg.}$$

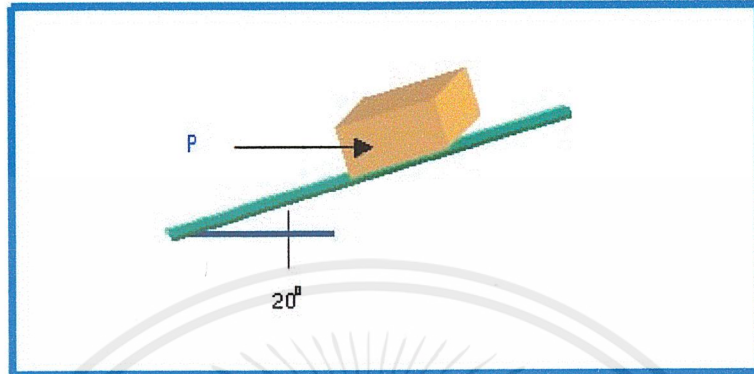
ตอบ



รูปที่ 2.1.4 ค เมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ลง

นั่นคือ มวล  $m_0$  จะมีค่าอยู่ในช่วง 6 ถึง 62.4 กก. ที่ทำให้วัตถุอยู่ในสภาพหยุดนิ่ง

**ตัวอย่างที่ 2.2** จงหาขนาดและทิศทางของแรงเสียดทานที่กระทำต่อแท่งวัตถุมีมวล 100 กก. ในรูปเมื่อ 1)  $P = 500\text{ N}$  2)  $P = 100\text{ N}$  ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์เป็น 0.17 แรงกระทำเมื่อวัตถุเริ่มต้นอยู่กับที่



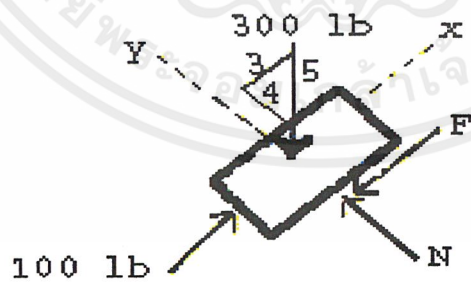
รูปที่ 2.1.5 ก เมื่อวัตถุเริ่มต้นอยู่กับที่

**วิธีทำ**

เราไม่สามารถจะบอกได้ว่า ค่าแรงเสียดทานมีทิศทางไปทางไหนในระยะเริ่มแรก ทั้งยังไม่สามารถทราบได้ด้วยว่า วัตถุคงอยู่ในสภาวะหรือว่าเคลื่อนที่เราจึงต้องสมมติก่อนว่าแรงมีทิศขึ้นตามระนาบ

จาก

$$\begin{aligned} [\sum F_y = 0] \quad N - P\sin 20^\circ - 981\cos 20^\circ &= 0 \\ [\sum F_x = 0] \quad P\cos 20^\circ + F - 981\sin 20^\circ &= 0 \end{aligned}$$



รูปที่ 2.1.5 ข เมื่อมีแรง P มากกระทำ

กรณีที่ 1  $P = 500\text{ N}$

จากสมการแรกจะหาได้ว่า  $F = -134\text{ N}$

ค่า  $F$  เป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่ในสภาพสมดุล แรง  $F$  จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับที่กำหนดไว้ที่แรกต่อไปเราต้องตรวจสอบว่า ค่าขีดจำกัดของแรงเสียดทานสถิตมากกว่าหรือน้อยกว่า  $F$  ที่หาได้

จากสมการที่ 2 ได้ค่า  $N = 1093 \text{ N}$   $(P = 500 \text{ N})$

จาก  $(F = \mu N)$  คัดค่าความเสียดทานสถิต  $\mu_s = 0.20$

$$F = 0.20(1093) = 219 \text{ N}$$

ซึ่งแสดงว่า แท่งวัตถุจะอยู่ในสภาวะลบนระนาบ ดังนั้นคำตอบคือ

$F = 134 \text{ N}$  ทิศลงตามระนาบ **ตอบ**

กรณีที่ 2  $P = 100 \text{ N}$

จากสมการข้างทั้งสองจะได้

$$F = 231 \text{ N} , N = 956 \text{ N}$$

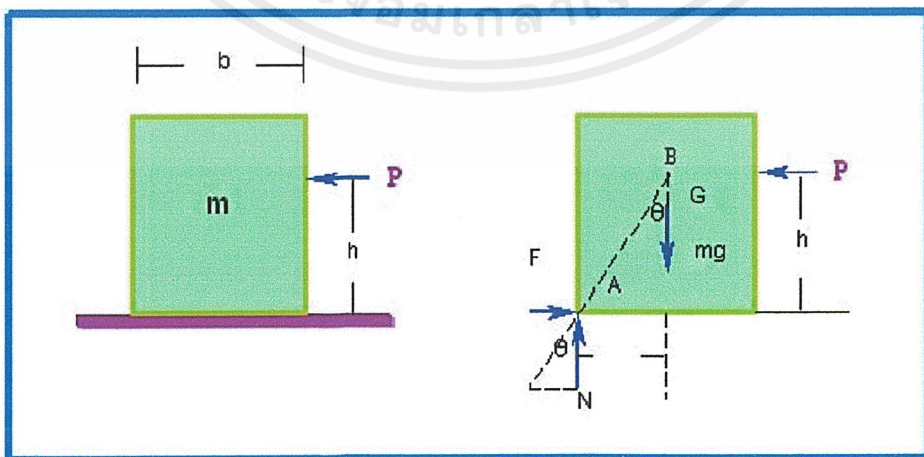
จาก  $(F = \mu N)$   $F = 0.20(956) = 191 \text{ N}$

ซึ่งแสดงว่า จะมีการเคลื่อนที่ของวัตถุตามระนาบ ดังนั้นค่าความเสียดทานสถิตจึงใช้ไม่ได้จาก

$(F = \mu N)$   $F = 0.17(956) = 163 \text{ N}$  ทิศขึ้นไปตามระนาบ **ตอบ**

ขอให้สังเกตว่า จะไม่มีการสมดุลของแรงตามแนวแกน  $x$

**ตัวอย่างที่ 2.3** แท่งวัตถุรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีเนื้อเดียวกันตลอดและมีมวล  $m$  วางอยู่บนพื้นราบ ได้รับแรงกระทำ  $P$  ดังรูป ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็น  $\mu$  จงหาค่าสูงสุดของ  $h$  ที่จะทำให้แท่งวัตถุไถลไปโดยไม่คว่ำลงมา



รูปที่ 2.1.6 แท่งวัตถุมวล  $m$  วางอยู่บนพื้นราบ ได้รับแรงกระทำ  $P$

**วิธีทำ**

พิจารณาในขณะที่แท่งวัตถุอยู่ในสภาพที่จะพลิกคว่ำลงมา จะเห็นได้ว่าแรงปฏิกิริยาทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่มุมล่างด้านซ้ายตามผังวัตถุอิสระ ถ้าแรง  $P$  จะทำให้เกิดการไถลของแท่งวัตถุ แรงเสียดทานจะต้องถึงค่าขีดจำกัด  $\mu N$ พอดี

$$\tan \theta = F/N = \mu$$

แนวแรงลัพธ์ของ  $F$  และ  $N$  จะไปพบกับ  $P$  และ  $mg$  ที่จุด  $B$

จากกฎเรขาคณิตของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้ว่า

$$\tan \theta = \mu = \frac{b/2}{h}, h = \frac{b}{2\mu} \quad \text{ตอบ}$$

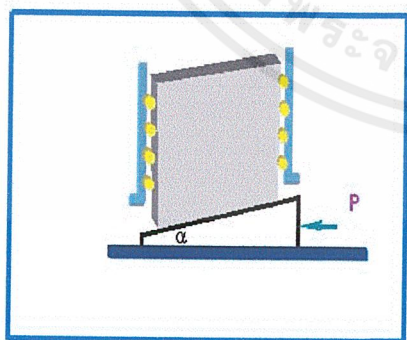
ถ้าค่า  $h$  มากกว่านี้ ค่าสมมูลของโมเมนต์รอบจุด  $A$  จะเป็นไปไม่ได้ ถ้าค่า  $h$  น้อยกว่านี้ จุดตัดของแรงลัพธ์ระหว่าง  $F$  กับ  $N$  กับแรง  $P$  และ  $W = mg$  จะต้องอยู่ต่ำกว่าจุด  $B$  ซึ่งแสดงว่าแรงลัพธ์ของ  $F$  กับ  $N$  จะกระทำที่จุดอื่น ซึ่งอยู่เยื้องมาทางขวาจุด  $A$

**2.2 ความเสียดทานในเครื่องจักรกล**

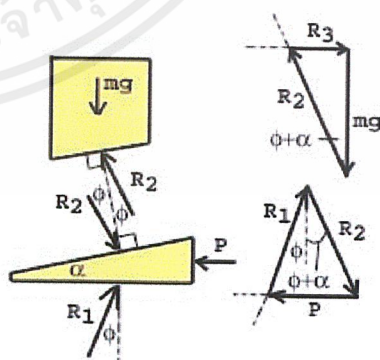
ได้มีการนำเอาหลักการของความเสียดทานแห่งนี้มาใช้เป็นจำนวนมากในการออกแบบและเกี่ยวกับการทำงานของเครื่องจักรกลต่างๆ ซึ่งเราจะได้กล่าวต่อไปนี้

**2.2.1 ลิ้ม (Wedge)**

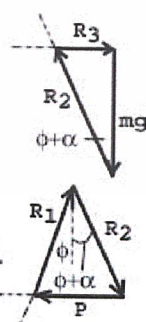
ลิ้มเป็นเครื่องมือง่าย และมีประโยชน์มากขึ้นหนึ่ง เราใช้ลิ้มเพื่อปรับตำแหน่งวัตถุหรือใช้ทำให้เกิดแรงขนาดมากๆ หลักการของลิ้มขึ้นอยู่กับความเสียดทาน เมื่อการไถของลิ้มกำลังจะเริ่มขึ้นแรงลัพธ์บนแต่ละพื้นผิวมันเป็นมุมเท่ากับมุมความเสียดทาน องค์ประกอบของแรงนี้ในแนวสัมผัสกับพื้นผิว คือแรงเสียดทานที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของลิ้ม



(ก)



(ข)



(ค)

**รูปที่ 2.2.1 แรงที่มากกระทำต่อลิ้ม**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับลิ้มที่ใช้ในการยกมวลขนาดใหญ่และมีน้ำหนัก  $mg$  ค่า ส.ป.ส. ความเสียดทานบนแต่ละพื้นผิวใน  $\mu = \tan\phi$  แรง  $P$  ที่ใช้เมื่อใส่ลิ้มเข้ามา หาได้จากความสมดุลของสามเหลี่ยมของแรงบนวัตถุและบนลิ้มพิจารณาผังวัตถุอิสระ (free body diagram) จะเห็นว่าแรงปฏิกิริยาทำมุม  $\phi$  กับแนวตั้งฉากและสวนทางกับการเคลื่อนที่ เมื่อถือว่ามวลของลิ้มน้อยมาก จะได้สมการสมดุลต่อไปนี้

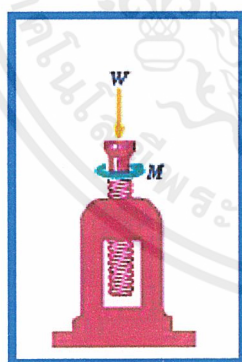
$$W + R_2 + R_3 = 0$$

$$R_1 + R_2 + P = 0$$

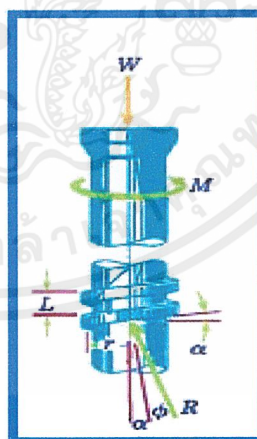
จากสมการแรกเราทราบขนาดและทิศทางของ  $W$  ทิศทางของ  $R_2$  และ  $R_3$  เราก็สามารถเขียนสามเหลี่ยมขนาดของ  $R_2$  ได้ จากนั้นอาศัยทิศทางของ  $P$  และ  $R_1$  เราก็เขียนสามเหลี่ยมแทนแรงในสภาวะที่ 2 ได้เมื่อแรง  $P$  ถูกนำไป ลิ้มจะยังคงอยู่ในสภาวะเดิมเอาลิ้มออก ก็จะต้องใช้แรง  $P'$  ซึ่งเราจะได้แรงปฏิกิริยา  $R_1, R_2$  ในทิศทางใหม่เพื่อต่อต้านกับการเคลื่อนที่ของลิ้มที่เกิดขึ้นใหม่ การแก้ปัญหาโดยทั่วไปของลิ้มจะใช้วิธีเรขาคณิต การใช้การคำนวณก็ต้องอาศัยหลักวิชา ตรีโกณมิติช่วย

