

### บทที่ 3

## แรงและกฎการเคลื่อนที่

### 3.1 แรง ( Force )

**แรง ( Force, F )** คือ อำนาจอย่างหนึ่งที่กระทำต่อวัตถุ แล้วทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงจากสภาพเดิม แรงนี้อาจจะสัมผัสกับวัตถุหรือไม่สัมผัสวัตถุก็ได้ แรงเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีทั้งขนาดและทิศทาง หน่วยของแรง คือ นิวตัน ( N )

**ชนิดของแรงอาจแบ่งเป็น**

1. แรงดึง ทำให้วัตถุยึดออกหรือแยกจากกัน
2. แรงอัดหรือแรงกด ทำให้วัตถุถูกบีบตัวอาจมีขนาดเล็กจนมองไม่เห็น
3. แรงบิด ทำให้วัตถุบิดเป็นเกลียว
4. แรงเฉือน ทำให้วัตถุขาดขนานกับแรงกระทำ

**ผลของแรงเมื่อกระทำต่อวัตถุ**

1. เปลี่ยนจากสภาพนิ่ง ให้เคลื่อนที่ได้และมีความเร็ว
2. จากกำลังเคลื่อนที่ เป็นเปลี่ยนทิศทาง เปลี่ยนอัตราเร็ว
3. เปลี่ยนสภาพรูปร่าง

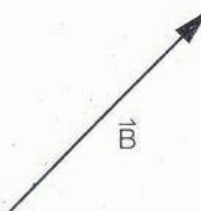
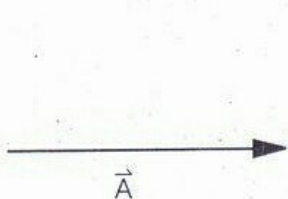
แรงที่กระทำไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ จะทำให้วัตถุมีความเร็วเพิ่มขึ้น

แรงที่กระทำไปในทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ จะทำให้วัตถุมีความเร็วลดลง

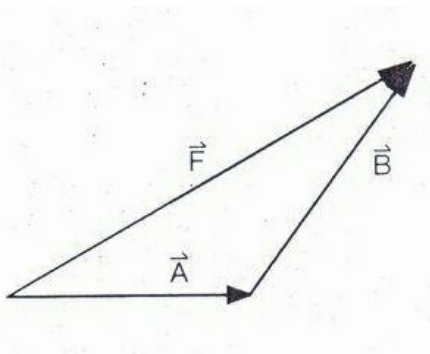
### 3.2 การหาแรงลัพธ์

**แรงลัพธ์** คือ การรวมหรือผลบวกของแรงย่อยทั้งหมด มีขนาดจากจุดเริ่มต้นถึงหัวลูกศรของแรงสุดท้าย และมีทิศทางจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายหรือสวนทางกับแรงย่อย การหาแรงลัพธ์ทำได้หลายวิธี คือ

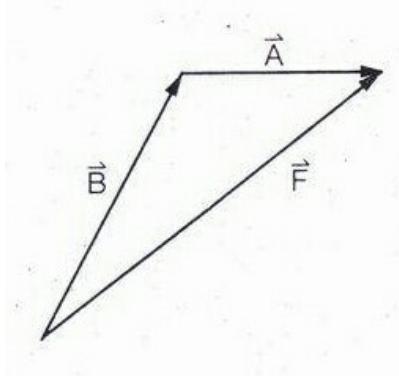
1. โดยการเขียนรูปแบบหางตัวหัว คือการนำเอาแรงย่อยมาเรียงต่อกันตามทิศทางเดิมโดยหางแรงถัดไปจดกับหัวของแรงที่เขียนก่อน



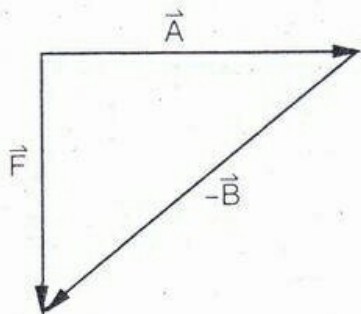
จงหาเวกเตอร์  $\vec{A} + \vec{B} = \vec{F}$



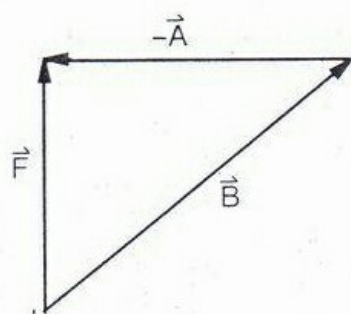
จงหาเวกเตอร์  $\vec{B} + \vec{A} = \vec{F}$



จงหาเวกเตอร์  $\vec{A} - \vec{B} = \vec{F}$



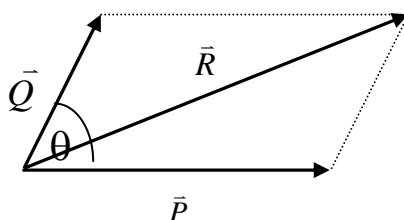
จงหาเวกเตอร์  $\vec{B} - \vec{A} = \vec{F}$



เวกเตอร์  $\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$  แต่ เวกเตอร์  $\vec{A} - \vec{B} \neq \vec{B} - \vec{A}$

## 2. โดยการใช้การคำนวณ ใช้สูตรต่างๆ คือ

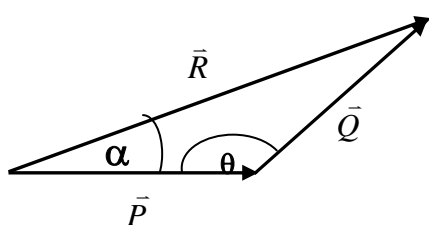
### 2.1 ใช้ทฤษฎีสี่เหลี่ยมด้านขนาน เมื่อมีแรง 2 แรงทำมุมกัน



หาขนาด R จาก  $R^2 = P^2 + Q^2 + 2PQ \cos\theta$

สูตรนี้  $\vec{P}$  ต้องอยู่ในแนวนอน และ  $\theta$  เป็นมุมที่อยู่ระหว่าง  $\vec{P}$  กับ  $\vec{Q}$  ซึ่งมีหางของแรงจุดกัน

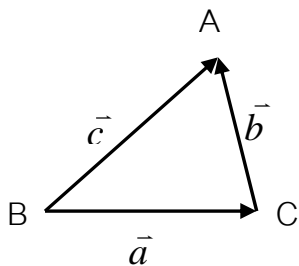
### 2.2 ใช้กฎของ cos



หาขนาด R จาก  $R^2 = P^2 + Q^2 - 2PQ \cos\theta$

$\theta$  คือมุมที่หัวของแรงจุดกับหางของแรง และอยู่ตรงข้าม  $\vec{R}$

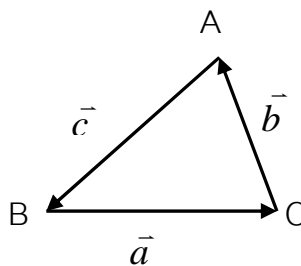
### 2.3 ใช้กฎของ sine หรือทฤษฎีลามี (Lami's theory)



