

# การออกแบบอัลกอริทึม

รมช.ย ประสิทธิ์ จุฑาระกุล  
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื้อหาบทเรียนวิชาโครงสร้างนี้ได้รับการสนับสนุนการผลิตจาก  
โครงการมหาวิทยาลัยไซเบอร์ไทย  
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา  
กระทรวงศึกษาธิการ

# คำนำ

คอมพิวเตอร์เป็นส่วนหนึ่งของการดำเนินกิจกรรมประจำวันของมนุษย์ไม่ทางตรงก็ทางอ้อม คอมพิวเตอร์ทำงานได้เร็วขึ้น มีขนาดเล็กกลง มีโปรแกรมที่ใช้งานง่าย ช่วยเสริมกิจกรรมของมนุษย์ได้มากขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะว่าเบื้องหลังฮาร์ดแวร์ที่เราจับต้องได้ เบื้องหลังซอฟต์แวร์ที่เรานำมาติดตั้งสั่งงานฮาร์ดแวร์นั้น ก็คือ “กิน” ความคิดของผู้สร้าง หรือที่เรียกว่า อัลกอริทึม (algorithm) ที่ถูกแปลงมาเป็น ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้งานได้จริง อัลกอริทึมจึงเป็นศาสตร์ซึ่งมีบทบาทสำคัญมากในการศึกษาทางวิทยาการและวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิชาการออกแบบอัลกอริทึม จึงได้รับการบรรจุเป็นวิชาพื้นฐานในสาขาวิชาดังกล่าว ประกอบด้วยเนื้อหาสามส่วนหลักคือ การวิเคราะห์อัลกอริทึม กลวิธีการออกแบบอัลกอริทึม และการจัดกลุ่มปัญหาตามความซับซ้อน

ขอให้สนุกและประสบความสำเร็จกับการเรียนวิชาการออกแบบอัลกอริทึมครับ

รศ. ดร. สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล  
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
๕ เมษายน ๒๕๕๓

เอกสารชุดนี้ใช้แบบอักษรที่มีให้ในระบบปฏิบัติการวินโดวส์ เช่น

แบบอักษร Arial Unicode MS

**Courier New**

แบบอักษร Tahoma

Times New Roman

นอกจากนี้ยังใช้แบบอักษรดังต่อไปนี้

แบบอักษร Layjji มหานิยม

*แบบอักษร วรรณศิลป์*

ผู้จัดทำขอขอบคุณนักออกแบบแบบอักษรมา ณ โอกาสนี้ด้วย

# สารบัญ

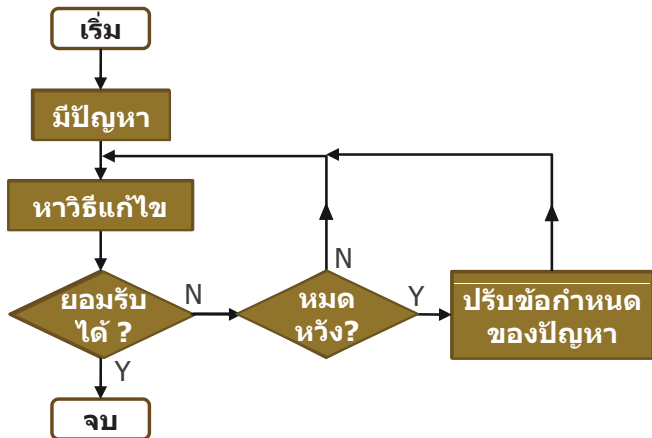
1	บทนำ และองค์ความรู้พื้นฐาน .....	1
2	การวิเคราะห์อัลกอริทึม.....	61
3	การแบ่งแยกและเอาชนะ .....	115
4	กำหนดการพลวัต.....	167
5	อัลกอริทึมแบบละโมบ.....	235
6	อัลกอริทึมพื้นฐานของกราฟ.....	256
7	การค้นในปริภูมิสถานะ.....	316
8	เอ็นพีบริบูรณ์.....	383
9	อัลกอริทึมที่น่าสนใจอื่น ๆ.....	434



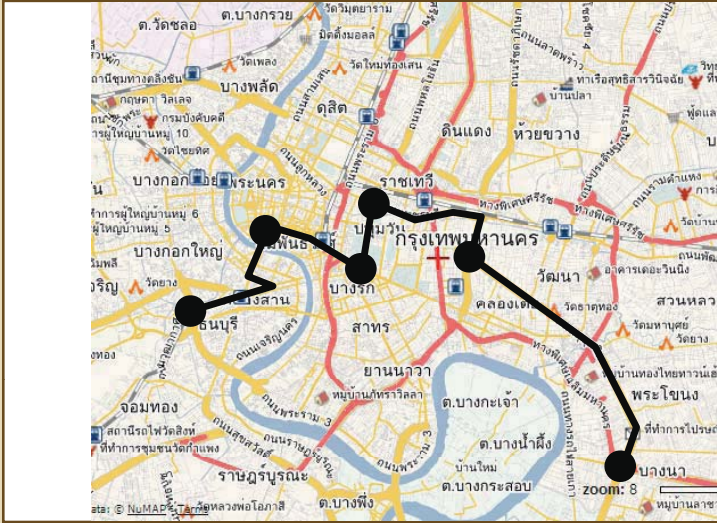
# การออกแบบอัลกอริทึม

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

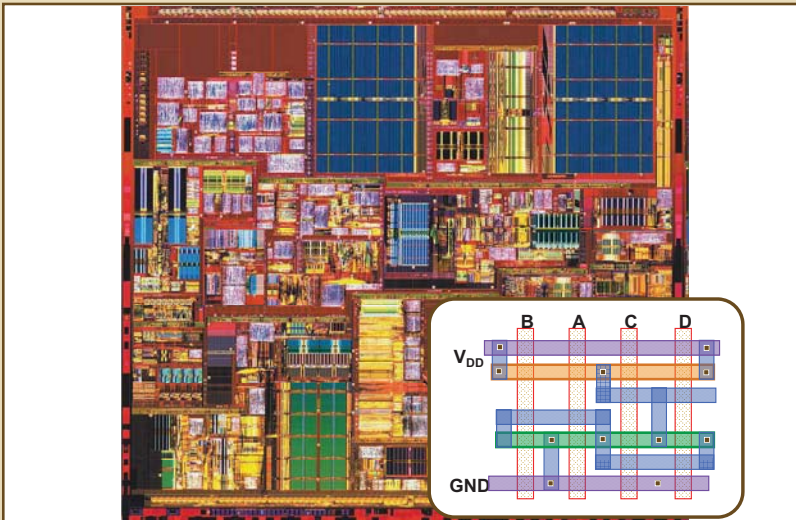
## วงจรการออกแบบอัลกอริทึม



# รถโรงเรียน

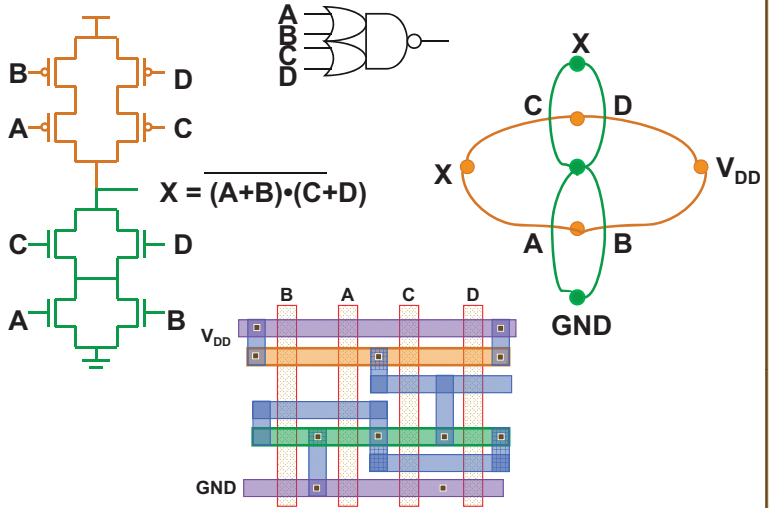


# การออกแบบวงจรรวม





## การออกแบบวงจร



## 数独

	6		1	4		5		
		8	3		5	6		
2								1
8			4	7				6
		6				3		
7			9	1				4
5								2
		7	2		6	9		
	4		5		8		7	

9	6	3	1	7	4	2	5	8
1	7	8	3	2	5	6	4	9
2	5	4	6	8	9	7	3	1
8	2	1	4	3	7	5	9	6
4	9	6	8	5	2	3	1	7
7	3	5	9	6	1	8	2	4
5	8	9	7	1	3	4	6	2
3	1	7	2	4	6	9	8	5
6	4	2	5	9	8	1	7	3