### 2.2.2 สกรู (Screw)

สกรูที่ใช้ในการรัดวัตถุเข้าด้วยกันและใช้ถ่ายเทกำลังหรือความเคลื่อนไหวในแต่ละกรณีมีความเสียดทานในตัวเกลียวจะเป็นกำหนดความสามารถของสกรูในการถ่ายเทกำลังหรือความเคลื่อนไหว เกลียวรูปสี่เหลี่ยมให้ผลดีกว่าเกลียวรูปตัววี ดังนั้นต่อไปนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเกลียวรูปสี่เหลี่ยม



(ก)



(ข)

### รูปที่ 2.2.2 แรงที่กระทำต่อสกรู

พิจารณาแม่แรงใช้เกลียวสี่เหลี่ยม (square-threaded jack) ซึ่งมีแรงตามแนวแกน  $W$  และโมเมนต์  $M$  รอบแกนของสกรู และเราจะเห็นแรง  $R$  ที่เกลียวของกรอบของแม่แรง (jack) กระทำต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลียวของสกรูในผังวัตถุอิสระที่แสดงไว้ข้างๆแรง  $R$  นี้จะมีอยู่ตลอดแนวที่มีการสัมผัสระหว่างเกลียวทั้งสอง ดังนั้นถ้าโมเมนต์  $M$  มีพอเพียงที่จะหมุนสกรูเกลียวของของสกรูก็จะเลื่อนขึ้นไปบนผิวของเกลียวของแม่แรง มุม  $\phi$  ระหว่าง  $R$  กับเส้นตั้งฉากกับเกลียวจะเป็นมุมความเสียดทาน หรือ  $\tan \phi = \mu$  และโมเมนต์เนื่องจากแรง  $R$  รอบแกนของสกรูก็จะเท่ากับ

$$Rr \sin(\alpha + \phi) \text{ เมื่อ } r \text{ คือรัศมีของสกรู}$$

และเมื่อคิดถึง  $R$  ทั้งหมดที่เกิดขึ้นก็จะได้ว่า

$$M = [r \sin(\alpha + \phi)] \Sigma R$$

ในทำนองเดียวกัน สมดุลในแนวแกนของสกรูให้

$$W = \Sigma R \cos(\alpha + \phi) = [\cos(\alpha + \phi)] \Sigma R$$

และจะได้

$$M = Wr \tan(\alpha + \phi) \quad (2.4)$$

ค่า  $\theta$  คือ  $\tan^{-1} \mu$  และค่า  $\alpha$  หาได้จากระยะระหว่างเกลียว  $L$  คือ

$$\alpha = \tan^{-1}(L / 2\pi r)$$

สมการ (2.4) แสดงถึงค่าโมเมนต์ที่จำเป็นในการหมุนสกรูขึ้นหรือรักษาการเคลื่อนที่ขึ้นของสกรูไว้ ทั้งนี้แล้วแต่สภาวะความเสียดทานที่เราพิจารณา ถ้าโมเมนต์  $M$  ถูกนำออกไป แรงเสียดทานจะเปลี่ยนทิศทางและ  $\phi$  จะถูกวัดมาอีกข้างหนึ่งของเส้นตั้งฉาก ดังนั้นสภาพการล็อกตัวเอง (self locking) จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\phi > \alpha$  และอยู่ในสภาพที่อาจจะหมุนกลับลงมาได้เมื่อ  $\phi = \alpha$  ถ้า  $\phi > \alpha$  เราต้องใช้โมเมนต์  $M'$  เพื่อหมุนสกรูลง และ

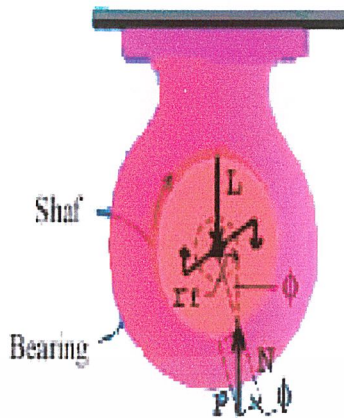
$$M' = Wr \tan(\phi - \alpha)$$

ถ้า  $\phi < \alpha$  สกรูจะหมุนกลับลงมาได้เอง และโมเมนต์  $M$  ที่ต้องใช้เพื่อหยุดการเคลื่อนที่นี้มีค่า

$$M = Wr \tan(\phi - \alpha)$$

### 2.2.3 Journal bearing

Journal bearing เป็นลูกปืน (bearing) ประเภทที่รับภาระด้านข้างด้วย นอกจากภาระตามแกนของลูกปืนโดยทั่วไป



รูปที่ 2.2.3 แรงที่มากกระทำต่อ Journal bearing

โดยปกติทั่วไป Journal bearing จะมีการขยายช่วงเผื่อ (clearance) ให้ใหญ่เกินความจริง เมื่อเพลารเริ่มหมุนตามทิศทางที่แสดงไว้ มันจะหมุนขึ้นไปตามผิวด้านในของลูกปืนจนการไถลเกิดขึ้น และเพลาก็ยังคงสภาพเช่นนี้ขณะที่เพลารหมุนอยู่

แรงบิด  $M$  ที่คองการหมุนของเพลารไว้และภาระตามแนวรัศมี  $L$  บนเพลารจะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยา  $R$  ที่จุดสัมผัส  $A$  ดังนั้นตามสมการสมดุล  $R = L$  แต่ไม่อยู่ในแนวเดียวกัน แรง  $R$  จะสัมผัสกับวงกลมเล็กๆ เรียกว่าวงกลมแรงเสียดทาน มุมระหว่าง  $R$  กับเส้นตั้งฉากกับผิวสัมผัสคือมุมความเสียดทาน  $\phi$  จากสมการสมดุลของโมเมนต์เราจะได้

$$M = Rr_i = Rr \sin \phi$$

ถ้าส.ป.ส.ความเสียดทาน  $\mu$  มีค่าน้อย มุม  $\phi$  เป็นมุมเล็ก เพราะฉะนั้น

$$\mu = \tan \phi \approx \sin \phi$$

ดังนั้นเราจะประมาณค่าโดยประมาณของ

$$M = \mu Rr$$

ความสัมพันธ์นี้แสดงถึงค่าของแรงบิดหรือโมเมนต์ที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานในกรณีที่ไม่มีการหล่อลื่นหรือมีเพียงบางส่วนเท่านั้น

ถ้าเราจะพิจารณากรณีที่ภาระด้านข้างของลูกปืนมีน้อย เราอาจสมมติได้ว่าเพลารอยู่ร่วมจุดศูนย์กลางกับลูกปืน

เราอาจถือว่ามีกระจายเชิงเส้นของความเร็วในชั้นของเหลวในระยะช่วงเผื่อ (clearance) เล็กๆ โดยเริ่มจากศูนย์ที่ผิวด้านในของลูกปืนจนมีค่าถึงความเร็ว  $v$  ที่ผิวด้านนอกของเพลาร การเปลี่ยนแปลงของความเร็วคือ

$$\left| \frac{dv}{dr} \right| = v/c = rw/c$$

เมื่อ  $\omega$  เป็นความเร็วเชิงมุมของเพลามีหน่วยเป็น radian/sec

ค่าความเค้นเฉือนบนผิวของเพลตามสมการที่ (6.1) คือ

$$\tau = \mu \left| \frac{dv}{dr} \right| = \frac{\mu r \omega}{c}$$

และค่าโมเมนต์ของความเสียดทานของลูกปืนยาว  $l$  และมีพื้นที่ของผิว  $A = 2\pi r l$  เป็น

$$M = \tau A r = \frac{2\pi \mu r^3 l \omega}{c}$$

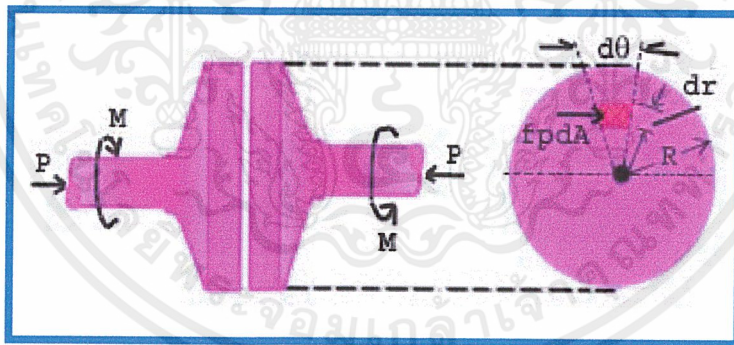
เมื่อ  $\mu$  คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของสิ่งหล่อลื่น

**2.2.4 ความเสียดทานของจานและพิวอท (Disk and pivot friction)**

ความเสียดทานระหว่างพื้นผิวรูปวงกลมที่อยู่ภายใต้ความกดดันจะพบได้ในพิวอท (pivot) ลูกปืน (bearing) แผ่นคลัทช์ (clutch plate) จานห้ามล้อ (disk brake) พิจารณาจานรูปวงกลมแบน 2 ใบ ซึ่งเพลาดูดอยู่กับลูกปืนและถูกยึดติดกันได้ด้วยแรงตามแนวแกน  $P$  ค่าแรงบิดที่มากที่สุดที่คลัทช์นี้จะส่งไปได้ก็คือ แรงบิด  $M$  ที่ทำให้เกิดการไถลระหว่างจานทั้งสอง ถ้า  $p$  เป็นความดันตั้งจากจุดใดๆบนจานหนึ่ง แรงเสียดทานบนพื้นที่เล็กๆจะเป็น  $\mu p dA$  เมื่อ  $\mu$  คือ ส.ป.ส.ความเสียดทาน และ  $dA$  คือ พื้นที่  $r dr d\theta$  และโมเมนต์ของแรงเสียดทานนี้คือ  $\mu p r dA$  และ

$$M = \int \mu p r dA$$

โดยอินทิเกรตไปทั่วพื้นที่ของจาน



รูปที่ 2.2.4 แรงที่มากกระทำต่อจานและพิวอท

เพื่อที่จะสามารถอินทิเกรตสมการนี้ เราต้องทราบถึงค่า  $\mu$  และค่า  $p$  ที่เป็นฟังก์ชันของ  $r$  แต่เราอาจถือได้ว่า  $\mu$  คงที่เสมอ และถ้าพื้นผิวสัมผัสใหม่ แบน และถูกรองรับอย่างดี เราก็อาจยอมรับได้ว่า  $p$  คงที่เช่นกัน ดังนั้น  $\pi R^2 p = P$  และได้

$$M = \frac{\mu P}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R r^2 dr d\theta = \frac{2}{3} \mu P R \tag{2.5}$$

จากผลลัพธ์นี้ตีความได้คล้ายกับว่า โมเมนต์เนื่องจากแรง  $\mu P$  กระทำที่ระยะ  $2/3R$  จากจุดศูนย์กลางของเพลลา และถ้าเปลี่ยนจากจานเป็นวงแหวน เราจะได้ขีดจำกัดของอินทิเกรตเป็น  $R_i$  และ  $R_o$  ซึ่งเป็นรัศมีภายในและภายนอกของวงแหวนตามลำดับจะได้ว่า

$$M = \frac{2}{3} \mu P \frac{R_o^3 - R_i^3}{R_o^2 - R_i^2} \tag{2.5 ก}$$

เมื่อเราใช้จานไปชักพักหนึ่งย่อมจะมีการสึกหรอเกิดขึ้น ซึ่งจะมีผลให้โมเมนต์ของความเสียดทานลดลง การสึกหรอเป็นไปจนกระทั่งทั่วถึงทั้งพื้นผิวของจาน การสึกหรอนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางตามเส้นรอบวงและความดัน  $p$  แต่ระยะทางตามเส้นรอบวงขึ้นอยู่กับ  $r$  เราจึงอาจเขียนความสัมพันธ์  $rp = K$  เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่และ  $K$  หาได้จากความสมดุลในแนวแกน

$$P = \int pdA = K \int_0^{2\pi R} \int_0^R dr d\theta = 2\pi KR$$

เมื่อ  $pr = K = P/(2\pi R)$  ค่าโมเมนต์หาได้จาก

$$M = \int \mu pr dA = \frac{\mu P}{2\pi R} \int_0^{2\pi R} \int_0^R r dr d\theta \tag{2.6}$$