$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$$

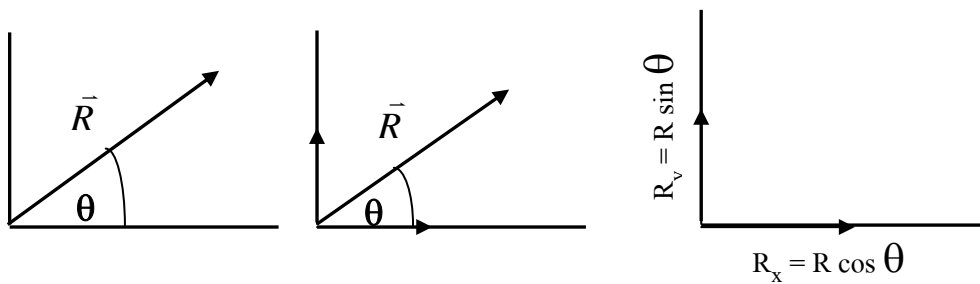
จะได้

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$$



$$\vec{R} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c} = 0$$

2.4 ใช้วิธีแตกแรง การแตกแรง คือ การแยกแรง 1 แรงออกเป็น 2 แรงที่ตั้งฉากกัน



ให้  $R$  เป็นขนาดของแรง  $\vec{R}$  ที่ทำมุม  $\theta$  กับแกนอนหรือแกน  $x$

ให้  $R_y$  เป็นขนาดของแรง  $\vec{R}_y$  ที่อยู่บนแกน  $Y = R \sin \theta$

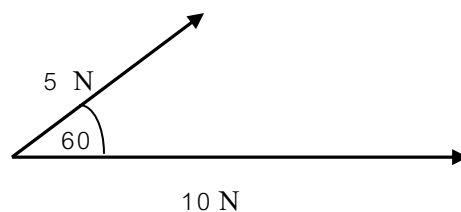
ให้  $R_x$  เป็นขนาดของแรง  $\vec{R}_x$  ที่อยู่บนแกน  $X = R \cos \theta$

การหาแรงลัพธ์ โดยการแตกแรง มีหลักง่ายๆ ดังนี้

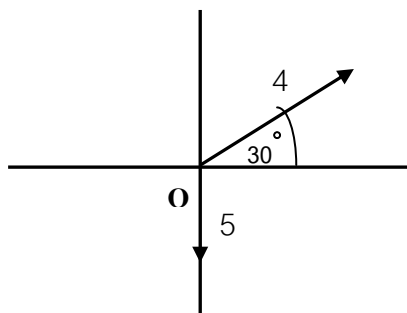
1. แยกแรงที่ทำมุมให้อยู่ในแกนแนว  $X$  และ  $Y$
2. หาผลรวมของแรงในแต่ละแกน ให้เหลือเพียง 2 แรงซึ่งตั้งฉากกัน
3. หาแรงลัพธ์ขององค์ประกอบที่เหลือ โดยใช้ทฤษฎีพีทาโกรัส

**แบบฝึกหัดทวน ครั้งที่ 1**

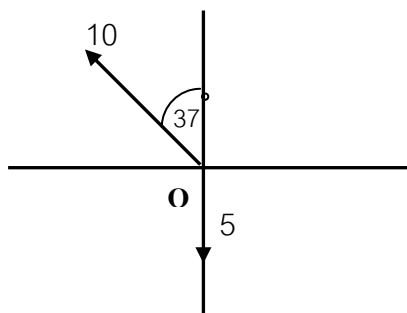
1. แรงย่อยขนาด 6 หน่วย และ 8 หน่วยทำมุมกัน 90 องศา จงหาขนาดของแรงลัพธ์
2. (ENT) เมื่อออกแรงสองแรงทำมุมกับค่าต่างๆ ผลรวมของแรงมีค่าต่ำสุด 2 นิวตันและมีค่าสูงสุด 14 นิวตัน ผลรวมของแรงทั้งสองเมื่อกระทำตั้งฉากกับจะมีค่าเท่าใด
3. จงรวมแรง 5 N และ 10 N เข้าด้วยกัน



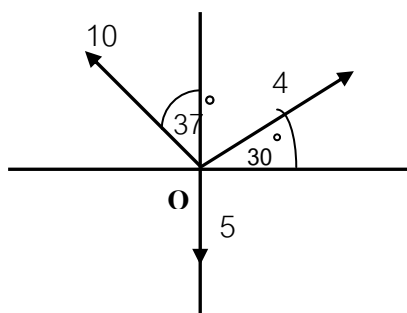
4. มีแรง 4 หน่วย และ 5 หน่วย ทำมุมกับแกนดังรูป จงหาแรงลัพธ์



5. มีแรง 5 หน่วย และ 10 หน่วย ทำมุมกับแกนดังรูป จงหาแรงลัพธ์



6. มีแรง 4 หน่วย , 5 หน่วย และ 10 หน่วย ทำมุมกับแกนดังรูป จงหาแรงลัพธ์



### 3.3 มวล แรง และกฎการเคลื่อนที่

**มวล (mass = m)** ของวัตถุ คือ ปริมาณที่บอกให้ทราบว่าวัตถุใดมีความเฉื่อยมากหรือน้อย มวลมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

**น้ำหนัก (Weight =  $\bar{W}$ )** ของวัตถุ คือ แรงที่โลกดึงดูดวัตถุ และทิศลงในแนวดิ่ง น้ำหนักของวัตถุมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) คำนวณหาน้ำหนักได้จากสูตร  $\bar{W} = m\bar{g}$  หน่วย (N)

#### กฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตัน

**กฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตัน (Newton's first law motion)** กล่าวว่า วัตถุจะรักษาสภาพนิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวในแนวตรงนอกจากจะมีแรงลัพธ์ที่มีค่าไม่เป็นศูนย์มากระทำ

**กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (Newton's Second law motion)** กล่าวว่า เมื่อมีแรงลัพธ์กระทำต่อวัตถุจะทำให้วัตถุมีความเร่งในทิศเดียวกัน แรงลัพธ์ที่มากกระทำและขนาดของความเร่งจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ

$\bar{a} \propto \Sigma \bar{F}$ $\bar{a} \propto \frac{1}{m}$ $\therefore \bar{a} \propto \frac{\Sigma \bar{F}}{m}$	ในหน่วยระบบเอสไอ $k = 1$ $\therefore \Sigma \bar{F} = m\bar{a}$ (เมื่อ $k$ คือ ค่าคงตัวของการแปรผัน)
หรือ $\Sigma \bar{F} \propto m\bar{a}$ $\Sigma \bar{F} = (k) m\bar{a}$	

**กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สามของนิวตัน (Newton's third law motion)** กล่าวว่า ทุกแรงกิริยาย่อมมีแรงปฏิกิริยาที่มีขนาดเท่ากัน และทิศตรงข้ามกันเสมอ