## ดาวมหาลัย : สาวมาด

หนูดาวเป็นลูกสาวกก  
จบชั้นม.6 โรงเรียนบ้านหนองใหญ่  
คุณแม่ขายไร่ขายนา ส่งดาวเข้ามาเรียนมหาลัย  
มาเรียนอยู่ในกรุงเทพ ยูนิเวอร์ซิตีที่ทันสมัย  
ดาวสวยดาวเร็ดดาวเด่น คนมันสวยทำอะไรก็เด่น  
ก็เลยถูกพรีเซนต์ให้เป็นดาวมหาลัย  
เพื่อนๆที่คณะ ปลื้มดาวสุดๆเลยนะฮะ

หนู, ดาว, เป็น, ลูก, สาว, กก,  
จบ, ชั้น, ม 6, โรงเรียน, บ้าน, หนอง, ใหญ่,  
คุณ, แม่, ขาย, ไร่, ขาย, นา, ส่ง, ดาว, เข้า, มา, เรียน, มหาลัย,  
มา, เรียน, อยู่, ใน, กรุงเทพ, ยูนิเวอร์ซิตี, ที่, ทันสมัย,  
ดาว, สวย, ดาว, เร็ด, ดาว, เด่น, คน, มัน, สวย, ทำ, อะไร, ก็, เด่น,  
ก็, เลย, ถูก, พรีเซนต์, ให้, เป็น, ดาว, มหาลัย,  
เพื่อน, ๆ, ที่, คณะ, ปลื้ม, ดาว, สุด, ๆ, เลย, นะ, ฮะ,

## การรู้จำ

สมชาย

Somchai



53 4F 4D 43 48 41 49



## ข้อกำหนดของปัญหา

- ❖ ลักษณะของข้อมูลขาเข้า (input)
- ❖ ผลลัพธ์ที่ต้องการ
- ❖ ด.ย. : ปัญหาตัวหุ่่มาก (majority problem)
  - ❖ input : ข้อมูลจำนวน  $n$  ตัว
  - ❖ output : คืน TRUE เมื่อมีข้อมูลที่มีค่าซ้ำกันเกิน  $\lfloor n/2 \rfloor$   
: ไม่เช่นนั้น คืน FALSE

problem

problem instance  
input instance

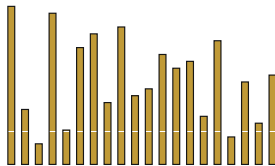


ตัวหุ่่มากคือ 3 → TRUE

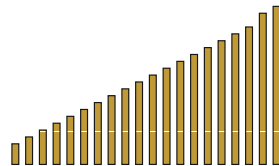


ไม่มีตัวหุ่่มาก → FALSE

## Sorting

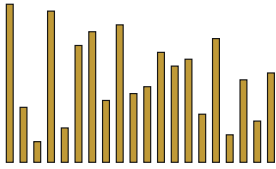


Input



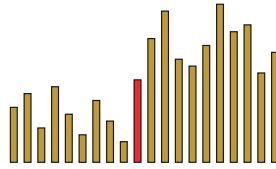
Output

## Median and Selection



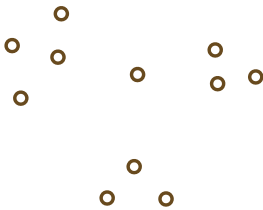
$k = 10$

Input

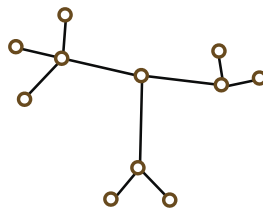


Output

## Minimum Spanning Tree

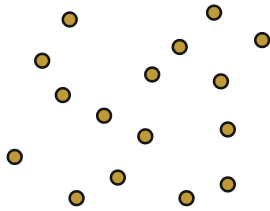


Input

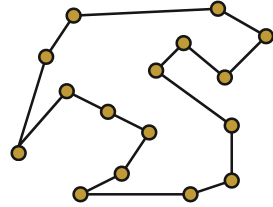


Output

## Traveling Salesman Problem

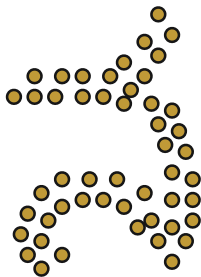


Input

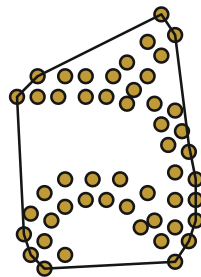


Output

## Convex Hull

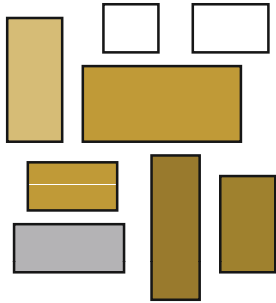


Input

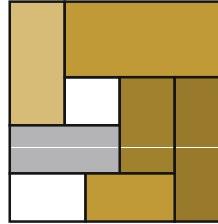


Output

## Bin Packing



Input



Output

## Primality Testing

8338169264555846052842102071

Input

NO

Output

## Factoring

8338169264555846052842102071

Input

$$\begin{array}{r}
 179424673 \\
 \times 2038074743 \\
 \times 22801763489 \\
 = \\
 8338169264555846052842102071
 \end{array}$$

Output

## String Matching

You are the fairest of your sex,  
 Let me be your hero;  
 I love you as one over x,  
 As x approaches zero.  
 Positively.

you

Input

You are the fairest of your sex,  
 Let me be your hero;  
 I love you as one over x,  
 As x approaches zero.  
 Positively.

Output

## Approximate String Matching

You are the fairest of your sex,  
Let me be your hero;  
I love you as one over x,  
As x approaches zero.  
Positively.

**heero**

**Input**

You are the fairest of your sex,  
Let me be your **hero**;  
I love you as one over x,  
As x approaches **zero**.  
Positively.

**Output**

## Satisfiability

$$(x + y)(x + \bar{y})$$

$$x = \text{true}$$

**YES**

$$(x + y)(x + \bar{y})\bar{x}$$

**NO**

**Input**

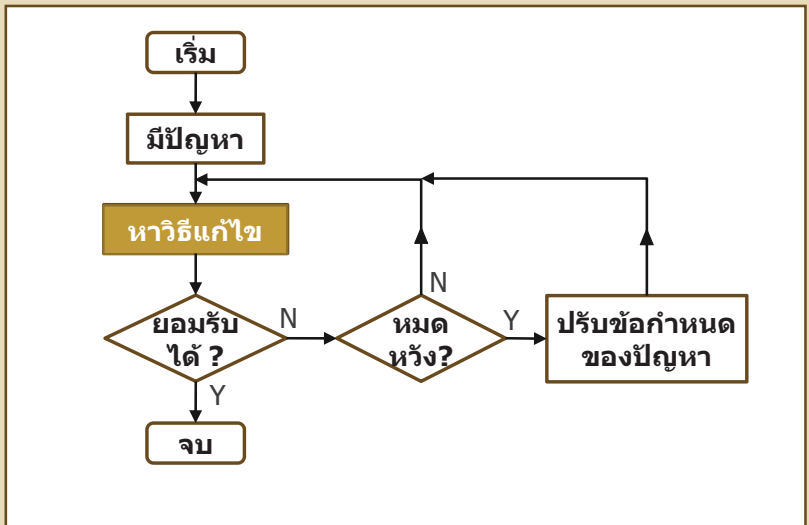
**Output**



# Halting

<pre> x = 7 while (x &gt; 1) {   if (x is even)     then x = x/2   else x = 3x+1 }                 </pre>	<p><b>YES</b></p>
<pre> x = 7 while (x ≥ 1) {   if (x is even)     then x = x/2   else x = 3x+1 }                 </pre> <p style="text-align: center;"><b>Input</b></p>	<p><b>NO</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Output</b></p>

## ขั้นตอนการออกแบบอัลกอริทึม

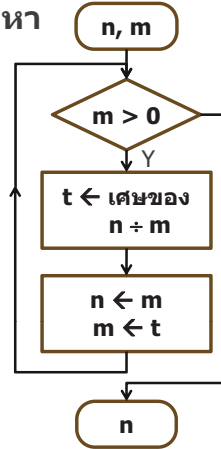


## อัลกอริทึม (Algorithm)

- ❖ ลำดับการทำงานเชิงคำนวณซึ่งแปลงตัวอย่างข้อมูลขาเข้าของปัญหาไปเป็นผลลัพธ์ที่ต้องการ
- ❖ ขั้นตอนวิธีการแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์

```
GCD( n, m ) {
    while ( m > 0 ) {
        t = n mod m
        n = m
        m = t
    }
    return n
}
```