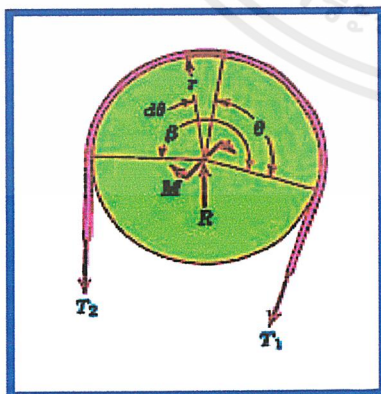
$$M = \frac{1}{2} \mu PR$$

จะเห็นได้ว่า ค่าโมเมนต์ของจานที่มีการสึกหรอจะเป็นเพียง  $\frac{1}{2} / \frac{2}{3} = \frac{3}{4}$  ของจานใหม่เท่านั้น ถ้าเราเปลี่ยนจานเป็นรูปวงแหวน โมเมนต์ความเสียดทานของวงแหวนที่ใช้แล้วจะเป็น

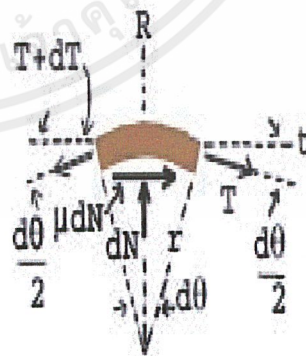
$$M = \frac{1}{2} \mu P(R_o + R_i) \tag{2.6 ก}$$

เมื่อ  $R_o$  และ  $R_i$  เป็นรัศมีรอบในและรอบนอกของวงแหวน

2.2.5 ความเสียดทานของสายพาน (Belt friction)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2.5 แรงที่มากระทำต่อสายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะของสายพานจะเห็นแกนทรงกระบอกถูกกระทำด้วยความตึงในสายพาน  $T_1$  และ  $T_2$  แรงบิด  $M$  เพื่อป้องกันการหมุนและแรงปฏิกิริยาที่ลูกปืน  $R$  ถ้า  $M$  มีทิศทางดังแสดงในรูป  $T_2$  จะมามีค่ามากกว่า  $T_1$  พร้อมกันนั้นฝั่งวัตถุอิสระของชิ้นส่วนเล็กของสายพานที่มีความยาว  $rd\theta$  ก็ได้นำมาแสดงอยู่ด้วย บนชิ้นส่วนเล็ก ๆ นี้แรงกระทำต่างๆคิดเป็นอนุพันธ์ทั้งหมด ดังนั้นจากสมการการสมดุลในแนวสัมผัส  $t$  จะได้ว่า

$$T \cos \frac{d\theta}{2} + \mu dN = (T + dT) \cos \frac{d\theta}{2}$$

เมื่อ  $dN$  คือส่วนหนึ่งของแรงตั้งฉาก

$\mu$  คือ ส.ป.ส. ความเสียดทาน

$\mu dN$  คือส่วนหนึ่งของแรงเสียดทาน มีทิศสวนกับการเคลื่อนที่ของสายพานจะได้

$$\mu dN = dT$$

เนื่องจาก  $\frac{d\theta}{2}$  เล็กมาก  $\sin \frac{d\theta}{2}$  จึงมีค่าใกล้เคียงกับ  $\frac{d\theta}{2}$  และจากสมการทั้งสองจะได้

$$\frac{dT}{T} = \mu d\theta$$

อินทิเกรตสมการนี้ได้

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \int_0^{\beta} \mu d\theta$$

หรือ

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \mu\beta$$

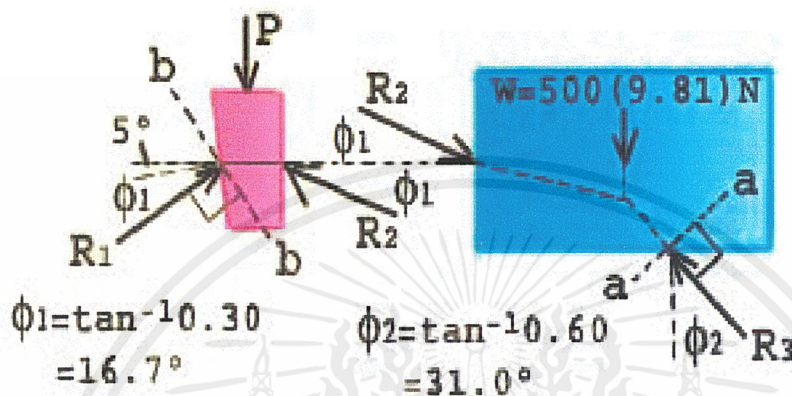
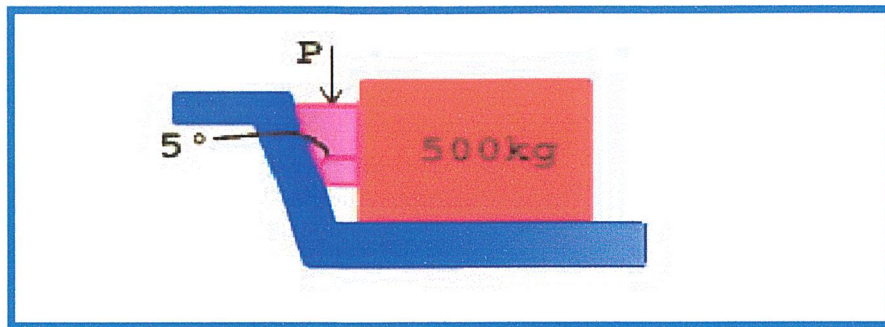
ซึ่งจะให้

$$T_2 = T_1 e^{\mu\beta} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ มุมทั้งหมดที่สายพานสัมผัสกับแกนกระบอก และมีหน่วยเป็นเรเดียน (radian) นอกจากนี้สมการที่ (2.7) ยังใช้ได้กับรูปทรงอื่นๆที่ไม่ใช่วงกลมอีกด้วย โดย  $\beta$  จะเป็นมุมทั้งหมดของการสัมผัส

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.7) ยังใช้ได้กับรอกและสายพานที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ แต่ถ้าความเร็วสูงเกินไปแล้ว สายพานจะเลื่อนหลุดออกมาทำให้สมการที่ (2.7) มีข้อผิดพลาดไป

**ตัวอย่างที่ 2.3** แท่งคอนกรีตมวล 500 กก. วางอยู่บนพื้นราบ ถูกดันโดยลิ้ม 5 องศาที่มีแรง  $P$  กระทำ ถ้า ส.ป.ส. ความเสียดทานสถิตระหว่างลิ้มกับผนัง และกับแท่งคอนกรีตเท่ากับ 0.30 และ ส.ป.ส. ความเสียดทานสถิตระหว่างแท่งคอนกรีตกับพื้นราบเท่ากับ 0.60 จงหาแรง  $P$  น้อยที่สุดใน การเคลื่อนแท่งคอนกรีต



รูปที่ 2.2.6 คอนกรีตมวล 500 กก. วางบนพื้นราบ ถูกดันโดยลิ้ม 5 องศา มีแรง P กระทำ

วิธีทำ

พิจารณาผังวัตถุอิสระของลิ้มและแท่งคอนกรีต จากผังวัตถุอิสระของลิ้มจะเห็นได้ว่ามีแรง  $P, R_1$  และ  $R_2$  กระทำต่อลิ้ม โดยมุม  $\phi_1, \phi_2$  เป็นมุมของความเสียดทานสถิต ซึ่งวัดจากเส้นตั้งฉากของระนาบสัมผัสผืนนั้นๆ และหาได้จากสูตร  $\phi = \tan^{-1} \mu$

แรง  $P$  ขนาดไม่ทราบ ทิศทางลงในแนวตั้ง

แรง  $R_1$  ขนาดไม่ทราบ ทิศทางไปทางขวา ทำมุมยก  $\phi_1 + 5^\circ = 21.7^\circ$

แรง  $R_2$  ขนาดไม่ทราบ ทิศทางไปทางซ้าย ทำมุมยก  $\phi_1 = 16.7^\circ$

จากผังวัตถุอิสระของแท่งคอนกรีต มีแรง  $R_2, R_3$  และ  $W$

แรง  $W$  ขนาด 4905 N ทิศทางลงไปในแนวตั้ง

แรง  $R_1$  ขนาดไม่ทราบ ทิศทางไปทางขวา ทำมุมกดลง  $\phi_1 = 16.7^\circ$

แรง  $R_3$  ขนาดไม่ทราบ ทิศทางไปทางซ้าย ทำมุมยก  $\phi_2 = 31.0^\circ$

ดังนั้นจากผังวัตถุอิสระของแท่งคอนกรีต มุมของ  $R_2$  กับแกน a-a =  $16.7^\circ + 31.0^\circ = 47.7^\circ$

$$[\sum F_a = 0] 500 (9.81) \sin 31.1^\circ - R_2 \cos 47.7^\circ = 0$$

$$R_2 = 3747 \text{ N}$$

จากผังวัตถุอิสระของลิ้ม มุมระหว่าง  $R_2$  กับแกน b-b =  $90^\circ - (2\phi_1 + 5^\circ) = 51.6^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมุมระหว่าง P กับแกน b-b =  $\phi_1 + 5^\circ = 2.17^\circ$

$$\left[ \sum F_b = 0 \right] 3747 \cos 51.6^\circ - P \cos 21.7^\circ = 0$$

$$P = 2505 \text{ N}$$

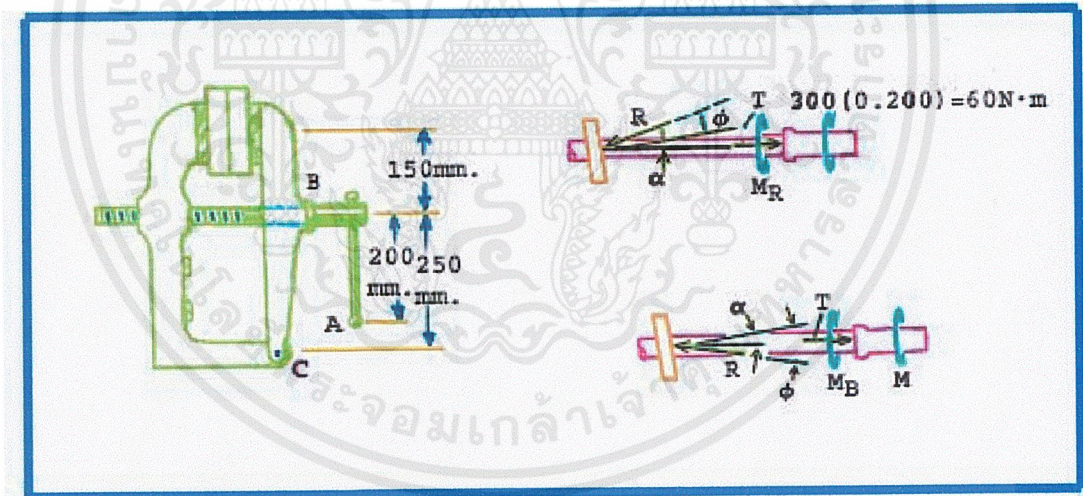
ตอบ

### ข้อสังเกต

1. ควรพิจารณา แรงปฏิกิริยา  $R_2$  ว่าทำไมจึงมีทิศทางสวนกัน ในแต่ละฝั่งวัตถุอิสระ ต้องไม่ลืมว่าแรงเสียดทานจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศที่มีแนวโน้มว่าจะเคลื่อนที่ไป
2. จะเห็นได้ว่าเราหลีกเลี่ยงการแก้ปัญหาลายสมการพร้อมกันโดยมได้คำนวณผ่านค่า  $R_3$  สำหรับแท่งวัตถุและ  $R_2$  สำหรับลิ้ม

**ตัวอย่างที่ 2.4** single-threaded screw ของปากกาดัวหนึ่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 25 มม. และมีช่วงเกลียว 5 มม. ส.ป.ส. ความเสียดทานสถิตในเกลียวมีค่า 0.20 แรง 300N กระทำตั้งฉากกับด้ามจับที่ A ทำให้เกิดแรงหนีบ 5 kN. จงหา

- ก) โมเมนต์ของแรงเสียดทาน  $M_B$  ที่ B เนื่องมาจากสกรูกระทำต่อตัวปากกา
- ข) แรง Q ที่กระทำตั้งฉากกับด้ามจับที่ A เพื่อที่จะคลายปากกา



รูปที่ 2.2.7 แรงที่มากกระทำต่อปากกา

### วิธีทำ

จากผนังวัตถุอิสระของปากกา ให้แรง T เป็นแรงกดจากสกรู (แรงดึงในสกรู)

$$\left[ \sum M_c = 0 \right] 5(400) - 250T \quad T = 8 \text{ kN}$$

มุม  $\alpha$  และมุมแรงเสียดทาน  $\phi$  ของสกรูเกลียวหาได้โดย

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L}{2r} = \tan^{-1} \frac{5}{2\pi(12.5)} = 3.64^\circ$$

$$\phi = \tan^{-1} \mu = \tan^{-1} 0.20 = 11.31^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรัศมีเฉลี่ยของเกลียว  $r = 12.5 \text{ mm}$ .