#### แบบฝึกทบทวน ครั้งที่ 2

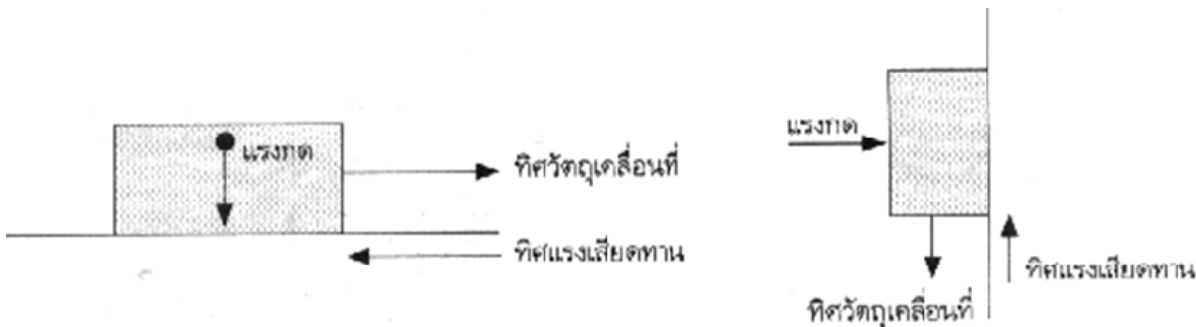
1. เมื่อรถหยุดอย่างกะทันหัน คนในรถจะพุ่งไปข้างหน้าเพราะเหตุใด
  1. มีลมพัดพาไป
  2. มีแรงกระทำ
  3. มีแรงเฉื่อยกระทำ
  4. คนพยายามรักษาสภาพเดิม
2. กฎข้อที่ 1 ของนิวตันคืออะไร
  1. กฎของแรงกิริยา
  2. กฎของแรงปฏิกิริยา
  3. กฎของมวลสาร
  4. กฎของความเฉื่อย
3. (มข 24) ใช้ไม้ค้ำหนึ่งลากรถ แรงที่ทำให้ไม้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าคือ
  1. แรงที่ไม้กระทำต่อรถ
  2. แรงที่รถกระทำต่อไม้
  3. แรงที่ไม้กระทำต่อพื้น
  4. แรงพื้นกระทำต่อเท้าไม้

4. (มข 25) ข้อความใดที่ไม่ถูกต้อง ตามลักษณะของแรงที่กล่าวถึงในกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน
1. ประกอบด้วยแรงสองแรง
  2. มีขนาดเท่ากันและมีทิศตรงกันข้าม
  3. เป็นแรงที่กระทำบนวัตถุต่างชนิดกัน
  4. เป็นแรงที่ทำให้แรงลัพธ์บนวัตถุมีค่าเป็น 0
5. (มข 32) เมื่อตกต้นไม้ลงมากกระทบพื้นจะรู้สึกเจ็บ เหตุที่เจ็บอธิบายได้ด้วยกฎทางฟิสิกส์ข้อใด
1. กฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน
  2. กฎข้อที่สองของนิวตัน
  3. กฎข้อที่สามของนิวตัน
  4. กฎแรงดึงดูดระหว่างมวลของนิวตัน
6. (มข 40) เมื่อรถหยุดกะทันหัน ผู้โดยสารจะกะมาไปข้างหน้า ปรากฏการณ์นี้เป็นไปตามกฎนิวตันข้อ
1. ข้อ 1
  2. ข้อ 2
  3. ข้อ 3
  4. ทุกข้อ
7. มวลในทางฟิสิกส์หมายถึงข้อใด
1. เนื้อของวัตถุ
  2. น้ำหนักของวัตถุ
  3. ความหนาแน่นของวัตถุ
  4. สภาพต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุ
8. สาเหตุที่ทำให้วัตถุต้องตกลงสู่พื้นโลกเพราะสาเหตุอะไร
1. โลกกลม
  2. วัตถุมีมวล
  3. วัตถุน้ำหนัก
  4. แรงดึงดูดของโลกมีทิศลงในแนวตั้ง
9. ประโยชน์ของเข็มขัดนิรภัยและที่พิงศีรษะที่ติดอยู่กับเบาะนั่งในรถยนต์เพื่ออะไร
1. เพื่อเพิ่มความสง่าผ่าเผยแก่ผู้นั่งรถยนต์
  2. เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นและคอยตั้งตรงมองเห็นได้ไกล
  3. เพื่อต้านความเฉื่อยและลดขนาดของแรงกระทำต่อศีรษะ
  4. เพื่อเสริมการเคลื่อนที่และเพิ่มขนาดของแรงกระทำต่อศีรษะ
10. เมื่อเชือกเพลิงของจรวดถูกเผาไหม้แล้วพุ่งแก๊สออกไปทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนจรวดคงตัว ความเร่งของจรวดจะเป็นอย่างไร
1. มีขนาดลดลง เพราะเชื้อเพลิงเหลือน้อยลง
  2. มีขนาดมากขึ้น เพราะน้ำหนักของจรวดลดลง
  3. มีขนาดเป็นศูนย์ เพราะแรงขับเคลื่อนคงตัวทำให้ความเร็วคงที่
  4. มีขนาดคงตัว เพราะแรงขับเคลื่อนคงตัวตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน
11. วัตถุก้อนหนึ่งมีมวล 10 กิโลกรัม ถ้านำไปชั่งบนดาวดวงหนึ่งที่มีความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของดวงดาวเท่ากับ 1 ใน 5 ของความเร่ง เนื่องจากแรงดึงดูดของโลก วัตถุก้อนนี้จะมีมวลและน้ำหนักเท่าไร
1. 2 กิโลกรัม , 2 นิวตัน
  2. 2 กิโลกรัม , 10 นิวตัน
  3. 10 กิโลกรัม , 10 นิวตัน
  4. 10 กิโลกรัม , 20 นิวตัน
12. วัตถุมวล 2 กิโลกรัม ถูกแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง  $7.5 \text{ m/s}^2$  ขนาดของแรงที่กระทำต่อวัตถุเป็นเท่าไร
1. 10.0 นิวตัน
  2. 12.5 นิวตัน
  3. 15.0 นิวตัน
  4. 17.5 นิวตัน