Euclid Algorithm



## อัลกอริทึมการหารากที่ 3

- ❖ โดยใช้เครื่องคิดเลขทุก ๆ ที่มีปุ่มหารากที่สอง
- ❖ กดจำนวนที่ต้องการหารากที่ 3
- ❖ กดปุ่มหารากที่สอง 1 ครั้ง แล้วกดปุ่มคูณ  $x^{\frac{1}{2}}$
- ❖ กดปุ่มหารากที่สอง 2 ครั้ง แล้วกดปุ่มคูณ  $x^{\frac{1}{2}}\left(1+\frac{1}{2^2}\right)$
- ❖ กดปุ่มหารากที่สอง 4 ครั้ง แล้วกดปุ่มคูณ  $x^{\frac{1}{2}}\left(1+\frac{1}{2^2}\right)\left(1+\frac{1}{2^4}\right)$
- ❖ กดปุ่มหารากที่สอง 8 ครั้ง แล้วกดปุ่มคูณ  $x^{\frac{1}{2}}\left(1+\frac{1}{2^2}\right)\left(1+\frac{1}{2^4}\right)\left(1+\frac{1}{2^8}\right)$
- ❖ ...
- ❖ ทำเช่นนี้จนกระทั่งเมื่อกดปุ่มหารากที่สองแล้วได้ 1 เสมอ
- ❖ หลังกดปุ่มคูณครั้งสุดท้าย กดปุ่มหารากที่สองอีกครั้ง จะได้คำตอบ

$$x^{\frac{1}{3}} = x^{\frac{1}{2^2}}\left(1+\frac{1}{2^2}\right)\left(1+\frac{1}{2^4}\right)\left(1+\frac{1}{2^8}\right)\left(1+\frac{1}{2^{16}}\right)\dots$$

## ตัวหุ้มาก : นับแต่ตัวว่ามีกี่ตัว

1	4	3	3	3	1	3
---	---	---	---	---	---	---



1	4	7	3	3	1	2
---	---	---	---	---	---	---

```

hasMajority( d[1..n] ) {
  for (i = 1; i <= n; i++) {
    c = 0;
    for (j = 1; j <= n; j++)
      if (d[i] == d[j]) c++
    if (c > n/2) return TRUE
  }
  return FALSE
}

```

นับ 1 มี 2 ตัว

นับ 4 มี 1 ตัว

นับ 3 มี 4 ตัว true

นับ 1 มี 2 ตัว

นับ 4 มี 1 ตัว

นับ 7 มี 1 ตัว

นับ 3 มี 2 ตัว

นับ 3 มี 2 ตัว

นับ 1 มี 2 ตัว

นับ 2 มี 1 ตัว false

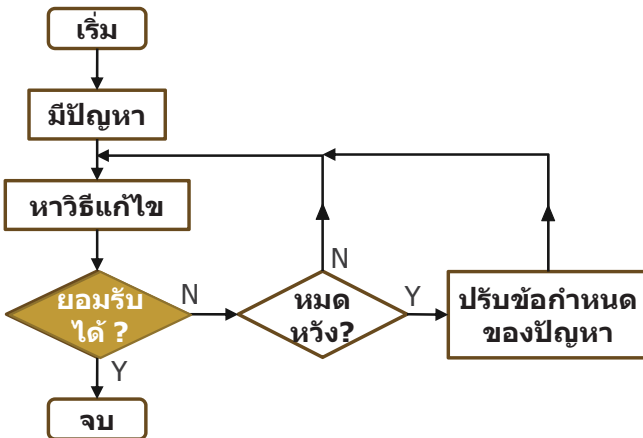
## อัลกอริทึม

- ❖ ต้องหาผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ในเวลาอันจำกัด  
ให้กับข้อมูลเข้าทรูปแบบของปัญหา
- ❖ เราต้องการอัลกอริทึมที่
  - ❖ ทำงานถูกต้อง
  - ❖ ทำงานได้รวดเร็วมีประสิทธิภาพ
  - ❖ ใช้หน่วยความจำน้อย ๆ
  - ❖ ทำความเข้าใจได้ง่าย

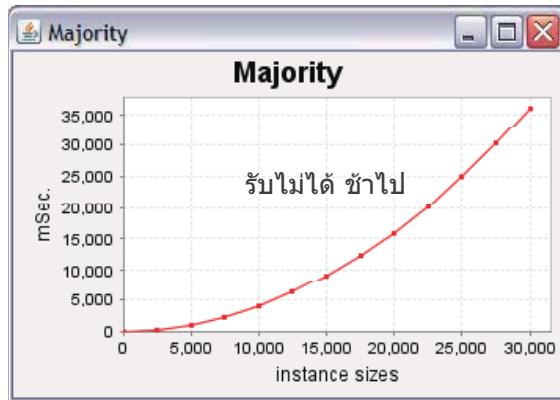
## กลวิธีการออกแบบอัลกอริทึม

Brute force  
Divide and Conquer  
Dynamic Programming  
Greedy Algorithm  
State-Space Search  
Randomized Algorithm  
Approximation Algorithm  
...

## ขั้นตอนการออกแบบอัลกอริทึม



## เวลาการทำงาน



กรณีที่เราไม่มีตัวหุ้มมาก

## ตัวหุ้มมาก : sort + นับ

1 4 3 3 3 1 3

1 1 3 3 3 3 4



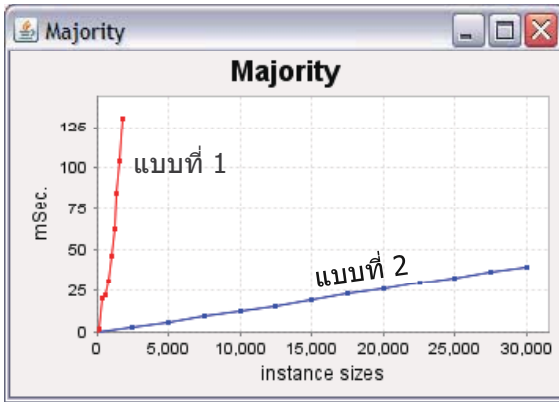
นับ 1 มี 2 ตัว

นับ 3 มี 4 ตัว true

```

hasMajority( d[1..n] ) {
    sort( d );
    c = 0; i = 1
    for ( j = 1; j <= n; j++)
        if (d[i] == d[j]) {
            if (++c > n/2) return TRUE
        } else {
            i = j; c = 1
        }
    return FALSE
}
    
```

## เวลาการทำงาน



กรณีที่เราไม่มีตัวหุ้มมาก

## ตัวหุ้มมาก : sort + นับตัวกลาง

1 1 3 3 3 3 4

นับ 3 มี 4 ตัว



1 1 2 3 3 4 7

นับ 3 มี 2 ตัว



```
hasMajority( d[1..n] ) {
    sort( d );
    c = 0; i = ⌈n/2⌋;
    for ( j = 1; j ≤ n; j++)
        if ( d[i] == d[j] ) c++
    if ( c > n/2 ) return TRUE
    return FALSE
}
```

## ตัวหุ้มมาก : sort + นับตัวกลาง

1	1	3	3	3	3	4
---	---	---	---	---	---	---

นับ 3 มี 4 ตัว

1	1	2	3	3	4	7
---	---	---	---	---	---	---

นับ 3 มี 2 ตัว

```

hasMajority( d[1..n] ) {
  sort( d );
  c = 0; i = ⌈n/2⌉
  for (j = i; j >= 1 AND d[i] == d[j]; j--) c++
  for (j = i+1; j <= n AND d[i] == d[j]; j++) c++
  if (c > n/2) return TRUE
  return FALSE
}

```

## ตัวหุ้มมาก : สุ่ม + นับ

1	4	7	3	3	1	2
---	---	---	---	---	---	---

สุ่มได้ 4 → นับ 4 → มี 1 ตัว ✓

1	4	3	3	3	1	3
---	---	---	---	---	---	---

สุ่มได้ 3 → นับ 3 → มี 4 ตัว ✓

1	4	3	3	3	1	3
---	---	---	---	---	---	---

สุ่มได้ 3 → นับ 3 → มี 4 ตัว ✓

1	4	3	3	3	1	3
---	---	---	---	---	---	---

สุ่มได้ 1 → นับ 1 → มี 2 ตัว ✗

## ตัวหุ้มมาก : สุ่ม + นับ

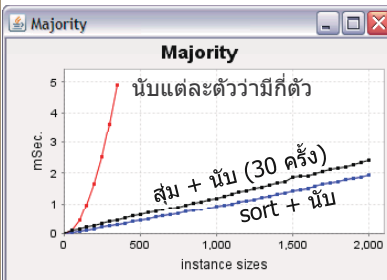
```
hasMajority( d[1..n] ) {
    c = 0; i = random(1, n)
    for (j = 1; j <= n; j++)
        if (d[i] == d[j]) c++
    if (c > n/2) return TRUE
    return FALSE
}
```