ก. ขณะขันให้แน่น

จากผังวัตถุอิสระให้  $R$  แทนแรงทั้งหมดที่กระทำของสกรูทำมุมกับเส้นตั้งฉากของเกลียว โมเมนต์ที่กระทำมีค่า  $300(0.200) = 60 \text{ N.m}$  ทิศทางตามเข็มนาฬิกาเพื่อดำเนินการเคลื่อนที่ จากสมการ(1.4)แทน  $W$  ด้วย  $T$  จะได้

$$M = Tr \tan(\phi - \alpha)$$

$$60 - M_B = 8000(0.0125) \tan(11.31^\circ - 3.64^\circ)$$

$$M_B = 33.3 \text{ N.m}$$

ข. ขณะคลาย

จากผังวัตถุอิสระในรูป(ข)แรง  $R$  กระทำเป็นมุมแรงเสียดทาน ในแนวที่จะดำเนินการเคลื่อนที่ โมเมนต์ของแรงเสียดทาน  $M_B = 33.3 \text{ N.m}$  กระทำในทิศตามเข็มนาฬิกา มุมระหว่าง  $R$  กับแนวแกนของสกรูเท่ากับ  $\phi - \alpha$

$$M = Tr \tan(\phi - \alpha)$$

$$M' - 33.3 = 8000(0.0125) \tan(11.31^\circ - 3.64^\circ)$$

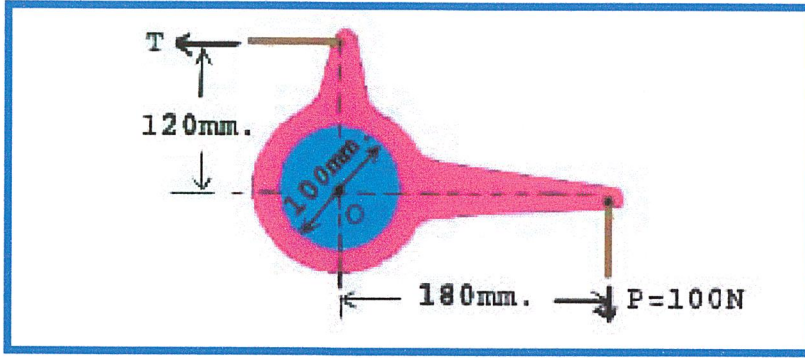
$$M' = 46.8 \text{ N.m}$$

ดังนั้นแรงบนด้ามจับ เพื่อคลายปากกาเท่ากับ

$$Q = M'/d = 46.8/2 = 234 \text{ N}$$

ตอบ

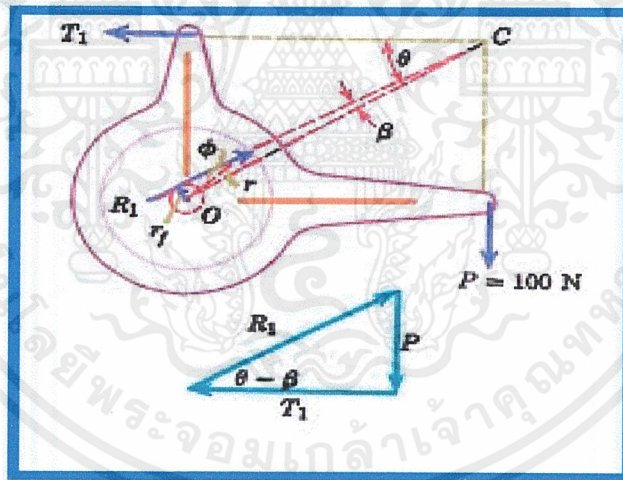
**ตัวอย่างที่ 4.5** กระเดื่องตีระฆัง สวมอยู่กับแกนเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ซึ่งตั้งแน่นแรงในแนวราบ  $T$  กระทำเพื่อให้กระเดื่องอยู่ในภาวะสมดุลกับแรง  $P = 100 \text{ N}$  จงหาค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแรง  $T$  โดยที่กระเดื่องไม่หมุน ส.ป.ส.ความเสียดทานสถิตระหว่างแกนกับกระเดื่องเท่ากับ 0.20



รูปที่ 2.2.8 แรงที่มากกระทำต่อกระเดื่อง

วิธีทำ

การหมุนจะเกิดขึ้นเมื่อแรงปฏิกิริยา  $R$  ทำมุม  $\phi = \tan^{-1} \mu$  กับเส้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัส และสัมผัสกับวงกลมความเสียดทาน จากรูปที่แสดงผังวัตถุอิสระ จะเห็นว่า มีแรง 3 แรง กระทำต่อกระเดื่องและแรงทั้ง 3 ตัดกันที่จุด  $C$



รูปที่ 2.2.9 เมื่อแรงปฏิกิริยา  $R$  ทำมุมกับเส้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัสและสัมผัสกับวงกลม

ดังนั้น

มุมของความเสียดทาน  $\phi = \tan^{-1} \mu = \tan^{-1} 0.20 = 11.31^\circ$

รัศมีของวงกลมความเสียดทาน  $r_f = r \sin \phi = 50 \sin 11.31^\circ = 9.81\text{ mm}$ .

มุม  $\phi = \tan^{-1} \frac{120}{180} = 33.7^\circ$

มุม  $\beta = \sin^{-1} \frac{r_f}{OC} = \sin^{-1} \frac{9.81}{\sqrt{(120)^2 + (180)^2}} = 2.60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) กระเดื่องมีแนวโน้มหมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปสามเหลี่ยมของแรง

$$T_1 = P \csc(\theta - \beta) = 100 \csc(33.7^\circ - 2.60^\circ)$$

$$T_1 = T_{\max} = 165.8 \text{ N}$$

ตอบ

(ข) กระเดื่องมีแนวโน้มหมุนตามเข็มนาฬิกา

จากรูปสามเหลี่ยมของแรง

$$T_2 P \csc(\theta + \beta) = 100 \csc(33.7^\circ + 2.60^\circ)$$

$$T_2 = T_{\min} = 136.2 \text{ N}$$

ตอบ

**ตัวอย่างที่ 2.6** เชือกผูกกับมวล 100 กก.แขวนพาดบนทรงกระบอกกลมตึงและมีแรงดึง P กระทำเพื่อให้สมดุล ส.ป.ส.ความเสียดทานสถิตระหว่างเชือกกับทรงกระบอกเท่ากับ 0.30(ก) ถ้า  $\alpha = 0$  จงหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของแรง P ที่ยังทำให้ระบบสมดุลอยู่(ข) ถ้า P = 500 N จงหาค่าต่ำสุดของ  $\alpha$  ก่อนที่เชือกจะเลื่อนไถล

วิธีทำ

จากสมการ (1.7) ซึ่ง

(ก)  $\alpha = 0, B = \pi/2$

ถ้ามวลมีแนวโน้มจะเคลื่อนที่ขึ้น

$$T_2 = P_{\max}, T_1 = 981 \text{ N}$$

$$P_{\max} / 981 = e^{0.30(\pi/2)}, P_{\max} = 981(1.602) = 1572 \text{ N}$$

ถ้ามวลมีแนวโน้มจะเคลื่อนที่ลง

$$T_2 = 981 \text{ N}, T_1 = P_{\min}$$

$$981 / P_{\min} = e^{0.30(\pi/2) \cdot P_{\min} = 981 / 1.602 = 612}$$

(ข)  $T_2 = 981 \text{ N}, T_1 = P = 500 \text{ N}$

จากสมการที่(1.7)จะได้

$$981 / 500 = e^{0.30\beta}, 0.30\beta = \ln(981 / 500) = 0.674$$

$$\beta = 2.247 \text{ rad or } \beta = 2.47 \left( \frac{360}{2} \right) = 128.7^\circ$$

$$\alpha = 128.7^\circ - 90^\circ = 38.7^\circ$$

**ข้อสังเกต**

1. ต้องใช้มุม  $\beta$  ในหน่วยเรเดียน
2. จากสมการ(1.7)  $T_2 > T_1$  เท่านั้น
3. รัศมีของทรงกระบอกไม่ได้นำมาใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 คอมพิวเตอร์ช่วยสอน

### 2.3.1 คอมพิวเตอร์ช่วยสอน(CAI)คืออะไร

คนส่วนใหญ่มักจะรู้จักคอมพิวเตอร์ช่วยสอนในชื่อของ CAI ซึ่งมาจากคำในภาษาอังกฤษว่า Computer-Assisted หรือ Aided Instruction คอมพิวเตอร์ช่วยสอน (CAI) หมายถึง สื่อการเรียนการสอนทางคอมพิวเตอร์ในการนำเสนอสื่อประสมอันได้แก่ ข้อความ ภาพฟิก แผนภูมิ กราฟ ภาพเคลื่อนไหว วิดีทัศน์และเสียง เพื่อถ่ายทอดเนื้อหาบทเรียนหรือองค์ความรู้ในลักษณะที่ใกล้เคียงกับการสอนจริงในห้องเรียนมากที่สุด โดยมีเป้าหมายสำคัญคือการได้มาซึ่งคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สามารถดึงดูดความสนใจของผู้เรียนและกระตุ้นผู้เรียนได้ตลอดเวลาตั้งนั้นผู้สอนจะสามารถนำคอมพิวเตอร์ช่วยสอนไปช่วยการเรียนของตนได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะมีงานวิจัยหลายชิ้นที่สนับสนุนว่า ผู้เรียนที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยสอนในการเรียนใช้เวลาเพียงสองในสามของผู้เรียนด้วยวิธีที่สอนตามปกติ ในขณะที่เดียวกันผู้เรียนสามารถนำคอมพิวเตอร์ช่วยสอนไปใช้ในการเรียนด้วยตนเอง โดยปราศจากข้อจำกัดด้านเวลาและสถานที่ในการศึกษา

### 2.2.2 คุณลักษณะสำคัญของคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

คุณลักษณะที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของคอมพิวเตอร์ช่วยสอน 4 ประการ ได้แก่

1. **สารสนเทศ(Information)** สารสนเทศ(Information)ในที่นี้ หมายถึง เนื้อหาสาระที่ได้รับ การเรียบเรียงแล้วเป็นอย่างดีซึ่งทำให้ผู้เรียนรู้หรือได้รับทักษะอย่างหนึ่งอย่างใดตามที่ผู้สร้างได้ กำหนดวัตถุประสงค์ไว้ โดยการนำเสนอเนื้อหานี้อาจเป็นการนำเสนอในรูปแบบต่างๆซึ่งอาจจะ เป็นลักษณะทางตรงหรือทางอ้อมก็ได้ โดยลักษณะทางตรงก็ได้แก่การเสนอเนื้อหาในคอมพิวเตอร์ช่วย สอนประเภทเกม สารสนเทศเป็นคุณลักษณะสำคัญประการหนึ่งของคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่ช่วย แยกความแตกต่างระหว่างคอมพิวเตอร์ช่วยสอนประเภทเกมออกจากซอฟต์แวร์เกมซึ่งมุ่งเน้นแต่ ความบันเทิงและความเพลิดเพลินของผู้ใช้โดยไม่คำนึงถึงการให้ความรู้หรือทักษะแก่ผู้เรียนแต่ อย่างใด

2. **ความแตกต่างระหว่างบุคคล(Individualization)** การตอบสนองของความแตกต่าง ระหว่างบุคคลคือลักษณะสำคัญของคอมพิวเตอร์ช่วยสอน บุคคลแต่ละบุคคลมีความแตกต่างกัน ทางการเรียนรู้ซึ่งเกิดจากบุคคลิกภาพ สติปัญญา ความสนใจ พื้นฐานความรู้ที่แตกต่างกันออกไป (Individual) คอมพิวเตอร์ช่วยสอนนั้นจึงต้องออกแบบให้มีความยืดหยุ่นมากพอที่ผู้เรียนจะมี อิสระในการเรียนของตนเองและมีรูปแบบที่เหมาะสมกับตนเองได้ ซึ่งก็มีลักษณะสำคัญได้แก่