13. วัตถุอยู่ในสภาพนิ่ง เมื่อออกแรง 2 นิวตัน กระทำในแนวขนานกับพื้นราบเป็นเวลานาน 3 วินาที วัตถุก้อนนี้เคลื่อนไปได้ไกล 27 เมตร มวลของวัตถุเป็นเท่าใด
1. 0.33 kg
  2. 0.66 kg
  3. 3.33 kg
  4. 6.66 kg
14. แท่งไม้มวล 6 kg วางอยู่บนพื้นระดับ ถ้ามีแรงลัพธ์ขนาด 18 นิวตัน มากระทำต่อแท่งไม้ในทิศขนานกับพื้น จงหาความเร่งของแท่งไม้
1.  $1 \text{ m/s}^2$
  2.  $3 \text{ m/s}^2$
  3.  $6 \text{ m/s}^2$
  4.  $9 \text{ m/s}^2$
15. เชือกเส้นหนึ่งสามารถรับแรงดึงได้อย่างมาก 30 นิวตัน ใช้เชือกเส้นนี้ลากวัตถุมวล 3 kg บนพื้นลื่น ความเร่งสูงสุดที่จะลากวัตถุนี้โดย เชือกไม่ขาด มีค่าเท่าไร
1.  $1 \text{ m/s}^2$
  2.  $5 \text{ m/s}^2$
  3.  $10 \text{ m/s}^2$
  4.  $20 \text{ m/s}^2$
16. คนมีมวล 100 kg ยืนอยู่บนตาชั่งในลิฟต์ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ลงมาด้วยความเร่ง  $2.5 \text{ m/s}^2$  ตาชั่งจะอ่านได้เท่าไร
1. 25 kg
  2. 50 kg
  3. 75 kg
  4. 125 kg
17. เชือกเส้นหนึ่งทนแรงดึงได้ 80 นิวตัน ผูกไว้กับมวล 5 kg จะดึงมวลขึ้นไปในแนวตั้งด้วยความเร่งได้มากที่สุดเท่าไร เชือกจึงจะไม่ขาด
1.  $2 \text{ m/s}^2$
  2.  $4 \text{ m/s}^2$
  3.  $6 \text{ m/s}^2$
  4.  $8 \text{ m/s}^2$

### 3.4 แรงเสียดทาน

**แรงเสียดทาน (friction =  $f$ )** หมายถึง แรงที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัส 2 ผิว พยายามต่อต้านไม่ให้ผิวทั้งสองเคลื่อนที่ผ่านกัน แรงเสียดทานมีผลต่อการเคลื่อนที่ คือ พยายามต่อต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุค่าของแรงเสียดทานจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวสัมผัส แรงกดวัตถุลงบนพื้นสัมผัสและชนิดของวัตถุที่สัมผัส



**ทิศทางของแรงเสียดทาน** ทิศของแรงเสียดทานจะมีทิศสวนทางกับการเคลื่อนที่ เวลาจะดูทิศของแรงเสียดทาน ให้ดูที่จุดผิวสัมผัสว่าผิวสัมผัสเคลื่อนที่อย่างไร แรงเสียดทานจะสวนทิศการเคลื่อนที่นี้แรงเสียดทานขณะรถแล่นกับแรงเสียดทานขณะขั้บรถเบรกต่างกัน แรงเสียดทานขณะรถแล่น ผิวสัมผัสหมุนไปข้างหลัง แรงเสียดทานมีทิศไปข้างหน้า

การหาปริมาณแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f = \mu N$$

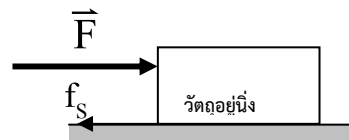
- เมื่อ  $f$  คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสนั้น มีหน่วยเป็น นิวตัน  
 $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสนั้น  
 $N$  คือ แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุกระทำต่อพื้นขณะนั้น มีหน่วยเป็น นิวตัน

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นมี 2 ชนิด คือ

1. **แรงเสียดทานสถิต (Static friction)** คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัตถุและวัตถุ **ยังอยู่นิ่ง** ซึ่งแรงเสียดทานสถิตจะมีค่าตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ามากที่สุด โดยค่ามากที่สุดจะเกิดขณะที่วัตถุเริ่มเคลื่อนที่ได้พอดี

เขียนสมการได้ดังนี้

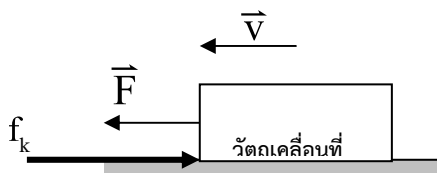
$$f_s = \mu_s N$$



2. **แรงเสียดทานจลน์ (kinetic friction)** คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

เขียนสมการได้ดังนี้

$$f_k = \mu_k N$$





### สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $\mu$ )

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $\mu$ ) อัตราส่วนของแรงเสียดทานต่อแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากจากนิยามของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จะได้ 
$$\mu = \frac{f}{N}$$
 ไม่มีหน่วย

### สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน มี 2 ชนิด

1. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ( $\mu_s$ ) หมายถึง อัตราส่วนของแรงเสียดทานสถิตต่อแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก

$\mu_s = \frac{f_s}{N}$	ไม่มีหน่วย
-------------------------	------------

2. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ ( $\mu_k$ ) หมายถึง อัตราส่วนของแรงเสียดทานจลน์ต่อแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก

$\mu_k = \frac{f_k}{N}$	ไม่มีหน่วย
-------------------------	------------

ประโยชน์ของแรงเสียดทาน รถยนต์จะแล่นไปได้ ต้องมีแรงเสียดทานยันล้อไว้ ถ้าไม่มีแรงเสียดทานล้อจะหมุนอยู่กับที่ รถแล่นไปไม่ได้ ตัวอย่างมีในบนถนนเมืองหนาว พื้นถนนเป็นน้ำแข็งรถแล่นไปไม่ได้ ต้องเอาทรายโรยให้เกิดแรงเสียดทานรถจึงแล่นไปได้

คนจะเดินบนพื้นต้องมีแรงเสียดทาน ถ้าไม่มีแรงเสียดทานคนจะเดินไม่ได้ จะลื่นหกล้ม รองเท้าจึงต้องมีลวดลายเพื่อให้เกิดแรงเสียดทาน ยางรถยนต์ก็ต้องมีลวดลายเพื่อให้เกิดแรงเสียดทาน

โทษของแรงเสียดทาน เช่น แรงเสียดทานตามข้อต่อ หรือแกนหมุนของเครื่องยนต์ต้องมีดัดลึกลูกปืน หรือหยอดน้ำมันหล่อลื่น ช่วยลดแรงเสียดทาน ไม่เช่นนั้นจะสูญเสียพลังงานมาก เกิดความร้อนมากด้วย รถยนต์มีแรงเสียดทานกับอากาศทำให้แล่นช้า เรือมีแรงเสียดทานกับน้ำ เครื่องบินมีแรงเสียดทานกับอากาศ

**\*\* ข้อควรจำ \*\***  $\mu_s > \mu_k$  เสมอ เพราะว่า  $f_s > f_k$

การหาแรงเสียดทานขณะใด ๆ

ถ้า  $F < \mu_s N$  แรงเสียดทานขณะนั้น  $f = F$  วัตถุจะหยุดนิ่ง

ถ้า  $F = \mu_s N$  แรงเสียดทานขณะนั้น  $f = \mu_s N$  วัตถุหยุดนิ่งเตรียมที่จะเคลื่อนที่

ถ้า  $F > \mu_s N$  แรงเสียดทานขณะนั้น  $f = \mu_k N$  วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