โอกาสที่ของจริงมีตัวหุ้มมากแต่สุ่มไม่พบ  $< 1/2$

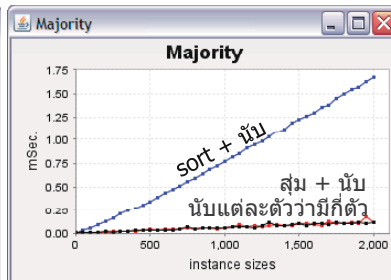
```
hasMajority( d[1..n] ) {
    for (k = 1; k <= 30; k++) {
        c = 0; i = random(1, n)
        for (j = 1; j <= n; j++)
            if (d[i] == d[j]) c++
        if (c > n/2) return TRUE
    }
    return FALSE
}
```

โอกาสที่ของจริงมีตัวหุ้มมากแต่สุ่มไม่พบ  $< (1/2)^{30}$

## เปรียบเทียบเวลาการทำงาน



กรณีไอเอเรย์ไม่มีตัวหุ้มมาก



กรณีไอเอเรย์มีตัวหุ้มมาก



## การวิเคราะห์เวลาการทำงาน

### ❖ Experimental Analysis

- ❖ แปลงอัลกอริทึมเป็นโปรแกรม
- ❖ สิ่งทำงานกับข้อมูลเข้าหลาย ๆ แบบ
- ❖ จับเวลา วาดกราฟ หาความสัมพันธ์ของเวลากับปริมาณข้อมูล

### ❖ Mathematical Analysis

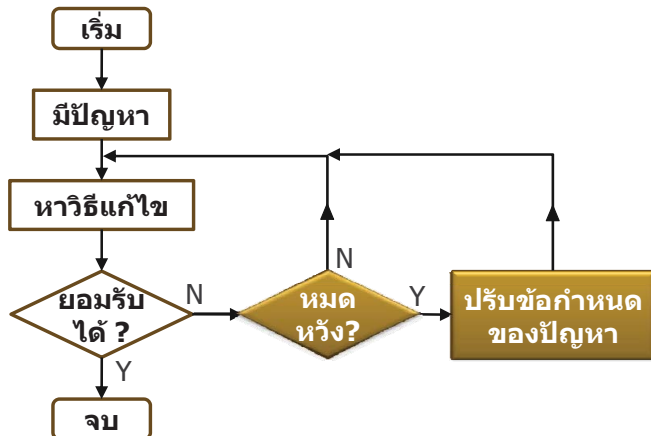
- ❖ วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของจำนวนคำสั่งที่ทำงานกับปริมาณข้อมูลที่ได้รับ

```

hasMajority( d[1..n] )
for ( i = 1; i <= n; i++ )
  c = 0;
  for ( j = 1; j <= n; j++ )
    if ( d[i] == d[j] ) c++
  if ( c > n/2 ) return TRUE
return FALSE
  
```

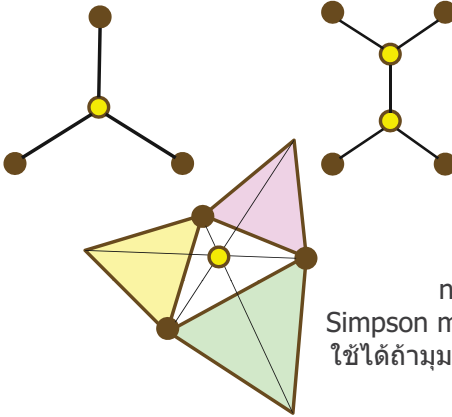
$$\sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n 1 \right) = \sum_{i=1}^n n = n^2$$

## ขั้นตอนการออกแบบอัลกอริทึม



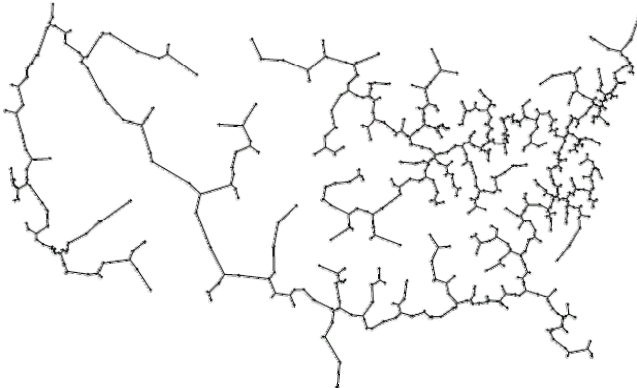
## Steiner Tree

จงวาดต้นไม้ต่อจุดทั้งหลายให้มีความยาวรวมของเส้นเชื่อมที่สั้นที่สุด



$n = 3$   
Simpson method (1750)  
ใช้ได้ถ้ามุมภายใน  $\leq 120^\circ$

## ข้อมูลจำนวนมาก ใช้เวลานาน

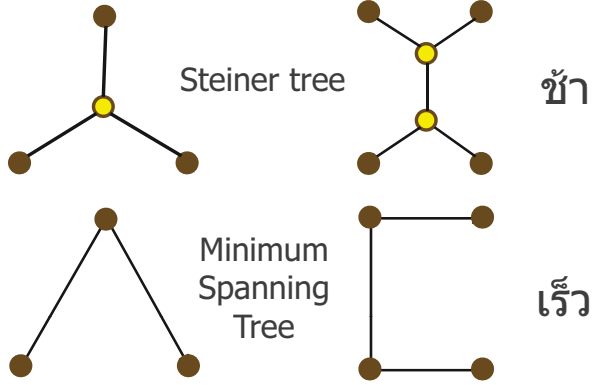


ใช้ GeoSteiner หาคำตอบของปัญหาขนาด 532 ปม  
ใช้เวลา 2.5 ชั่วโมง (ปี ค.ศ. 1998)

<http://www.diku.dk/hjemmesider/ansatte/martinz/geosteiner/>

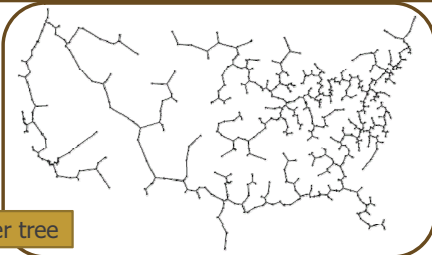
# ปรับข้อกำหนด

Steiner tree → Minimum Spanning tree

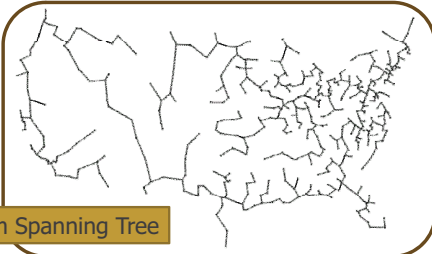


$$\text{Length(MST)} \leq 2 \cdot \text{Length(Steiner tree)}$$

# เปรียบเทียบผล



เป็นชั่วโมง  
สั้นกว่า ≈ 10%



เป็นวินาที

## ถ้าช้า ก็ใช้ CPU เร็วขึ้นไม่ได้หรือ ?

- ❖ ได้ ในบางกรณี
- ❖ เปลี่ยนเครื่อง เปลี่ยนภาษา เปลี่ยน compiler  
เปลี่ยนโปรแกรมเมอร์ ก็ได้ แต่ได้ในบางกรณี
- ❖ ด.ย.  $t_1(n) = 10^{-6}n^2$   $n$  คือปริมาณข้อมูล
- ❖ ถ้า CPU เร็วขึ้น 10 เท่า
  - ❖ จะได้  $t_2(n) = t_1(n)/10$
  - ❖ ด้วยเวลาเท่าเดิม CPU ใหม่ จะแก้ปัญหาที่มีปริมาณข้อมูลเพิ่มขึ้นอีก  $\sqrt{10} \approx 3.16$  เท่า

n	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
$t_1(n)$	10	40	90	160	250	360	490
$t_2(n)$	1	4	9	16	25	36	49

## ถ้าช้า ก็ใช้ CPU เร็วขึ้นไม่ได้หรือ ?

- ❖ ด.ย.  $t_1(n) = 10^{-10}2^n$   $n$  คือปริมาณข้อมูล
- ❖ ถ้า CPU เร็วขึ้น 32 เท่า
  - ❖ ด้วยเวลาเท่าเดิม CPU ใหม่จะแก้ปัญหาที่มีปริมาณข้อมูลเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 5 ตัว !!!