การควบคุมเนื้อหา การเลือกที่เรียนส่วนใด ชำมส่วนใด ออกจากบทเรียนเมื่อใด หรือย้อนกลับมาเรียนในส่วนที่ยังไม่ได้ศึกษา เช่น มีเมนูหรือรายการที่แยกเนื้อหาตามหัวข้ออย่าง ชัดเจนและสามารถกระทำได้ง่าย

การควบคุมลำดับของการเรียน การเลือกที่จะเรียนส่วนใด ก่อน-หลังหรือการสร้างลำดับการเรียนด้วยตนเอง เช่น ในลักษณะการเรียนเนื้อหาแบบโยงใยหรือสื่อหลายมิติ (Hypermedia) ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน ผู้เรียนเองสามารถที่จะคัดเลือกหัวข้อที่ตนเองสนใจจะศึกษาหรือตามพื้นฐานความรู้ของตนได้

การควบคุมการฝึกปฏิบัติหรือการทดสอบ ความต้องการที่จะฝึกปฏิบัติหรือทำแบบทดสอบหรือไม่ หากกระทำมาน้อยเพียงใด เช่น การใช้ปุ่มควบคุมต่างๆ จัดหาไว้ทุกหน้าที่จำเป็น เช่น ปุ่มเลิกทำ ปุ่มกลับไปหน้าหลัก เป็นต้น

3. **การโต้ตอบ(Interactive)** ในที่นี้คือการโต้ตอบระหว่างผู้เรียนกับคอมพิวเตอร์ช่วยสอนการเรียนการสอนที่ดีที่สุดคือการเรียนการสอนในลักษณะเปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้โต้ตอบกับคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเพราะจะทำให้การเรียนมีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากผู้เรียนจะได้ฝึกทักษะในการเรียนและเข้าใจมากยิ่งขึ้น

4. **การให้ผลป้อนกลับโดยทันที(Immediate Feedback)** การให้ผลตอบกลับแก่ผู้เรียนในทันทีหมายถึงการที่คอมพิวเตอร์ช่วยสอนจะต้องมีการทดสอบหรือประเมินความเข้าใจของผู้เรียนในเนื้อหาหรือทักษะต่างๆตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ด้วย ซึ่งงานวิจัยได้สนับสนุนว่าการให้ผลตอบกลับนั้นจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนได้เป็นอย่างดี แต่สิ่งอื่นนั้นไม่สามารถที่จะประเมินผลตอบกลับการเรียนของผู้เรียนพร้อมกับการให้ผลป้อนกลับโดยฉับพลันได้ดีเท่ากับคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

### 2.2.3 ประโยชน์ของคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

1. คอมพิวเตอร์ช่วยสอนสามารถช่วยให้ผู้เรียนสามารถที่จะศึกษาได้ด้วยตนเองในเวลาและสถานที่ที่สะดวก เช่นสามารถที่จะศึกษาได้เองที่บ้านได้ ณ เวลาใดก็ได้ที่อยากจะศึกษา
2. สามารถเป็นสื่อที่ใช้เสริมหรือทบทวนบทเรียนที่เรียนในชั้นเรียนโดยสามารถที่จะศึกษาบทที่ตามไม่ทันในชั้นเรียนได้และไม่จำกัดครั้งในการศึกษา
3. ไม่เกิดความเบื่อหน่ายในการเรียนเพราะสามารถโต้ตอบ ฝึกการคิด ทำให้สนุกที่จะเรียนรู้ ทั้งยังเป็นจุดเริ่มสำหรับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยสอนและศึกษาคอมพิวเตอร์อีกด้วย
4. ช่วยให้อำนวยความสะดวกสำหรับผู้ที่อยู่ห่างไกลจากชุมชนซึ่งประสบปัญหาขาดแคลนครูผู้สอนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนจึงเป็นทางออกหนึ่งที่สามารถช่วยได้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การกำหนดเนื้อหา

##### 3.1.1 ความเสียดทาน

- ความหมาย
- ชนิดของความเสียดทาน
- ความเสียดทานแห้ง

##### 3.1.2 ความเสียดทานในเครื่องจักรกล

- ลิ้ม(Wedge)
- สกรู(Screw)
- ลูกปืน(Journal bearing)
- ความเสียดทานของจานและพิวอท(Disk and pivot friction)
- ความเสียดทานของสายพาน(Belt friction)

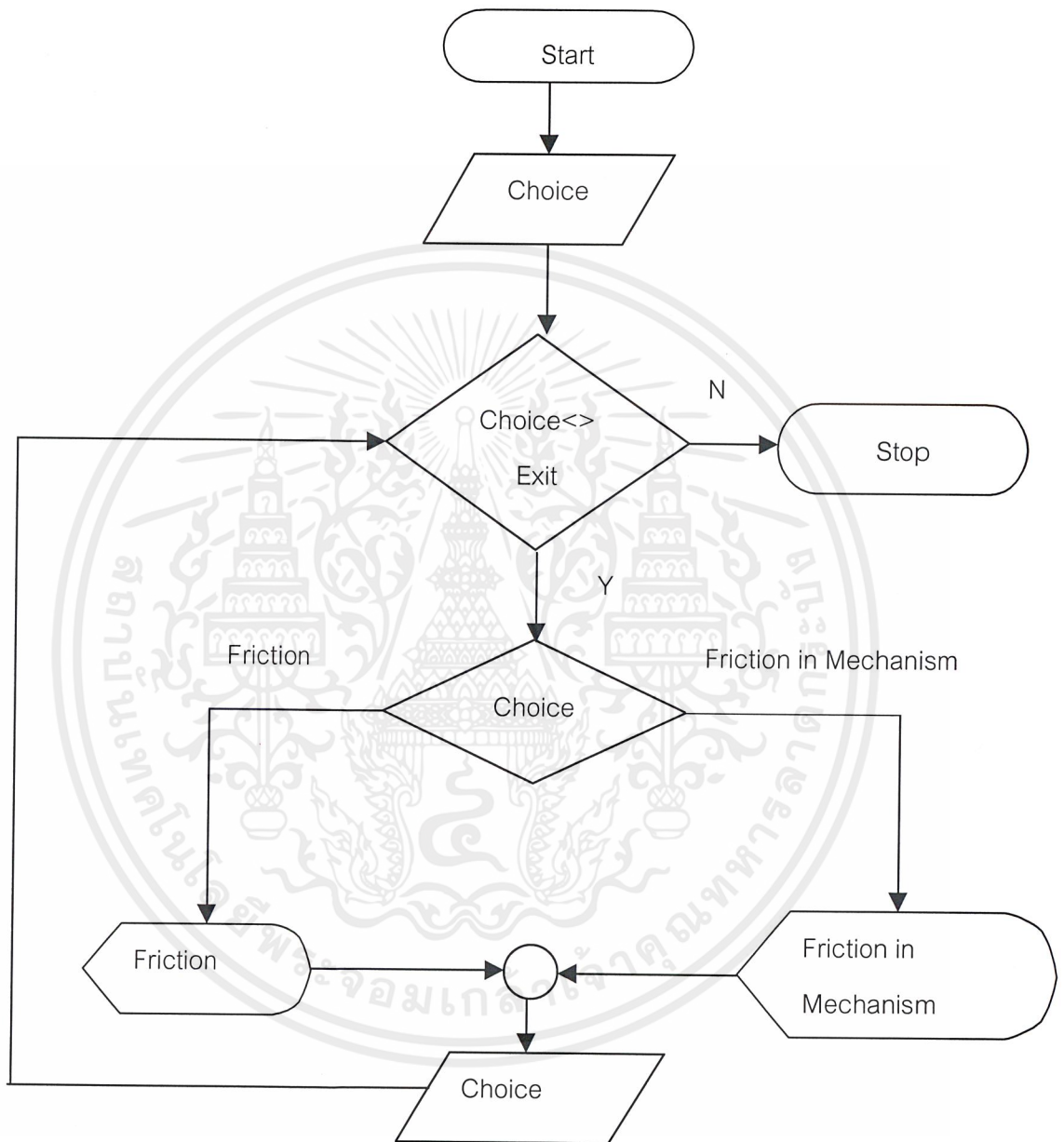
#### 3.2 การพัฒนาโปรแกรมช่วยสอน

- ออกแบบโปรแกรมที่สอดคล้องกับเนื้อหา
- จัดทำแบบฝึกหัดและเฉลย
- ทำโปรแกรมช่วยสอน
- ทดสอบโปรแกรมพร้อมทั้งหาข้อผิดพลาด
- แก้ไขและปรับปรุงโปรแกรม
- ออกแบบและจัดทำคู่มือสำหรับโปรแกรม

#### 3.3 โปรแกรมที่ประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมช่วยสอน

- 3D Studio Max release 4.0 for Windows 95/98/2000
- Microsoft Visual C++ for Windows 95/98/nt
- Adobe Photoshop 6.0

3.4 ผังงานของโปรแกรมช่วยสอนเรื่องความเสียดทาน



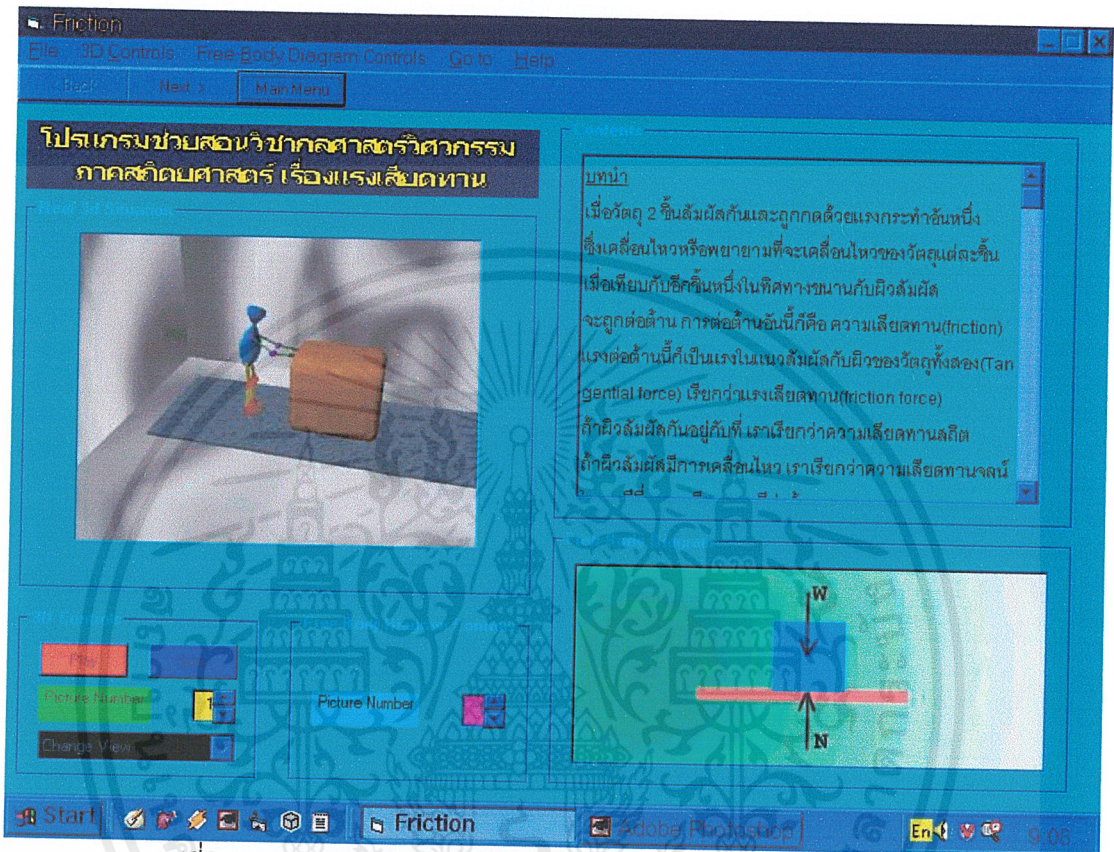
รูปที่3.4.1 ผังงานของหน้าจอเนื้อหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การออกแบบฟอร์มของโปรแกรม

รูปแบบและหน้าที่ของฟอร์ม แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

- ชื่อฟอร์ม content  
หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ content



รูปที่ 3.5.1 แสดงฟอร์ม content

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความและรูป free body diagrams  
 : save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
 : print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
 ออกทางเครื่องพิมพ์  
 : exit ออกจากโปรแกรม  
 : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
 : stop หยุดภาพ 3 มิติ  
 : previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้  
 : next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
 : change view : Perspective แสดงภาพปกติ