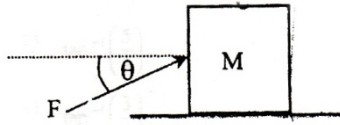
### แบบฝึกทบทวน ครั้งที่ 3

1. (มข.50) วางวัตถุมวล 2 กิโลกรัมบนพื้นเอียงลื่น และพื้นเอียงทำมุม  $\tan \theta = \frac{3}{4}$  กับแนวระดับจะต้องออกแรงที่ขนานกับพื้นเอียงกี่นิวตันกระทำต่อวัตถุ เพื่อให้วัตถุยังคงอยู่นิ่งได้ (กำหนดให้  $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

1. 10 นิวตัน
2. 12 นิวตัน
3. 15 นิวตัน
4. 16 นิวตัน

2. (มข.51) ออกแรง  $F$  ขนาด 10 นิวตัน ผลักวัตถุ  $M$  มวล 2 กิโลกรัม ที่วางอยู่บนพื้นราบ ในทิศทางดังรูป ถ้าพื้นมีค่า  $\mu = \frac{1}{7}$  และค่า  $\tan \theta = \frac{3}{4}$  จงคำนวณหาขนาดของความเร่งของวัตถุ กำหนดให้  $g = 10 \text{ m/s}^2$

1.  $\frac{11}{7} \text{ m/s}^2$
2. 3  $\text{m/s}^2$
3.  $\frac{18}{7} \text{ m/s}^2$
4.  $\frac{36}{7} \text{ m/s}^2$



3. (มข.53) วางสิ่งไม่มั่นคงบนกระดานขรุขระทุกที่หยุดนิ่ง ถ้ารถขรุขระทุกออกตัวด้วยความเร่งมากกว่า 7 เมตร/(วินาที)<sup>2</sup> ไปตามถนนราบ จะทำให้สิ่งไม่เริ่มไถลพอดี สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างสิ่งไม่กับกระดานขรุขระทุกมีค่าเท่าใด

1. 0.5
2. 0.6
3. 0.64
4. 0.7

4. หนังสือเล่มหนึ่งถูกผลักให้ไถลไปบนพื้น โต๊ะราบด้วยความเร็วคงตัว ข้อใดต่อไปนี้เป็นข้อสรุปได้ถูกต้อง (มข.57)

1. แรงปฏิกิริยาที่พื้นกระทำต่อหนังสือเท่ากับศูนย์
2. แรงเสียดทานที่พื้นกระทำต่อหนังสือเท่ากับศูนย์
3. แรงลัพธ์ที่กระทำต่อหนังสือเท่ากับศูนย์

4. ถูกทั้งข้อ (2) และข้อ (3)

5. ข้อใดต่อไปนี้เป็นข้อสรุปเกี่ยวกับแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสคู่หนึ่งได้ถูกต้อง (มข.57)

1. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมากกว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์เสมอ
2. แรงเสียดทานสถิตมีขนาดมากกว่าแรงเสียดทานจลน์เสมอ
3. แรงเสียดทานสถิตมีขนาดน้อยกว่าแรงเสียดทานจลน์เสมอ
4. มีคำตอบถูกมากกว่า 1 ข้อ

### 3.5 แรงดึงดูดระหว่างมวล

#### กฎแรงดึงดูดระหว่างมวลของนิวตัน

จากการสังเกตและค้นคว้าของนักดาราศาสตร์ เช่น โทโครบราห์ และ เคปเลอร์ นิวตันได้นำเอามาใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายปรากฏการณ์ที่ดาวเคราะห์โคจรรอบดวงอาทิตย์ นิวตันสรุปว่า ดาวเคราะห์โคจรรอบดวงอาทิตย์ได้เพราะมีแรงกระทำระหว่างดวงอาทิตย์กับดาวเคราะห์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างมวลของดวงอาทิตย์กับดาวเคราะห์และเป็นแรงแบบเดียวกับแรงดึงดูดระหว่างโลกกับวัตถุบนผิวโลก หรือแรงดึงดูดระหว่างวัตถุทุกชนิดในเอกภพ

นิวตันได้เสนอกฎแรงดึงดูดระหว่างมวลขึ้น มีใจความว่า “วัตถุทั้งหลายในเอกภพจะออกแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน โดยขนาดของแรงดึงดูดระหว่างวัตถุหนึ่ง ๆ จะแปรผันตรงกับผลคูณระหว่างมวลวัตถุทั้งสอง และจะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทางระหว่างวัตถุทั้งสองนั้น”

ให้  $m_1, m_2$  เป็นมวลของวัตถุ 2 ก้อน

$R$  เป็นระยะห่างระหว่างมวลทั้งสองวัดจากจุดศูนย์กลาง

$F_G$  เป็นขนาดของแรงดึงดูดระหว่างมวลทั้งสอง

จะได้  $F_G \propto m_1 m_2$

และ  $F_G \propto \frac{1}{R^2}$

$$F_G \propto \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

$$F_G = \frac{Gm_1 m_2}{R^2}$$

$G$  คือ ค่าคงตัวความโน้มถ่วงสากล =  $6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2 / \text{kg}^2$  (ผู้หาค่านี้ได้ คือ คาเวนดิช)

#### มวลของโลก

ในการหามวลของวัตถุที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ เช่น โลก ดวงจันทร์ เราไม่สามารถใช้เครื่องชั่งมาชั่งมวลที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่อาจหามวลได้โดยใช้กฎแรงดึงดูดระหว่างมวลของนิวตัน มาช่วยในการคำนวณ

เมื่อวัตถุมวล  $m$  วางบนผิวโลก โลกจะดึงดูดวัตถุมวล  $m$  ด้วยขนาดของแรง  $F_G$  ซึ่งแรงดึงดูดระหว่างมวลนี้คือแรงโน้มถ่วงหรือน้ำหนักของวัตถุนั้นเอง

ให้  $m_e$  เป็นมวลของโลก,  $m$  เป็นมวลของวัตถุ

$R_e$  เป็นรัศมีของโลก =  $6.38 \times 10^6 \text{ m}$  (ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของโลกถึงวัตถุ) จะได้

$$F_G = F_g$$

$$\frac{Gm_e m}{R_e^2} = mg$$

$$m_e = \frac{gR_e^2}{G}$$

ดังนั้น  $m_e = 5.89 \times 10^{24} \text{ kg}$

### การหาความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

$$\text{จาก } m_e = \frac{gR_e^2}{G}$$

$$\text{ได้ว่า } g = \frac{Gm_e}{R_e^2}$$

### การหาค่าสนามโน้มถ่วง

$$\text{จาก } \frac{GMm}{R^2} = mg$$

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (g \propto \frac{1}{R^2})$$

$$\frac{g_1}{g_2} = \left(\frac{M_1}{M_2}\right)\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$$