$$t_2(n_2) = t_1(n_1) \quad \log_2 2^{n_2} = \log_2 (32 \cdot 2^{n_1})$$

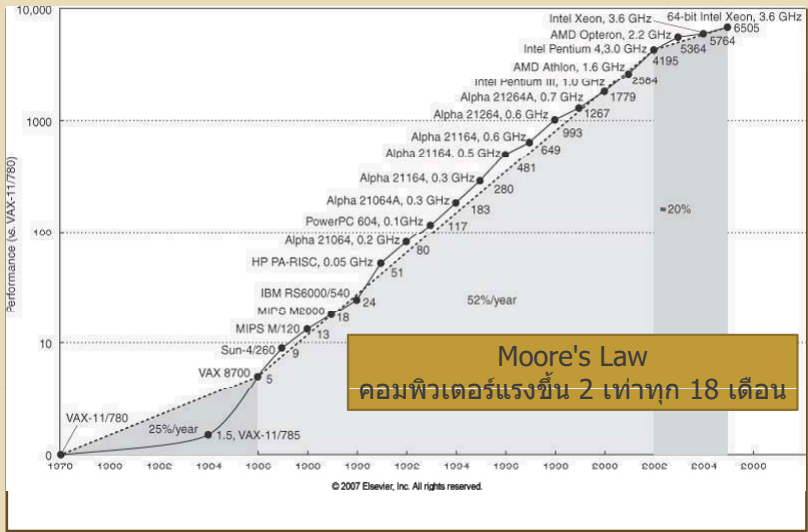
$$\frac{10^{-10}2^{n_2}}{32} = 10^{-10}2^{n_1} \quad n_2 = \log_2 32 + \log_2 2^{n_1}$$

$$2^{n_2} = 32 \cdot 2^{n_1} \quad n_2 = 5 + n_1$$

n	40	45	50	55	100	200	300
$t_1(n)$	$1.1 \times 10^{03}$	$3.5 \times 10^{04}$	$1.1 \times 10^{06}$	$3.6 \times 10^{07}$	$1.3 \times 10^{21}$	$1.6 \times 10^{51}$	$2.0 \times 10^{81}$
$t_2(n)$	$3.4 \times 10^{01}$	$1.1 \times 10^{03}$	$3.5 \times 10^{04}$	$1.1 \times 10^{06}$	$4.0 \times 10^{19}$	$5.0 \times 10^{49}$	$6.4 \times 10^{79}$

$4.0 \times 10^{19}$  มิลลิวินาที  $\approx$  หนึ่งพันล้านปี !!!

## ประสิทธิภาพของหน่วยประมวลผล



## ถ้าช้า

- ❖ ถ้า  $t(n) = 10 \cdot 10^{2n}$ 
  - ❖ Moore's Law : อีก 7.5 ปี เร็วขึ้น 32 เท่า
  - ❖ แก้ปัญหาได้ขนาดเพิ่มอีกแค่ 5 !!!
- ❖ โดยทั่วไป ถ้าเวลาเป็นฟังก์ชันแบบ exponential ของปริมาณข้อมูล
  - ❖ ต้องเปลี่ยนอัลกอริทึม
  - ❖ ต้องเปลี่ยนข้อกำหนดของปัญหา

## Al-Khwarizmi → Algorithm

- ❖ Abū Abdallāh Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī
- ❖ นักคณิตศาสตร์ (ค.ศ. 780 – 850) เขียนหนังสือ
  - ❖ "Algoritmi de numero Indorum" (ภาษาลาติน) แปลว่า "Al-Khwarizmi on the Hindu Art of Reckoning" (อังกฤษ)
  - ❖ นำระบบจำนวนที่มีเลขศูนย์มาใช้ในตะวันออกกลางและยุโรป
  - ❖ เสนอขั้นตอนอย่างมีระบบในการแก้สมการเชิงเส้นและสมการกำลังสอง อันเป็นที่มาของพีชคณิต (algebra)
  - ❖ ...



## สรุป

เข้าใจปัญหา

รู้วิธีออกแบบอัลกอริทึม

รู้วิธีวิเคราะห์

# ทบทวน อัลกอริทึมที่เคยเรียนมา

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## รูปแบบการบรรยายอัลกอริทึม

### ❖ ขอบรรยายด้วยรหัสเทียม (pseudo-code)

```
gcd(a, b) {  
  while (b > 0) {  
    t = a mod b  
    a = b  
    b = t  
  }  
  return a  
}
```

```
gcd(a, b) {  
  while (b > 0)  
    t = a mod b  
    a = b  
    b = t  
  
  return a  
}
```

## รูปแบบการบรรยายอัลกอริทึม

### ❖ ขอบรรยายด้วยรหัสเทียม (pseudo-code)

```
seqSearch( d[1..n], x ) {
  for (k = 1; k <= n; k++) {
    if (d[k] == x) return k
  }
  return -1
}
```

```
prim( g[1..v][1..v], s ) {
  t = new array[1..n]
  ...
}
```

## ผลรวม

❖ **input** : รายการของจำนวนจริง  $n$  จำนวน  
 $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$

❖ **output** : ผลรวม  $d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n$

```
sum( d[1..n] ) {
  s = 0
  for (k = 1; k <= n; k++) {
    s += d[k]
  }
  return s
}
```

$$S = \sum_{k=1}^n d_k$$



## ค่ามากที่สุด

- ❖ **input** : รายการของจำนวนจริง  $n$  จำนวน  
 $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$
- ❖ **output** : ค่ามากที่สุดของ  $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$

```

max( d[1..n] ) {
  m = d[1]
  for (k = 2; k <= n; k++) {
    if (d[k] > m) m = d[k]
  }
  return m
}

```

$$m = \max_{1 \leq k \leq n} \{ d_k \}$$

## ตำแหน่งของค่ามากที่สุด

- ❖ **input** : รายการของจำนวนจริง  $n$  จำนวน  
 $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$
- ❖ **output** : ตำแหน่ง  $\max d_{\max} = \max_{1 \leq k \leq n} \{ d_k \}$

```

max( d[1..n] ) {
  maxI = 1
  for (k = 2; k <= n; k++) {
    if (d[k] > d[maxI]) maxI = k
  }
  return maxI
}

```

## การค้นหาแบบลำดับ

- ❖ **input** :  $x$  และ  $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$   
 $x$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง
- ❖ **output** : ค่า  $k$  ที่  $d_k = x$  ถ้าหาไม่พบ คืน -1

```
seqSearch( d[1..n], x ) {
  for (k = 1; k <= n; k++) {
    if (d[k] == x) return k
  }
  return -1
}
```

## การค้นหาแบบลำดับ

- ❖ **input** :  $x$  และ  $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$   
 $d_1 \leq d_2 \leq d_3 \leq \dots \leq d_n$   $D = \langle 2, 3, 6, 8, 9 \rangle$   
 $x$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง  $x = 8$
- ❖ **output** : ค่า  $k$  ที่  $d_k = x$  ถ้าหาไม่พบ คืน -1

```
seqSearch( d[1..n], x ) {
  for (k = 1; k <= n; k++) {
    if (d[k] == x) return k
    if (d[k] > x) return -1
  }
  return -1
}
```

$D = \langle 2, 3, 6, 8, 9, 10, 29 \rangle$   
 $x = 7$

## การค้นแบบทวิภาค (binary search)

- ❖ input :  $x$  และ  $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$   
 $d_1 \leq d_2 \leq d_3 \leq \dots \leq d_n$   
 $x$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง
- ❖ output : ค่า  $k$  ที่  $d_k = x$  ถ้าหาไม่พบ คืน -1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d	2	3	5	9	11	20	25	39	44	49	52	79

$x = 25$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d	2	3	5	9	11	20	25	39	44	49	52	79

$x = 27$

## การค้นแบบทวิภาค

```

binarySearch( d[1..n], x ) {
    left = 1, right = n
    while ( left <= right ) {
        mid = [(left + right) / 2]
        if ( x == d[mid] ) return mid
        if ( x < d[mid] )
            right = mid - 1
        else
            left = mid + 1
    }
    return -1;
}

```

## Selection Sort

```

selectionSort( d[1..n] ) {
  for (k = n; k >= 2; k--) {
    m = maxI(d, k)
    d[k] ↔ d[m]
  }
}

maxI( d[1..n], k ) {
  maxI = 1
  for (i = 2; i <= k; i++)
    if (d[i] > d[maxI]) maxI = i
  return maxI
}

```

## คู่อันดับกันได้ $x$

- ❖ **input** :  $x$  และ  $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$   
 $x$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง
- ❖ **output** :  $i$  และ  $j$  โดยที่  $i \neq j$  และ  $(d_i + d_j) = x$   
ถ้าไม่พบคืน  $-1, -1$

$x = 7$      $D = \langle 9, 2, 4, 3, 7, 5, 0 \rangle$

```

sum2( d[1..n], x ) {
  for (i = 1; i <= n; i++)
    for (j=i+1; j <= n; j++)
      if (d[i]+d[j] == x) return i,j
  return -1, -1
}