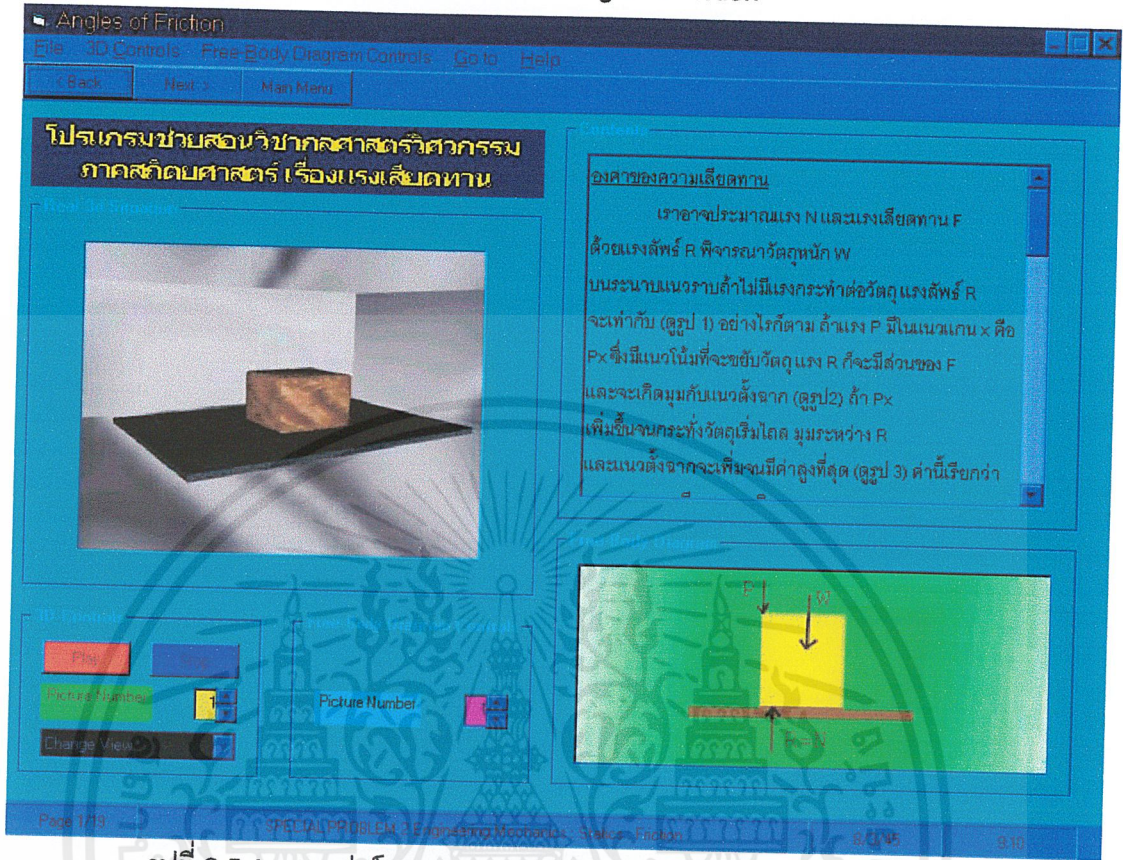
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- : top แสดงภาพด้านบน
- : side แสดงภาพด้านข้าง
- : front แสดงภาพด้านหน้า
- : free body diagram controls : previous แสดงภาพ 2 มิติก่อนหน้านี้
- : next แสดงภาพ 2 มิติภาพต่อไป
- : go to : previous แสดงฟอร์มก่อนหน้านี้
- : next แสดงฟอร์มต่อไป
- : go to : หน้าหลัก ไปยังฟอร์มหน้าหลัก
- : ลืม ไปยังฟอร์มลืม
- : สกรู ไปยังฟอร์มสกรู
- : งานและพิวอทไปยังฟอร์มงานและพิวอท
- : สายพาน ไปยังฟอร์มสายพาน
- : ลูกปืน ไปยังฟอร์มลูกปืน
- : help คู่มือการใช้โปรแกรม
- : help project ข้อมูลผู้จัดทำ
- : about us



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม angle of friction
- หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ angle of friction



รูปที่ 3.5.1 แสดงฟอร์ม angle of friction

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความและรูป free body diagrams  
 : save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
 : print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
 ออกทางเครื่องพิมพ์  
 : exit ออกจากโปรแกรม
- : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
 : stop หยุดภาพ 3 มิติ  
 : previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้  
 : next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
 : change view : Perspective แสดงภาพปกติ  
 : top แสดงภาพด้านบน  
 : side แสดงภาพด้านข้าง  
 : front แสดงภาพด้านหน้า

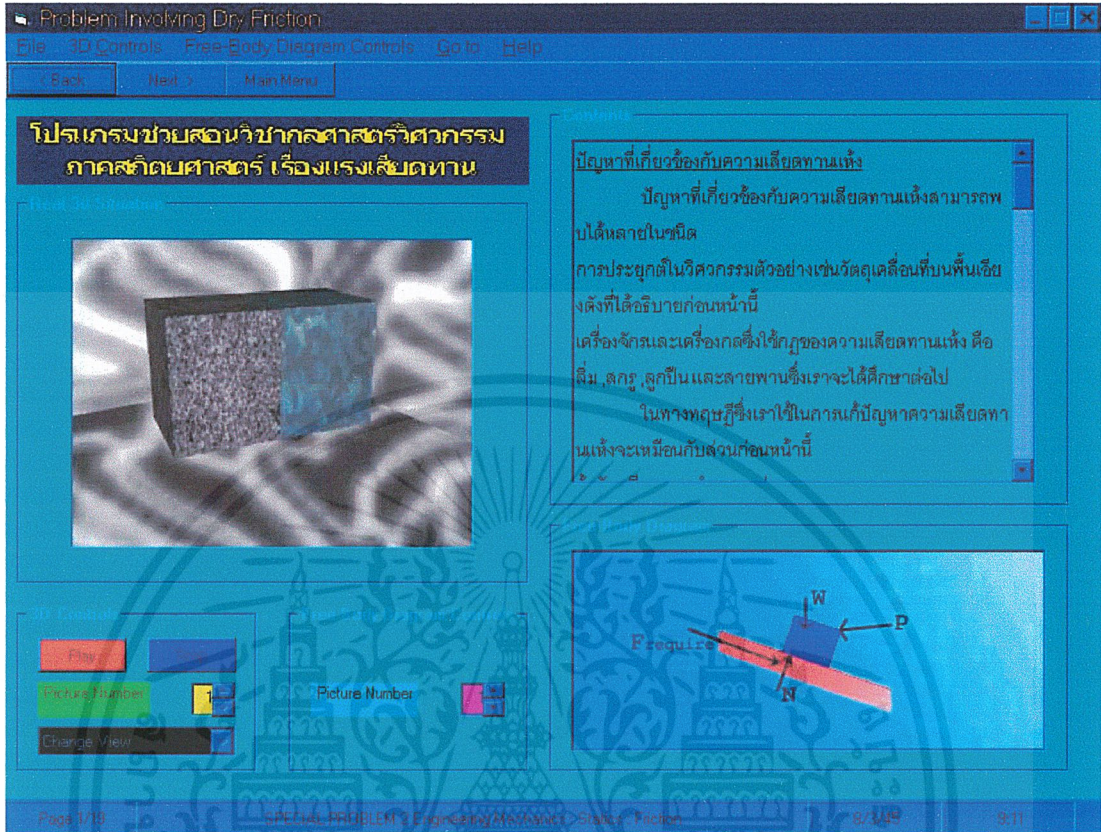
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

: free body diagram controls	: previous	แสดงภาพ 2 มิติก่อนหน้านี้
	: next	แสดงภาพ 2 มิติภาพต่อไป
: go to	: previous	แสดงฟอร์มก่อนหน้า
	: next	แสดงฟอร์มต่อไป
	: go to	: <b>หน้าหลัก</b> ไปยังฟอร์มหน้าหลัก
		: <b>ลิ้ม</b> ไปยังฟอร์มลิ้ม
		: <b>สกรู</b> ไปยังฟอร์มสกรู
		: <b>จานและพิวอท</b> ไปยังฟอร์มจานและ พิวอท
		: <b>สายพาน</b> ไปยังฟอร์มสายพาน
		: <b>ลูกปืน</b> ไปยังฟอร์มลูกปืน
: help	: help project	คู่มือการใช้โปรเจค
	: about us	ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม Problem Involving Dry Friction  
หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ Problem Involving Dry Friction



รูปที่ 3.5.3 แสดงฟอร์ม Problem Involving Dry Friction

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความ
- : save pic จัดเก็บรูป free body diagrams
- : print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
ออกทางเครื่องพิมพ์
- : exit ออกจากโปรแกรม
- : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ
- : stop หยุดภาพ 3 มิติ
- : previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้
- : next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป
- : change view : Perspective แสดงภาพปกติ
- : top แสดงภาพด้านบน
- : side แสดงภาพด้านข้าง
- : front แสดงภาพด้านหน้า

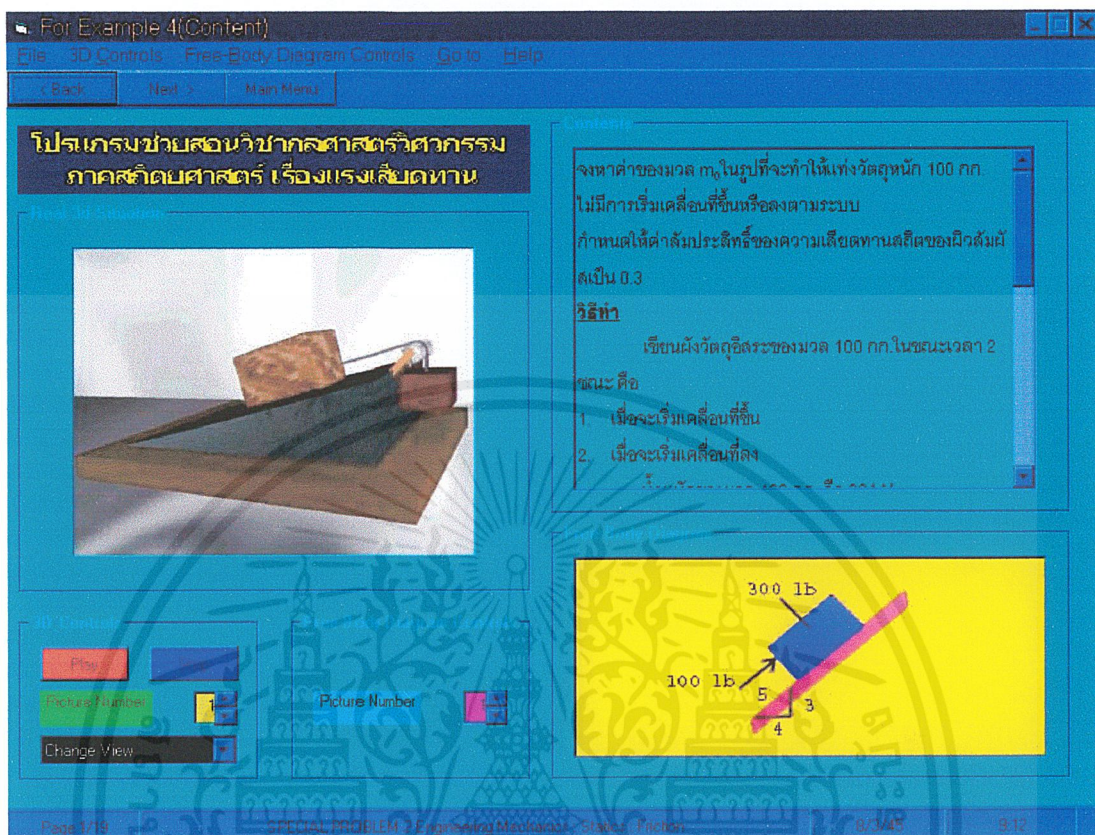
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- : free body diagram controls : previous แสดงภาพ 2 มิติ ก่อนหน้านี้
- : next แสดงภาพ 2 มิติ ภาพต่อไป
- : go to : previous แสดงฟอร์มก่อนหน้า
- : next แสดงฟอร์มต่อไป
- : go to : **หน้าหลัก** ไปยังฟอร์มหน้าหลัก
- : **ลิ้ม** ไปยังฟอร์มลิ้ม
- : **สกรู** ไปยังฟอร์มสกรู
- : **งานและพิวอท** ไปยังฟอร์มงานและพิวอท
- : **สายพาน** ไปยังฟอร์มสายพาน
- : **ลูกปืน** ไปยังฟอร์มลูกปืน
- : **help** : **help project** คู่มือการใช้โปรเจค
- : **about us** ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม For Example 4(Content)  
หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ For Example 4(Content)