### แบบฝึกทบทวน ครั้งที่ 4

- น้ำหนักของวัตถุหนึ่งที่เส้นศูนย์สูตร และที่ขั้วโลกเท่ากันหรือไม่
  - เท่ากัน เพราะเป็นวัตถุชิ้นเดียวกัน
  - เท่ากัน เพราะแรงดึงดูดของโลกมีค่าเท่ากัน
  - ไม่เท่ากัน เพราะความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกมีค่าไม่เท่ากัน**
  - ไม่เท่ากัน เพราะอุณหภูมิไม่เท่ากัน
- ถ้ามวลของโลกเป็น 81 เท่าของมวลของดวงจันทร์ และรัศมีของโลกเป็นสี่เท่าของรัศมีของดวงจันทร์ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่ผิวของดวงจันทร์จะมีค่า

1.  $1.25 \text{ m/s}^2$       2.  $1.97 \text{ m/s}^2$       3.  $2.5 \text{ m/s}^2$       4.  $3.4 \text{ m/s}^2$

**แนวคิด**      จาก  $\frac{g_{\text{จันทร์}}}{g_{\text{โลก}}} = \left(\frac{M_{\text{จันทร์}}}{M_{\text{โลก}}}\right)\left(\frac{R_{\text{โลก}}}{R_{\text{จันทร์}}}\right)^2$

$$\frac{g_{\text{จันทร์}}}{10} = \left(\frac{1}{81}\right)\left(\frac{4}{1}\right)^2 \rightarrow g_{\text{จันทร์}} = \frac{160}{81} = 1.97 \text{ m/s}^2$$

3. จงหาว่าความสูงจากผิวโลกเท่าไร ค่าสนามความโน้มถ่วงจึงเหลือ  $\frac{1}{3}$  เท่าของค่าสนามความโน้มถ่วงที่ผิวโลก

แนวคิด

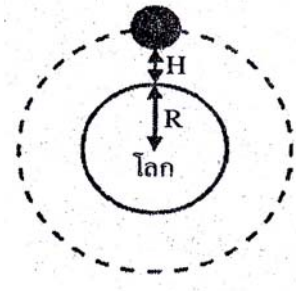
$$\text{จาก } \frac{g_1}{g_2} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2, \quad \frac{g}{\frac{1}{3}g} = \left(\frac{R+H}{R}\right)^2$$

$$3 = \left(\frac{R+H}{R}\right)^2$$

$$1.7 = \frac{R+H}{R}$$

$$1.7R = R+H$$

$$H = 0.7R \text{ เมตร}$$



4. วัตถุชิ้นหนึ่งที่ผิวโลกจะมีน้ำหนัก 600 นิวตัน ถ้าอยู่สูงจากผิวโลกขึ้นไปเป็นระยะ 2 เท่าของรัศมีโลก วัตถุนี้น้ำหนักกี่นิวตัน

แนวคิด

$$\text{จาก } \frac{W_1}{W_2} = \frac{g_1}{g_2} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$$

$$\frac{600}{W_2} = \left(\frac{R+2R}{R}\right)^2 = 9$$

$$W_2 = \frac{600}{9} = \frac{200}{3} \text{ นิวตัน}$$

5. นักบินอวกาศจะมีน้ำหนักที่เท่าของน้ำหนักที่ซังบน โลก ถ้าอยู่บนดาวเคราะห์ที่มีรัศมีครึ่งหนึ่งของโลก และมีมวลเป็น  $\frac{1}{8}$  ของมวลโลก

1. 0.25      2. 0.50      3. 0.75      4. 1.25

แนวคิด

$$\frac{W_{ดาว}}{W_{โลก}} = \frac{g_{ดาว}}{g_{โลก}} = \frac{M_{ดาว}}{M_{โลก}} \left(\frac{R_{โลก}}{R_{ดาว}}\right)^2$$

$$= \left(\frac{1/8}{1}\right) \left(\frac{2}{1}\right)^2$$

$$= \frac{1}{2} = 0.5$$

6. ดาวเคราะห์ดวงหนึ่งมีมวล 64 เท่าของมวลของดวงจันทร์ และรัศมีของดาวเคราะห์เป็น 9 เท่าของรัศมีของดวงจันทร์ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่ผิวของดวงจันทร์จะมีค่าเท่าไร

.....

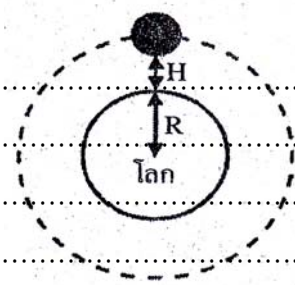
.....

.....

.....

.....

7. จงหาว่าความสูงจากผิวโลกเท่าไร ค่าสนามความโน้มถ่วงจึงเหลือ  $\frac{1}{4}$  เท่าของค่าสนามความโน้มถ่วงที่ผิวโลก



.....

.....

.....

.....

.....

8. วัตถุชิ้นหนึ่งที่ผิวโลกจะมีน้ำหนัก 800 นิวตัน ถ้าอยู่สูงจากผิวโลกขึ้นไปเป็นระยะ 3 เท่าของรัศมีโลก วัตถุนี้จะหนักกี่นิวตัน

.....

.....

.....

.....

9. นักบินอวกาศจะมีน้ำหนักกี่เท่าของน้ำหนักที่ชั่งบนโลก ถ้าอยู่บนดาวเคราะห์ที่มีรัศมี  $\frac{1}{6}$  ของโลก และมีมวลเป็น  $\frac{1}{6}$  ของมวลโลก

.....

.....

.....

.....

### 3.6 การประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่สำหรับการเคลื่อนที่

#### 3.6.1 การชั่งน้ำหนักบนลิฟต์ที่เคลื่อนที่

ให้  $\bar{W}$  เป็นน้ำหนักปกติของวัตถุเมื่อลิฟต์ยังไม่เคลื่อนที่

$\bar{R}$  เป็นน้ำหนักปรากฏของวัตถุเมื่อลิฟต์เคลื่อนที่หรือแรงที่พื้นลิฟต์ออกแรงโต้ตอบ

$\bar{W}$  และ  $\bar{R}$  ไม่ใช่แรงคู่กิริยาปฏิกิริยา

การชั่งน้ำหนักบนลิฟต์แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. เมื่อลิฟต์อยู่นิ่ง หรือลิฟต์เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงความเร็วคงที่ ( $a=0$ ) จะได้  $W = R$
2. ลิฟต์เคลื่อนที่ลงด้วยความเร่ง จะทำให้  $W > R$

$$\Sigma \bar{F} = m\bar{a}$$

$$W - R = ma$$

$$mg - R = ma$$

$$R = mg - ma$$

$$\therefore R = m(g - a)$$

3. ลิฟต์เคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่ง จะทำให้  $R > W$

$$\Sigma \bar{F} = m\bar{a}$$

$$R - W = ma$$

$$R - mg = ma$$

$$R = mg + ma$$

$$\therefore R = m(g + a)$$

#### แบบฝึกทบทวน ครั้งที่ 5

1. ชายคนหนึ่งมีมวล 60 กิโลกรัม ยืนอยู่บนลิฟต์ที่เคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่ง 1.5 เมตร / วินาที<sup>2</sup>  
น้ำหนักของเขาที่เขาอ่านได้ในขณะนั้นเป็นเท่าใด

.....