```

คู่ใดบวกกันได้  $x$ 

- ❖ input :  $x$  และ  $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$   
 $x$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง
- ❖ output :  $i$  และ  $j$  โดยที่  $i \neq j$  และ  $(d_i + d_j) = x$   
ถ้าไม่พบคืน  $-1, -1$

$x = 7$      $D = \langle 9, 2, 4, 3, 7, 5, 0 \rangle$   
หา  $7 - 9 = -2$   
หา  $7 - 2 = 5$

$x = 7$      $D = \langle 0, 2, 3, 4, 5, 7, 9 \rangle$   
หา  $7 - 0 = 7$

ถ้า  $D$  เรียงลำดับแล้ว ก็ค้นด้วย binary search

คู่ใดบวกกันได้  $x$ 

- ❖ input :  $x$  และ  $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$   
 $d_1 \leq d_2 \leq d_3 \leq \dots \leq d_n$   
 $x$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง
- ❖ output :  $i$  และ  $j$  โดยที่  $i \neq j$  และ  $(d_i + d_j) = x$   
ถ้าไม่พบคืน  $-1, -1$

```
sum2( d[1..n], x ) {
  for ( i = 1; i <= n; i++ ) {
    delta = x - d[i]
    j = binarySearch( d, delta )
    if ( j ≠ -1 ) return i, j
  }
  return -1, -1
}
```

## อัลกอริทึมที่เขียนจากสูตร

$$x_k = \frac{1}{2} \left( x_{k-1} + \frac{a}{x_{k-1}} \right), x_0 = 1$$

$$\sqrt{a} = \lim_{k \rightarrow \infty} x_k$$

a	= 100
x <sub>0</sub>	= 1.0
x <sub>1</sub>	= 50.5
x <sub>2</sub>	= 26.24
x <sub>3</sub>	= 15.03
x <sub>4</sub>	= 10.84
x <sub>5</sub>	= 10.03
x <sub>6</sub>	= 10.00

```
sqrt( a ) {
  x = 1
  while ( x2 ≠ a )
    x = ( x + a/x ) / 2
  return x
}
```

$$|x^2 - a| > 10^{-10}$$

## อัลกอริทึมที่เขียนจากสูตร

gcd(a, b) {	gcd(a, b) = gcd(b, a mod b)
while (b > 0) {	gcd(a, 0) = a
t = a mod b	gcd(45, 24) = gcd(24, 21)
a = b	= gcd(21, 3)
b = t	= gcd( 3, 0)
}	= 3
return a	
}	

# อัลกอริทึมทำซ้ำ แบบวงวนและแบบเรียกซ้ำ

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## หัวข้อ

sum  
max  
sequential search  
binary search  
gcd (Euclid)  
logarithm  
binary counter  
sqrt (Babylonian)  
sum of subset

## Iterative & Recursive

```
sum( d[1..n] ) {
  s = 0
  for (k = 1; k <= n; k++) {
    s += d[k]
  }
  return s
}
```

$$s = \sum_{k=1}^n d_k$$

```
sum( d[1..n] ) {
  return s(d, n)
}
s( d[1..n], k ) {
  if ( k == 0 ) return 0
  return s(d, k-1) + d[k]
}
```

$$s_k = s_{k-1} + d_k, \text{ if } k > 0$$

$$s_0 = 0$$

## max

```
max( d[1..n] ) {
  m = d[1]
  for (k = 2; k <= n; k++) {
    if (d[k] > m) m = d[k]
  }
  return m
}
```

$$m = \max_{1 \leq k \leq n} \{ d_k \}$$

```
max( d[1..n] ) {
  return m(d, n)
}
m( d[1..n], k ) {
  if ( k == 1 ) return d[1]
  return max( m(d, k-1), d[k] )
}
```

$$m_k = \max(m_{k-1}, d_k), \text{ if } k > 1$$

$$m_1 = d_1$$



## Sequential Search

```
seqSearch( d[1..n], x ) {
  for (k = 1; k <= n; k++) {
    if (d[k] == x) return k
  }
  return -1
}
```

```
seqSearch( d[1..n], x ) {
  return search( d, x, n )
}
search( d[1..n], x, k ) {
  if ( k == 0 ) return -1
  if ( d[k] == x ) return k
  return search( d, x, k-1 )
}
```

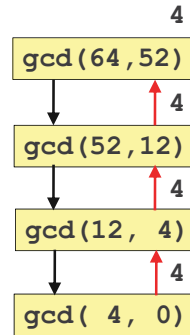
## Binary Search

```
binarySearch( d[1..n], x ) {
  return bsearch( d, x, 1, n )
}
bsearch( d[1..n], x, left, right ) {
  if (left > right) return -1
  mid = ⌊(left + right) / 2⌋
  if (x = d[mid]) return mid
  if (x < d[mid])
    return bsearch( d, x, left, mid - 1 )
  else
    return bsearch( d, x, mid + 1, right )
}
```

# Greatest Common Divisor

```
gcd(a, b) {
  while (b > 0) {
    t = a mod b
    a = b
    b = t
  }
  return a  gcd(a,b) = gcd(b, a mod b)
}          gcd(a,0) = a
```

```
gcd(a, b) {
  if (b == 0) return a
  return gcd(b, a mod b)
}
```



# $\lfloor \log_2 n \rfloor$

```
log2( n ) {
  c = 0
  while (n > 1) {
    n =  $\lfloor n / 2 \rfloor$ 
    c++
  }
  return c
}
```

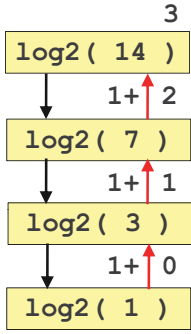
```
log2( n ) {
  if ( n <= 1 ) return 0
  return 1 + log2( $\lfloor n/2 \rfloor$ )
}
```

n	$\lfloor \log_2 n \rfloor$
1	0
2	1
3	1
4	2
5	2
6	2
7	2
8	3
9	3

# $\lfloor \log_2 n \rfloor$

```

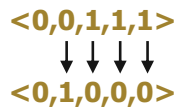
log2( n ) {
  if ( n <= 1 ) return 0
  return 1 + log2( n/2 )
}
    
```



# Binary Counter

```

bcounter( n ) {
  d = array of size n
  for ( i = 1; i <= n; i++) d[i] = 0
  for ( i = 1; i <= 2^n; i++) {
    print( d )
    increment( d )
  }
  increment( d[1..n] )
  for ( i=n; i>=1 AND d[i]=1; i--)
    d[i] = 0
  if ( i >= 1 ) d[i] = 1
}
    
```



0	0	0
0	0	1
0	1	0
0	1	1
1	0	0
1	0	1
1	1	0
1	1	1

## Binary Counter : Recursive

```

bcounter( n ) {
  d = array of size n
  for ( i = 1; i <= n; i++) d[i] = 0
  count( d, 0 )
}
count( d[1..n], k ) {
  if ( k = n ) print( d )
  else {
    d[k+1] = 0; count( d, k+1 )
    d[k+1] = 1; count( d, k+1 )
  }
}

```

k = 2   

0	1	?	?	?
---	---	---	---	---

k = 3   

0	1	0	?	?
---	---	---	---	---

   k = 3   

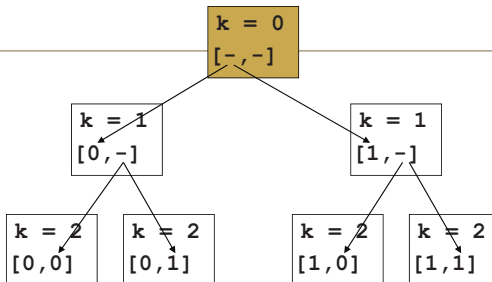
0	1	1	?	?
---	---	---	---	---

## Binary Counter : Recursive

```

count( d[1..n], k ) {
  if ( k = n ) print( d )
  else {
    d[k+1] = 0; count( d, k+1 )
    d[k+1] = 1; count( d, k+1 )
  }
}

```



## sqrt

```

sqrt( a ) {
  x = 1
  while ( x2 ≠ a )
    x = ( x + a/x ) / 2
  return x
}

```

$|x^2 - a| \geq 10^{-10}$

$$x_k = \frac{1}{2} \left( x_{k-1} + \frac{a}{x_{k-1}} \right), x_0 = 1$$

```

sqrt( a ) {
  return sqrt( a, 1 );
}
sqrt( a, x ) {
  if ( |x2 - a| < 10-10 ) return x;
  return sqrt( a, ( x + a/x ) / 2 );
}

```

## Sum of Subset

- ❖ **input** :  $x$  และ  $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$   
 $x$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง
- ❖ **output** : true ถ้า  $D$  มีเซตย่อยที่ผลรวมเท่ากับ  $x$   
ถ้าไม่มี คืน false