รูปที่ 3.5.4 แสดงฟอร์ม For Example 4(Content)

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความ  
: save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
: print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
: exit ออกจากเครื่องพิมพ์  
: 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
: stop หยุดภาพ 3 มิติ  
: previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้  
: next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
: change view : Perspective แสดงภาพปกติ  
: top แสดงภาพด้านบน  
: side แสดงภาพด้านข้าง  
: front แสดงภาพด้านหน้า

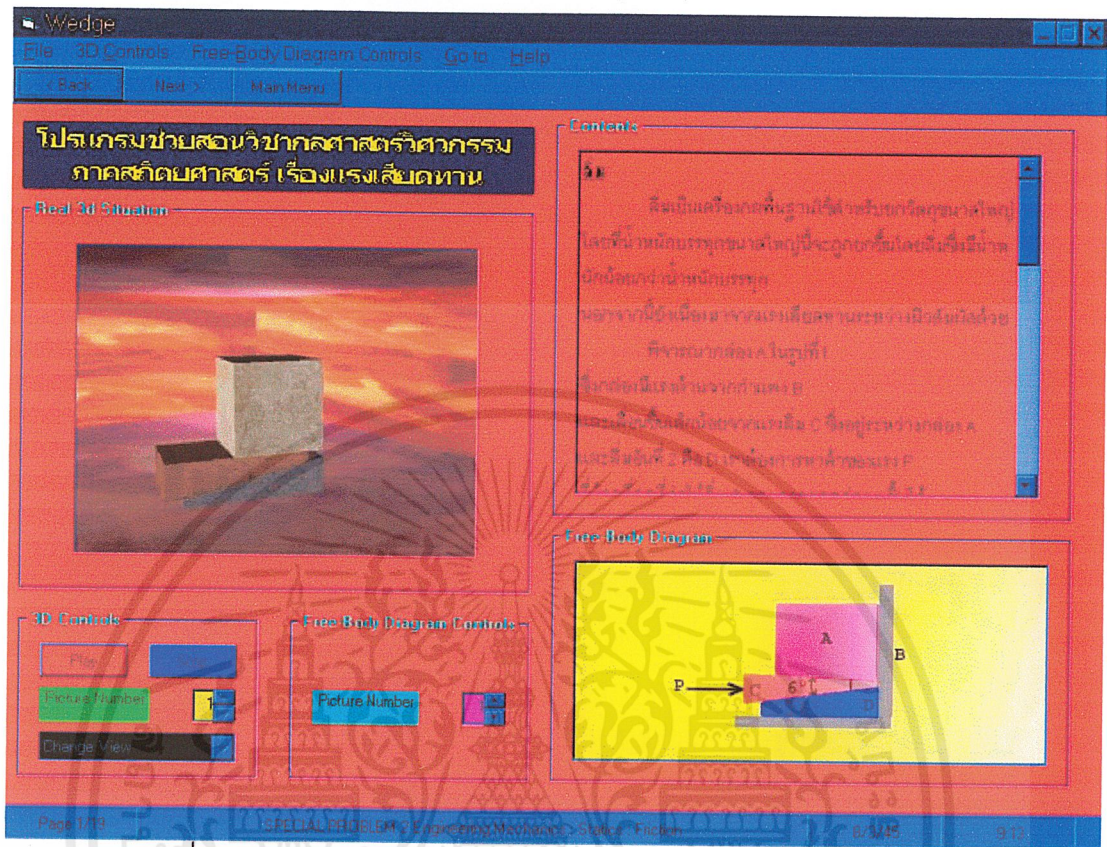
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

: free body diagram controls : previous แสดงภาพ 2 มิติ ก่อนหน้า  
 : next แสดงภาพ 2 มิติ ภาพต่อไป  
 : go to : previous แสดงฟอร์มก่อนหน้า  
 : next แสดงฟอร์มต่อไป  
 : go to : หน้าที่ก ไปยังฟอร์มหน้าหลัก  
 : ลืม ไปยังฟอร์มลืม  
 : สกรู ไปยังฟอร์มสกรู  
 : งานและพิวอท ไปยังฟอร์มงานและ  
 พิวอท  
 : สายพาน ไปยังฟอร์มสายพาน  
 : ลูกปืน ไปยังฟอร์มลูกปืน  
 : help : help project คู่มือการใช้โปรแกรม  
 : about us ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม Wedge  
หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ Wedge



รูปที่ 3.5.5 แสดงฟอร์ม Wedge

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความ  
: save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
: print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
ออกทางเครื่องพิมพ์  
: exit ออกจากโปรแกรม
- : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
: stop หยุดภาพ 3 มิติ  
: previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้า  
: next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
: change view : Perspective แสดงภาพปกติ  
: top แสดงภาพด้านบน  
: side แสดงภาพด้านข้าง  
: front แสดงภาพด้านหน้า

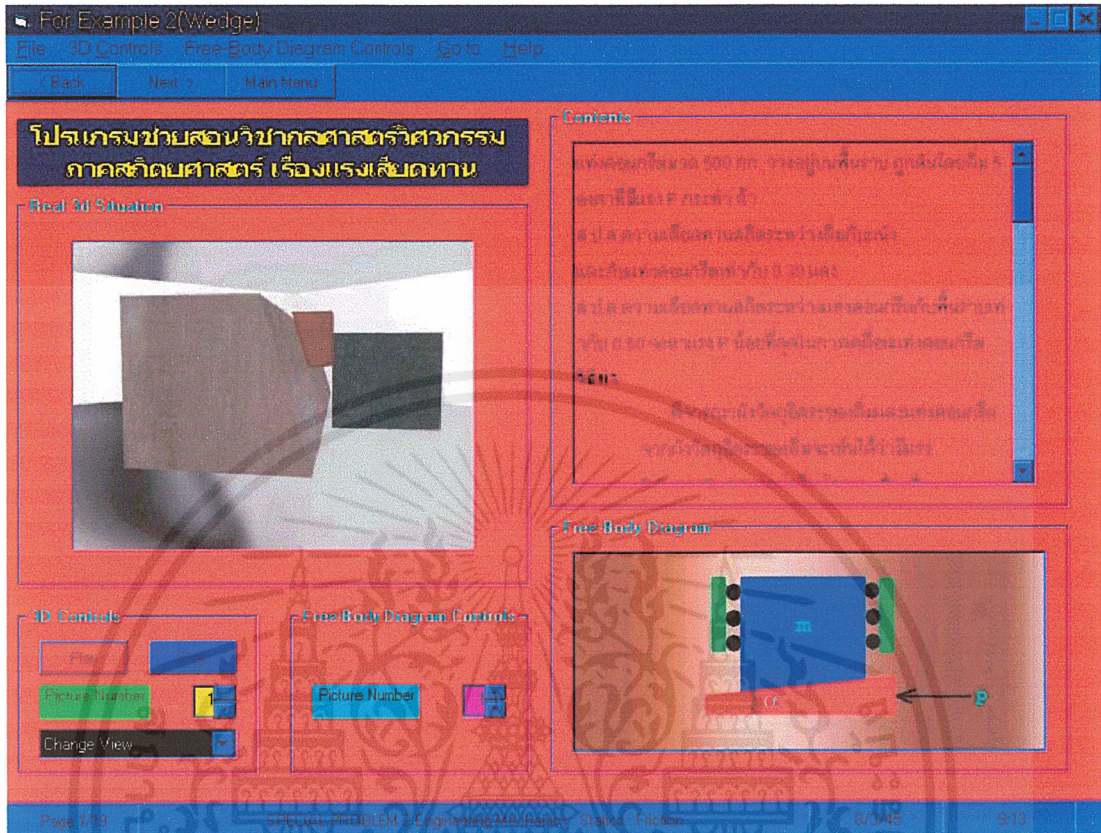
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- : free body diagram controls : previous แสดงภาพ 2 มิติ ก่อนหน้านี้  
 : next แสดงภาพ 2 มิติ ภาพต่อไป
- : go to : previous แสดงฟอร์มก่อนหน้า  
 : next แสดงฟอร์มต่อไป
- : go to : หน้าหลัก ไปยังฟอร์มหน้าหลัก  
 : ลืม ไปยังฟอร์มลืม  
 : สกรู ไปยังฟอร์มสกรู  
 : จานและพิวอท ไปยังฟอร์มจานและ  
 พิวอท  
 : สายพาน ไปยังฟอร์มสายพาน  
 : ลูกปืน ไปยังฟอร์มลูกปืน
- : help : help project คู่มือการใช้โปรแกรม  
 : about us ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม For Example(Wedge)  
 หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ For Example(Wedge)



รูปที่ 3.5.6 แสดงฟอร์ม For Example(Wedge)

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความ  
 : save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
 : print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
 ออกทางเครื่องพิมพ์  
 : exit ออกจากโปรแกรม
- : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
 : stop หยุดภาพ 3 มิติ  
 : previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้  
 : next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
 : change view : Perspective แสดงภาพปกติ  
 : top แสดงภาพด้านบน  
 : side แสดงภาพด้านข้าง  
 : front แสดงภาพด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- : free body diagram controls : previous แสดงภาพ 2 มิติ ก่อนหน้านี้  
 : next แสดงภาพ 2 มิติ ภาพต่อไป
- : go to : previous แสดงฟอร์มก่อนหน้า  
 : next แสดงฟอร์มต่อไป
- : go to : หน้าหลัก ไปยังฟอร์มหน้าหลัก  
 : ลืม ไปยังฟอร์มลืม  
 : สกรู ไปยังฟอร์มสกรู  
 : งานและพิวอท ไปยังฟอร์มงานและ  
 พิวอท  
 : สายพาน ไปยังฟอร์มสายพาน  
 : ลูกปืน ไปยังฟอร์มลูกปืน
- : help : help project คู่มือการใช้โปรแกรม  
 : about us ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม Skrew  
หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ Skrew



รูปที่ 3.5.7 แสดงฟอร์ม Skrew

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความ  
: save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
: print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
ออกทางเครื่องพิมพ์  
: exit ออกจากโปรแกรม
- : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
: stop หยุดภาพ 3 มิติ  
: previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้  
: next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
: change view : Perspective แสดงภาพปกติ  
: top แสดงภาพด้านบน  
: side แสดงภาพด้านข้าง  
: front แสดงภาพด้านหน้า

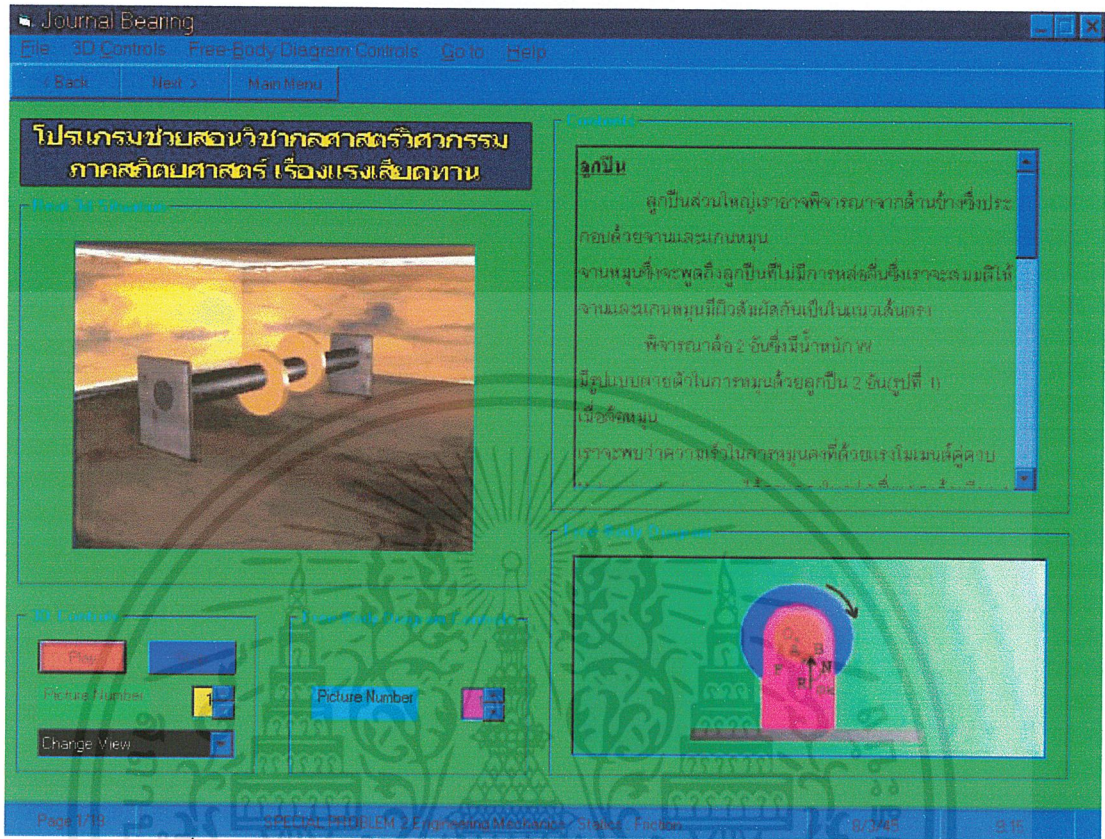
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- : free body diagram controls : previous แสดงภาพ 2 มิติ ก่อนหน้านี้
- : next แสดงภาพ 2 มิติ ภาพต่อไป
- : go to : previous แสดงฟอร์มก่อนหน้า
- : next แสดงฟอร์มต่อไป
- : go to : หน้าหลัก ไปยังฟอร์มหน้าหลัก
- : ลืม ไปยังฟอร์มลืม
- : สกรู ไปยังฟอร์มสกรู
- : งานและพิวอท ไปยังฟอร์มงานและพิวอท
- : สายพาน ไปยังฟอร์มสายพาน
- : ลูกปืน ไปยังฟอร์มลูกปืน
- : help : help project คู่มือการใช้โปรเจค
- : about us ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม Journal Bearing  
หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ Journal Bearing