.....

.....

.....

2. ชายคนหนึ่งมีมวล 60 กิโลกรัม ยืนอยู่บนลิฟต์ที่เคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่ง 1.5 เมตร / วินาที<sup>2</sup>  
น้ำหนักของเขาที่เขาอ่านได้ในขณะนั้นเป็นเท่าใด

.....

.....

.....

.....

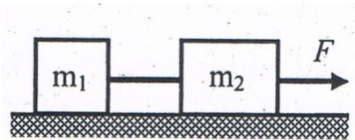
### 3.6.2 การเคลื่อนที่ของวัตถุหลายก้อนด้วยความเร่งเท่ากัน มีหลักในการคำนวณดังนี้

1. วาดรูปการเคลื่อนที่ของวัตถุ
2. เขียนแรงที่กระทำต่อวัตถุแต่ละก้อน แรงใดไม่อยู่ในแนวการเคลื่อนที่ให้แตกแรงนั้นให้อยู่ในแนวการเคลื่อนที่
3. หาแรงลัพธ์ของวัตถุแต่ละก้อนและใช้สูตร  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$

#### แบบฝึกทบทวน ครั้งที่ 6

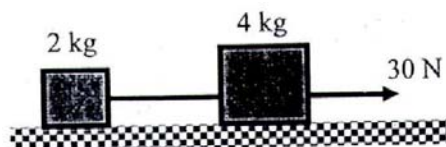
1. (มข.54) วัตถุ  $m_1$  มวล 1 กิโลกรัมและวัตถุ  $m_2$  มวล 3 กิโลกรัม ผูกติดกันด้วยเชือกดั่งรูป วางอยู่บนพื้นราบที่ไม่มีความเสียด ออกแรง  $F$  คงที่ขนาด 8 นิวตันดึงเชือก จงหาว่าวัตถุมวล 1 กิโลกรัม จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งเท่าไร

1. 1
2. 2
3. 4
4. 8

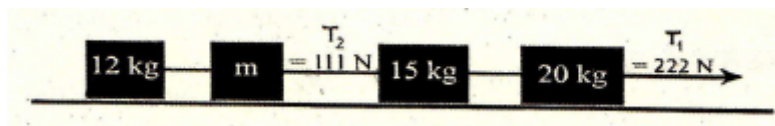


2. ออกแรง 30 นิวตัน ดึงกล่องมวล 2 กิโลกรัม และ 4 กิโลกรัมให้เคลื่อนที่ ดังรูป ถ้าพื้นที่และกล่องมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์เท่ากับ 0.4 จงหาแรงดึงของเส้นเชือกที่อยู่ระหว่างกล่องทั้งสอง (กำหนดให้  $g = 10$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>) (มข.58)

1. 2 นิวตัน
2. 5 นิวตัน
3. 10 นิวตัน
4. 15 นิวตัน



3. มีกล่อง 4 ใบ ผูกติดกันด้วยเชือกมวลเบาและพื้นไม่มีแรงเสียดทาน มีแรงดึงเชือก  $T_1 = 222$  นิวตัน และ  $T_2 = 111$  นิวตัน (ดังรูป) มวล  $m$  มีค่าเท่าใด (มข.56)

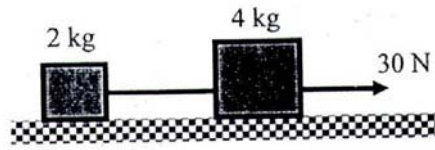


1. 3 กิโลกรัม
2. 13 กิโลกรัม
3. 23 กิโลกรัม
4. 33 กิโลกรัม



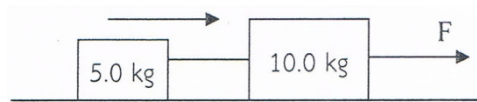
4. ออกแรง 30 นิวตัน ดึงกล่องมวล 2 กิโลกรัม และ 4 กิโลกรัมให้เคลื่อนที่ ดังรูป ถ้าพื้นที่และกล่องมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์เท่ากับ 0.4 จงหาแรงดึงของเส้นเชือกที่อยู่ระหว่างกล่องทั้งสอง (กำหนดให้  $g = 10$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>) (มข.58)

1. 2 นิวตัน
2. 5 นิวตัน
3. 10 นิวตัน
4. 15 นิวตัน



5. วัตถุมวล 5.0 กิโลกรัม และ 10.0 กิโลกรัม ผูกติดกันด้วยเชือกเบาดังรูป วางอยู่บนพื้นราบที่ไม่มีแรงเสียดทาน ให้แรง  $F$  ซึ่งมีค่าคงตัว กระทำต่อวัตถุทั้งสองอยู่นาน 10 วินาที จนความเร็วของวัตถุเปลี่ยนไป 40 เมตรต่อวินาที ขนาดของแรง  $F$  มีค่าเป็นเท่าใด (มข.59)

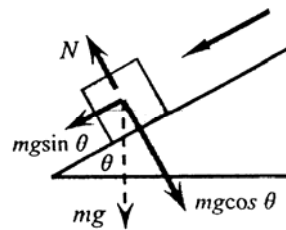
1. 40 นิวตัน
2. 50 นิวตัน
3. 60 นิวตัน
4. 80 นิวตัน



### 3.6.3 การเคลื่อนที่ของวัตถุบนพื้นเอียงด้วยความเร่งคงที่

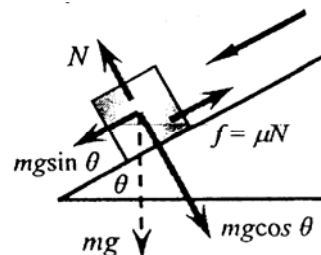
1. กรณีที่ไม่มีแรงเสียดทาน จะมีแรงกระทำต่อวัตถุ 2 แรง คือ แรงดึงดูดของโลกและแรงปฏิกิริยาที่พื้นกระทำต่อวัตถุในแนวตั้งฉาก จากรูปถ้าวัตถุไถลลงมาตามพื้นเอียงด้วยความเร่ง  $a$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Sigma \vec{F} &= m\vec{a} \\ mg \sin \theta &= ma \\ \therefore a &= g \sin \theta\end{aligned}$$



2. กรณีที่มีแรงเสียดทาน จากรูป จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Sigma \vec{F} &= m\vec{a} \\ mg \sin \theta - f &= ma \\ mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta &= ma \\ \therefore a &= g \sin \theta - \mu g \cos \theta\end{aligned}$$