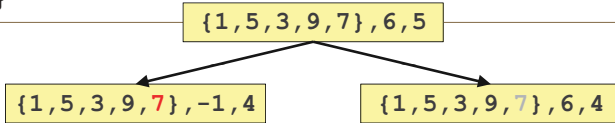
$D = \{1, 4, 3, 9, 7\}, x = 11$  true

$D = \{1, 4, 3, 9, 7\}, x = 18$  false

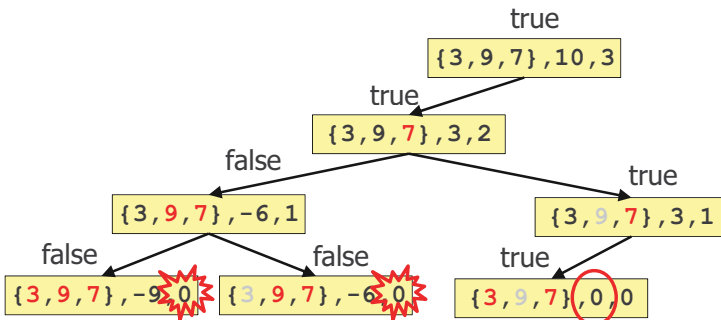
# Sum of Subset

```

subsetSum( d[1..n], x ) {
    return subsetSum( d, x, n )
}
subsetSum( d[1..n], x, k ) {
    if ( x == 0 ) return true;
    if ( k < 1 ) return false;
    return subsetSum( d, x-d[k], k-1 ) OR
           subsetSum( d, x, k-1 );
}
    
```



# D = {3, 9, 7}, x = 10



# ทบทวน โครงสร้างข้อมูล

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## หัวข้อ

### ❖ **Abstract Data Types**

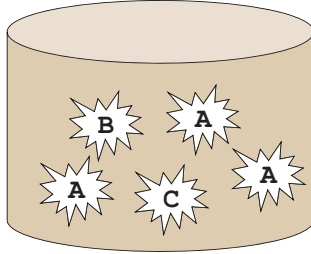
- ❖ Collection, Set, List, Stack, Queue, Priority Queue

### ❖ **Implementations**

- ❖ array-based stack and queue, linked list, binary search tree, AVL tree, hash table (separate chaining and open addressing), binary heap

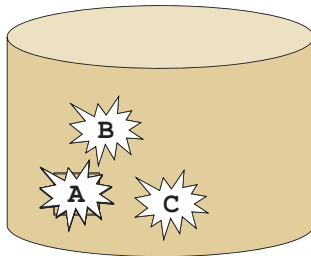
## Collection

❖ เก็บข้อมูลไม่มีอันดับ เข้าได้



## Set

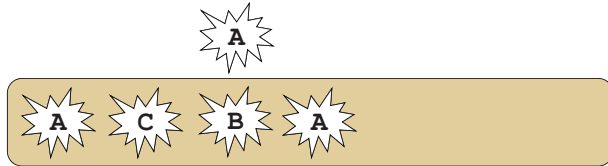
❖ เก็บข้อมูลไม่มีอันดับ ไม่ให้ซ้ำ





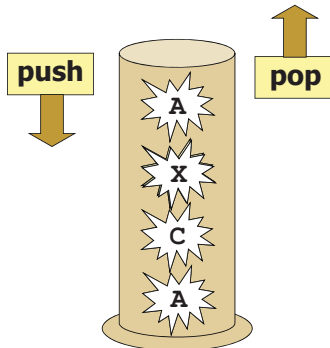
## List

❖ เก็บข้อมูลเรียงแบบมีอันดับ เข้าได้



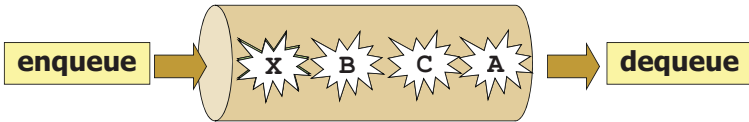
## Stack

❖ ข้อมูล เข้าหลัง ออกก่อน  
(LIFO - Last-In First-Out)



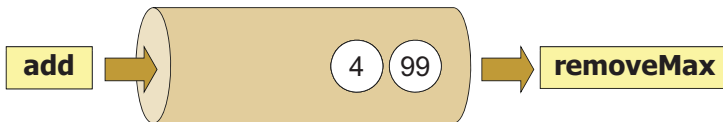
## Queue

❖ ข้อมูล เข้าก่อน ออกก่อน  
(FIFO - First-In First-Out)



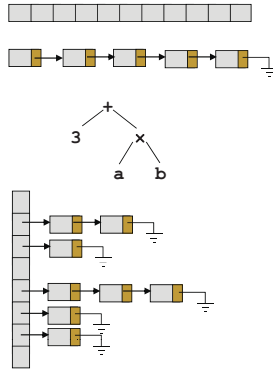
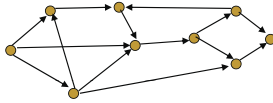
## Priority Queue

❖ ออกตามความสำคัญ (แถวคอยลำดับค่าได้)



# วิธีสร้างที่เก็บข้อมูล

- ❖ สร้างด้วยอาเรย์
- ❖ สร้างด้วยการโยง
- ❖ สร้างด้วยต้นไม้
- ❖ สร้างด้วยตาราง
- ❖ อื่น ๆ



# การสร้าง list ด้วยอาเรย์



add(1, X)

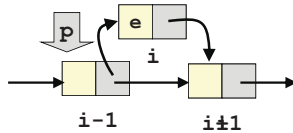
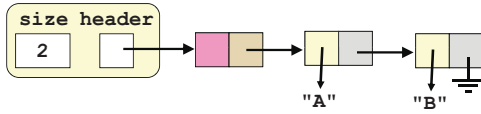
ข้อมูลเต็มอาเรย์ก็ขยาย  
หรือไม่ก็จองเผื่อไว้



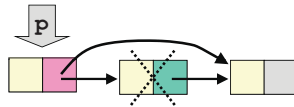
remove(0)

เวลา  $\propto$  ปริมาณข้อมูล  
 $t \propto n$

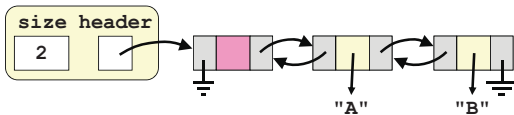
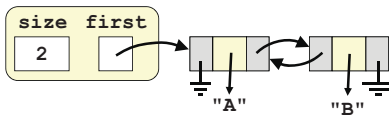
## การสร้าง list แบบ linked list



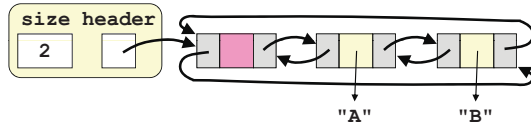
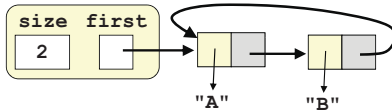
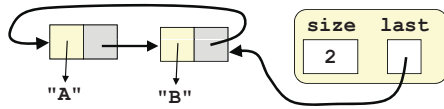
ใช้เวลาคงตัว



## Linked list แบบโยงไป-กลับ



## Linked list แบบโยงวน (circular)



## สร้าง Stack ด้วยอาเรย์

Stack s	size	elementData				
s = new Stack(4)	0	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>				
s.push("A")	1	<table border="1"><tr><td>A</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	A			
A						
s.push("B")	2	<table border="1"><tr><td>A</td><td>B</td><td></td><td></td></tr></table>	A	B		
A	B					
s.push("C")	3	<table border="1"><tr><td>A</td><td>B</td><td>C</td><td></td></tr></table>	A	B	C	
A	B	C				
s.pop()	2	<table border="1"><tr><td>A</td><td>B</td><td></td><td></td></tr></table>	A	B		
A	B					

ข้อมูลเต็มอาเรย์ก็ขยาย  
หรือไม่ก็จองเอาไว้

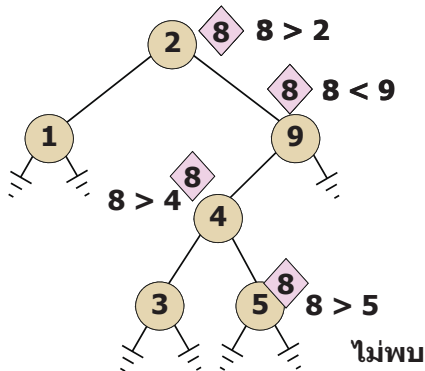
ใช้เวลาคงตัว

## สร้าง Queue ด้วยอาเรย์

Queue q	front	size	elementData				
			0 1 2 3				
q = new Queue (4)	0	0	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>				
q.enqueue ("A")	0	1	<table border="1"><tr><td>A</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	A			
A							
q.enqueue ("B")	0	2	<table border="1"><tr><td>A</td><td>B</td><td></td><td></td></tr></table>	A	B		
A	B						
q.dequeue ()	1	1	<table border="1"><tr><td></td><td>B</td><td></td><td></td></tr></table>		B		
	B						
q.enqueue ("C")	1	2	<table border="1"><tr><td></td><td>B</td><td>C</td><td></td></tr></table>		B	C	
	B	C					
q.dequeue ()	2	1	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td>C</td><td></td></tr></table>			C	
		C					
q.enqueue ("D")	2	2	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td>C</td><td>D</td></tr></table>			C	D
		C	D				
q.enqueue ("X")	2	3	<table border="1"><tr><td>X</td><td></td><td>C</td><td>D</td></tr></table>	X		C	D
X		C	D				