รูปที่ 3.5.8 แสดงฟอร์ม Journal Bearing

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความ  
: save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
: print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
ออกทางเครื่องพิมพ์  
: exit ออกจากโปรแกรม
- : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
: stop หยุดภาพ 3 มิติ  
: previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้  
: next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
: change view : Perspective แสดงภาพปกติ  
: top แสดงภาพด้านบน  
: side แสดงภาพด้านข้าง  
: front แสดงภาพด้านหน้า

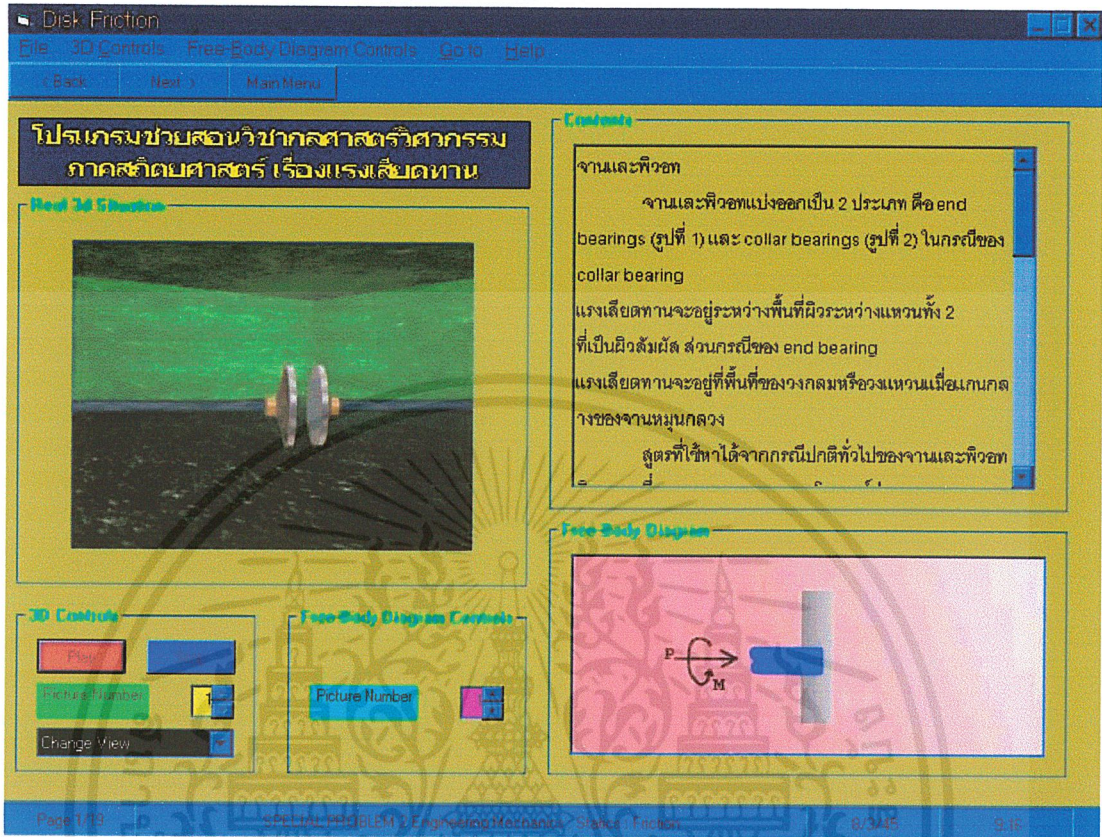
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	: free body diagram controls	: previous	แสดงภาพ 2 มิติก่อนหน้านี้
		: next	แสดงภาพ 2 มิติภาพต่อไป
: go to	: previous		แสดงฟอร์มก่อนหน้า
		: next	แสดงฟอร์มต่อไป
	: go to	: หน้าที่หลัก	ไปยังฟอร์มหน้าหลัก
		: ลืม	ไปยังฟอร์มลืม
		: สกรู	ไปยังฟอร์มสกรู
		: งานและพิวอท	ไปยังฟอร์มงานและ พิวอท
		: สายพาน	ไปยังฟอร์มสายพาน
		: ลูกปืน	ไปยังฟอร์มลูกปืน
: help	: help project		คู่มือการใช้โปรแกรม
	: about us		ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม Disk Friction  
หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ Disk Friction



รูปที่ 3.5.9 แสดงฟอร์ม Disk Friction

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความ  
: save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
: print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
ออกทางเครื่องพิมพ์  
: exit ออกจากโปรแกรม
- : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
: stop หยุดภาพ 3 มิติ  
: previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้  
: next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
: change view : Perspective แสดงภาพปกติ  
: top แสดงภาพด้านบน  
: side แสดงภาพด้านข้าง  
: front แสดงภาพด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- : free body diagram controls : previous แสดงภาพ 2 มิติ ก่อนหน้านี้  
 : next แสดงภาพ 2 มิติ ภาพต่อไป  
 : go to : previous แสดงฟอร์มก่อนหน้า  
 : next แสดงฟอร์มต่อไป  
 : go to : หน้าที่ก ไปยังฟอร์มหน้าหลัก  
 : ลืม ไปยังฟอร์มลืม  
 : สกรู ไปยังฟอร์มสกรู  
 : งานและพิวอท ไปยังฟอร์มงานและ  
 พิวอท  
 : สายพาน ไปยังฟอร์มสายพาน  
 : ลูกปืน ไปยังฟอร์มลูกปืน  
 : help : help project คู่มือการใช้โปรเจค  
 : about us ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชื่อฟอร์ม Belt Friction  
หน้าที่ อธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับ Belt Friction



รูปที่ 3.5.10 แสดงฟอร์ม Belt Friction

- คอนโทรล : File : save จัดเก็บข้อความ  
: save pic จัดเก็บรูป free body diagrams  
: print พิมพ์ข้อความและรูป free body diagrams  
: exit ออกทางเครื่องพิมพ์  
: exit ออกจากโปรแกรม
- : 3D Controls : play แสดงภาพ 3 มิติ  
: stop หยุดภาพ 3 มิติ  
: previous แสดงภาพ 3 มิติก่อนหน้านี้  
: next แสดงภาพ 3 มิติภาพต่อไป  
: change view : Perspective แสดงภาพปกติ  
: top แสดงภาพด้านบน  
: side แสดงภาพด้านข้าง  
: front แสดงภาพด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- : free body diagram controls : previous แสดงภาพ 2 มิติก่อนหน้านี้  
 : next แสดงภาพ 2 มิติภาพต่อไป  
 : go to : previous แสดงฟอร์มก่อนหน้า  
 : next แสดงฟอร์มต่อไป  
 : go to : หน้าหลัก ไปยังฟอร์มหน้าหลัก  
 : ลืม ไปยังฟอร์มลืม  
 : สกรู ไปยังฟอร์มสกรู  
 : งานและพิวอทไปยังฟอร์มงานและ  
 พิวอท  
 : สายพาน ไปยังฟอร์มสายพาน  
 : ลูกปืน ไปยังฟอร์มลูกปืน  
 : help : help project คู่มือการใช้โปรเจค  
 : about us ข้อมูลผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การประเมินผลระบบ

การทดสอบและการประเมินผลโครงการ โปรแกรมช่วยสอนวิชากลศาสตร์เรื่องแรงเสียดทาน โดยใช้ ภาษาในการเขียนโปรแกรมคือ visual basic 6.0 บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระบบปฏิบัติการ วินโดวส์ 98 ขึ้นไป สามารถประเมินผลได้ดังนี้

#### 4.1 การประเมินผลด้านการแสดงภาพ

จากการทดสอบโปรแกรมสามารถสรุปได้ว่า การแสดงภาพทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ ทำได้อย่างสมบูรณ์ถูกต้อง โดยภาพที่แสดงแบบ 3 มิติจะประกอบด้วย ภาพด้านบน, ภาพด้านหน้า, ภาพด้านข้าง และภาพปกติ และภาพ 2 มิติจะเป็นภาพแสดง free body diagram โดยที่ผู้ใช้งานสามารถเลือกรูปและมุมมองที่ตนเองต้องการได้

#### 4.2 การประเมินผลด้านเนื้อหา

ในส่วนของเนื้อหาสามารถสรุปได้ว่า ในส่วนของบทนำซึ่งอธิบายถึงแรงต่างๆ และส่วนของเครื่องมือซึ่งจะอธิบายถึงสูตรที่ใช้ นั้นมีเนื้อหาครบถ้วน และในส่วนของตัวอย่างผู้จัดทำได้นำเสนอตัวอย่างเพื่อเพิ่มความเข้าใจ และสามารถนำไปใช้กับตัวอย่างอื่นๆอีกได้

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

การนำภาพ 3 มิติ มาประยุกต์ใช้ในการแสดงภาพประกอบเนื้อหา ผู้จัดทำได้ตั้งชื่อโปรแกรมนี้ว่า “โปรแกรมช่วยสอนวิชาทฤษฎีเรื่องแรงเสียดทาน” โดยแบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ส่วนของเนื้อหา โดยจะเป็นส่วนรายละเอียดของเนื้อหา และภาพประกอบ ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่อธิบายสูตรต่างๆของแต่ละอุปกรณ์
2. ส่วนของตัวอย่าง โดยจะอธิบายตัวอย่างของแต่ละส่วน เพื่อเพิ่มความเข้าใจในเนื้อหาเพิ่มขึ้น และแสดงภาพประกอบตัวอย่าง

จากการประเมินผลระบบรวมพบว่าโปรแกรมสามารถแสดงภาพและประมวลผลได้ถูกต้องตามเนื้อหาทุกประการ

สำหรับการประมวลผลรูปภาพผู้จัดทำได้แบ่งออกเป็นภาพเคลื่อนไหว 3 มิติซึ่งสามารถแสดงผลได้ทั้งด้านบน, ด้านหน้า, ด้านข้าง และมุมมองปกติ และภาพนิ่ง 2 มิติ ซึ่งเป็นภาพแสดง free body diagram

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้คอมพิวเตอร์ที่มีขีดความเร็วในการประมวลผลและมีความละเอียดของจอภาพค่อนข้างสูง เนื่องจากมีรูปและภาพเคลื่อนไหวจำนวนมาก
2. การประมวลผลอาจจะล่าช้าบ้าง เนื่องมาจากการแสดงภาพ 3 มิติ
3. อาจจะมีการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถประมวลผลได้ดีขึ้น และอาจจะเพิ่มเนื้อหาในส่วนที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นได้

## บรรณานุกรม

1. Meriam, J.L. and Kraige, L.G. 1987. *Engineering Mechanics Statics*. Volume1. 2nd Edition. New york : John Wileyand Sons.
2. Ferdinand, P.Beer and Rusell Johnston, E.Jr. 1984. *Vector Mechanics for Engineers Statics And Dynamics*. 4th Edition. Panama: McGraw-Hill.
3. David, J.M. and Wilton,W.K. 1994. *Engineering Mechanics Statics*. 3rd Edition. Boston : PWS.
4. ก่อเกียรติ บุญชูกุลศล และเมธี หมั่นทำการ. 2528. *กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคสถิตยศาสตร์*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้