### แบบฝึกทบทวน ครั้งที่ 7

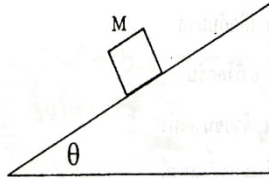
1. (มข.50) วางวัตถุมวล 2 กิโลกรัมบนพื้นเอียงลื่น และพื้นเอียงทำมุม  $37^\circ$  กับแนวระดับจะต้องออกแรงที่ขนานกับพื้นเอียงกี่นิวตันกระทำต่อวัตถุ เพื่อให้วัตถุยังคงอยู่นิ่งได้ (กำหนดให้  $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

1. 10 นิวตัน
2. 12 นิวตัน
3. 15 นิวตัน
4. 16 นิวตัน

2. (มข.51) วางมวล M ขนาด 10 กิโลกรัม บนพื้นเอียงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานคงที่เท่ากับ 0.5 จะต้องออกแรงขนานกับพื้นเอียงกี่นิวตันกระทำต่อมวล M และทิศอย่างไร เพื่อให้มวล M อยู่นิ่งกับที่ กำหนดให้

$$\tan \theta = \frac{4}{3} \text{ และ } g = 10 \text{ m/s}^2$$

1. 50 นิวตัน ชี้ขึ้น
2. 50 นิวตัน ชี้ลง
3. 120 นิวตัน ชี้ขึ้น
4. 120 นิวตัน ชี้ลง



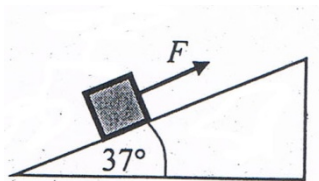
3. (มข.53) วางกล่องบนพื้นเอียงซึ่งทำมุม  $\theta$  กับแนวระดับทำให้กล่องไถลงด้วยความเร่ง ถ้าวัดความเร่งของกล่องได้เท่ากับ  $5/4$  เมตร/(วินาที)<sup>2</sup> สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ระหว่างกล่องกับพื้นเอียงเป็นเท่าใด กำหนดให้

$$\sin \theta = 3/5, \cos \theta = 4/5$$

1. 19/32
2. 10/16
3. 21/32
4. 11/16

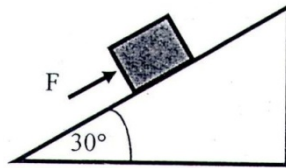
4. (มข.54) วัตถุมวล 5 กิโลกรัม วางอยู่บนพื้นเอียง ทำมุม  $37^\circ$  กับแนวระดับดังรูป ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ระหว่างวัตถุกับพื้นเท่ากับ 0.25 จงหาขนาดของแรง F ที่ใช้ดึงวัตถุให้เคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็วคงตัว (กำหนดให้  $\sin 37^\circ = 3/5$  และ  $\cos 37^\circ = 4/5$ )

1. 10 นิวตัน
2. 30 นิวตัน
3. 40 นิวตัน
4. 50 นิวตัน



5. ออกแรงขนาด  $F$  ขนานกับพื้นเอียง  $30^\circ$  องศา ผลักกล่องมวล  $10.0$  กิโลกรัม ดังรูป ถ้าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างกล่องและพื้นเอียงเท่ากับ  $0.4$  จงหาว่าขนาดของแรง  $F$  ในข้อใดที่ทำให้กล่องไม่เคลื่อนที่ (กำหนดให้  $g = 10$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>) (มข.58)

1. 10 นิวตัน
2. 14 นิวตัน
3. 80 นิวตัน
4. 87 นิวตัน



### เพิ่มเติม วัตถุผูกต่อกันกับเชือก

#### หลักในการทำโจทย์

1. วาดรูปประกอบถ้าทำได้ แล้วเขียนเวกเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ทุกเวกเตอร์
2. พิจารณาว่าวัตถุมีการเคลื่อนที่ไปทางทิศไหน แสดงว่าแรงลัพธ์ต้องไปทางนั้น
3. นำกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$  มาใช้คำนวณ

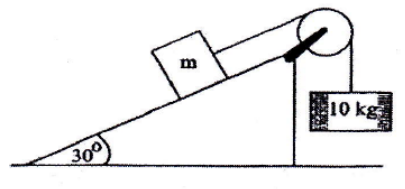
#### ข้อควรจำ

1. เมื่อวัตถุแขวนตัวในแนวตั้ง ต้องเขียนเวกเตอร์ของน้ำหนักเสมอ
2. เมื่อวางวัตถุไว้บนพื้นราบ เวกเตอร์ของน้ำหนักไม่ต้องคิด (นอกจากมีแรงเสียดทาน)
3. ทิศของแรงดึงเชือก เมื่อคิดที่วัตถุก้อนใดให้เขียนเวกเตอร์ออกจากวัตถุนั้นเสมอ

### แบบฝึกทบทวน ครั้งที่ 8

1. มวล  $m$  วางอยู่บนพื้นเอียงที่ทำมุม  $30^\circ$  กับพื้นราบ ถูกโยงกับมวล  $10$  กิโลกรัม ด้วยเชือกมวลเบามากซึ่งพาดอยู่บนรอกไม่มีความฝืดดังรูป ถ้ามวล  $m$  กำลังเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่ง  $2.0$  เมตรต่อ(วินาที)<sup>2</sup> และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ระหว่างมวล  $m$  กับพื้นเอียง คือ  $0.5$  มวล  $m$  จะมีค่าประมาณกี่กิโลกรัม กำหนดให้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ,  $\sin 30^\circ = 0.5$ ,  $\cos 30^\circ = 0.866 = \frac{\sqrt{3}}{2}$  (มข.55)

1. 7
2. 8
3. 9
4. 10



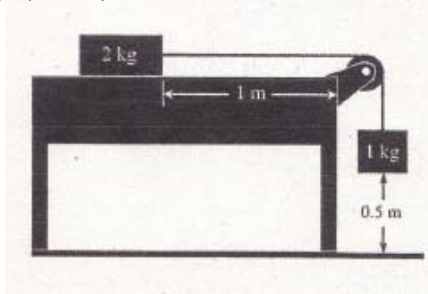
2. วัตถุมวล 2.0 กิโลกรัม เคลื่อนที่อยู่บนพื้นโต๊ะ ที่มีความฝืด โดยถ่วงด้วยวัตถุหนัก 1.0 กิโลกรัม ขณะอยู่ห่างจากขอบโต๊ะ 1.0 เมตร วัตถุถ่วงที่อยู่สูงจากพื้น 5.0 เมตร และหลังจากนั้น 5.0 นาที มวลถ่วงตกถึงพื้น ถ้าประมาณว่ามวลเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ จงหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (กำหนดให้  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ) (มข.56)

1. 0.5

2. 1.0

3. 1.5

4. 2.0



3. จากรูปด้านล่าง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ระหว่างมวล 3 กิโลกรัมและพื้นมีค่าเท่ากับ 0.4 และรอกเบามาก เมื่อปล่อยให้กล่องเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง จงหว่ามวล 2 กิโลกรัมจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเท่าไร (กำหนดให้  $g = 10$  เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>) (มข.58)

1. 1.0 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>

2. 1.6 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>

3. 2.0 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>

4. 4.0 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>