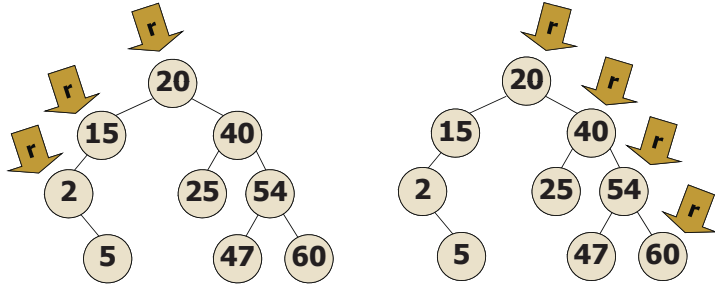
ใช้เวลาคงตัว

## Binary Search Tree



$$t \propto h$$

## BST : min, max



$$t \propto h$$

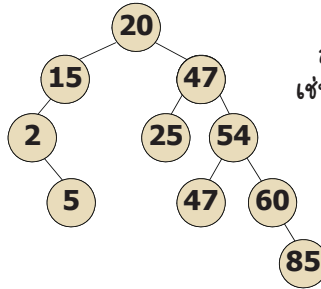
## สร้าง BST ด้วยการค่อย ๆ เพิ่ม

1, 2, 6, 3, 5

2, 1, 5, 3, 6

ความสูงของต้นไม้ขึ้นกับลำดับ  
ของข้อมูลที่เพิ่มใส่ต้นไม้

## BST : remove



ลบปมที่มี 2 ลูก  
เช่น ต้องการลบ 40

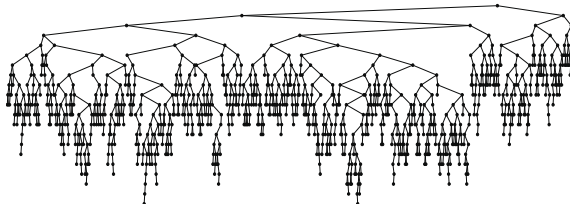
ลบใบ  
เช่น ต้องการลบ 5

ลบปมที่มีลูกเดียว  
เช่น ต้องการลบ 60

$$t \propto h$$

## BST ที่สร้างจากข้อมูลสุ่ม

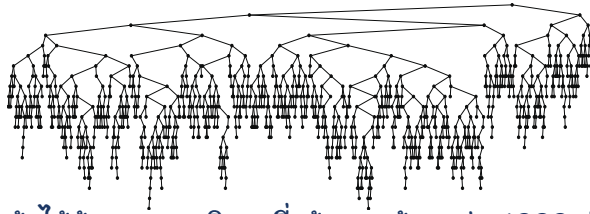
- ❖ ต้นไม้ที่เก็บข้อมูล  $n$  ตัว  $t \propto h$
- ❖ ช่วงของความสูง :  $\lfloor \log_2 n \rfloor \leq h \leq n - 1$
- ❖ ถ้าสร้างจากข้อมูลสุ่ม สามารถวิเคราะห์ได้ว่า
  - ❖ ความลึกเฉลี่ยของปมภายใน  $\approx 1.39 \log_2 n$
  - ❖ ความลึกเฉลี่ยของ null  $\approx 2 + 1.39 \log_2 n$
  - ❖ ความสูง (ความลึกของใบล่างสุด)  $\approx 2.99 \log_2 n$



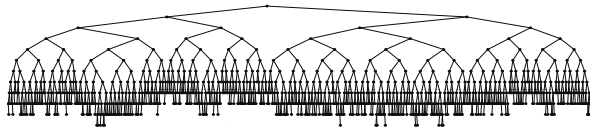
Devroye, L. 1986. A note on the height of binary search trees. *J. ACM* 33, 489–498.



## BST vs. AVL



ต้นไม้ค้นหาแบบทวิภาคที่สร้างจากข้อมูลสุ่ม 1000 ตัว



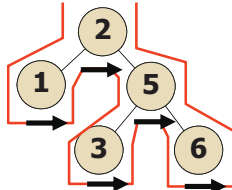
ต้นไม้เอวีแอลที่สร้างจากข้อมูลสุ่ม 1000 ตัว

$$\lfloor \log_2 n \rfloor \leq h < 1.44 \log_2 n$$

## การเรียงลำดับข้อมูลแบบต้นไม้

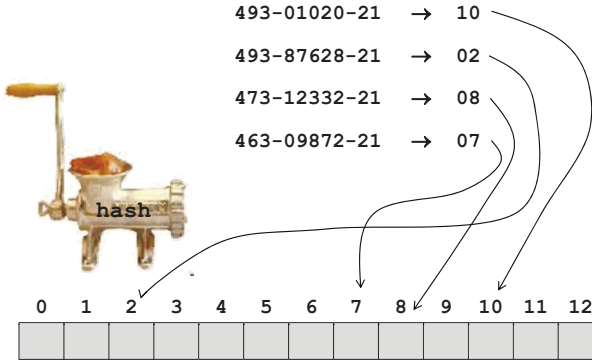
- ❖ นำข้อมูลทั้งหมด มาสร้างต้นไม้ค้นหาแบบทวิภาค
- ❖ แวะผ่านต้นไม้แบบตามลำดับ

2, 1, 5, 3, 6

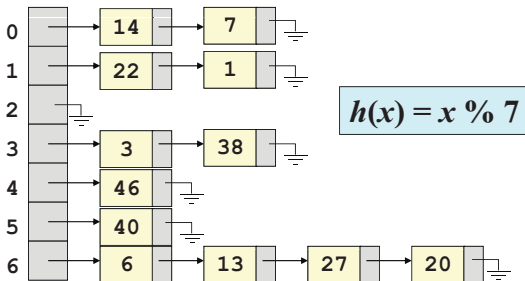


1 2 3 5 6

# Hash Table



# Hash Table : Separate Chaining



$$t \propto \frac{n}{\text{ขนาดตาราง}}$$

## Hash Table : Linear Probing

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

ใช้  $h(x) = x \% 13$  แล้วเพิ่มข้อมูลที่มีคีย์ตามลำดับดังนี้

17 32 26 7 4 43 12 11 24

## Hash Table : Quadratic Probing

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

ใช้  $h(x) = x \% 13$  แล้วเพิ่มข้อมูลที่มีคีย์ตามลำดับดังนี้

4 5 8 0 7 1 17

## เปรียบเทียบเวลาการทำงาน

$1117 = 1 \times 3 \times 3 \times 3 / 2 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 / 2 / 2 \times 3 \times 3 / 2 / 2 / 2 / 2 \times 3 \times 3 \times 3 / 2 / 2 \times 3 / 2$

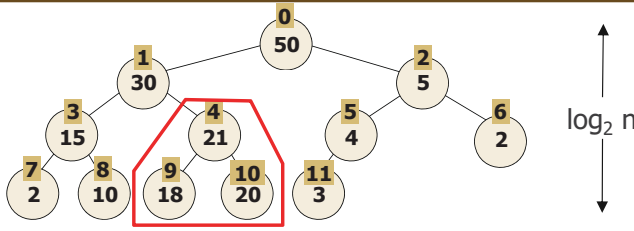
```
public static void main(String[] args) {
    Set set = new HashSet();

```

สร้าง Set ด้วย	เวลาการทำงาน (ms)
HashSet	164987
BSTSet	1112
AVLSet	430
LinearProbingHashSet	1903
QuadraticProbingHashSet	390
SeparateChainingHashSet	350

ตอนทำงานเสร็จ set มีข้อมูลจำนวน 73816 ตัว

## Priority Queue : Binary Heap

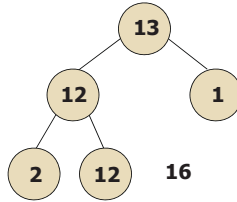


12	50	30	5	15	21	4	2	2	10	18	20	3		
----	----	----	---	----	----	---	---	---	----	----	----	---	--	--

size      elementData

- รากเก็บที่ index 0
- ลูกซ้ายของ node ที่ index k อยู่ที่ index  $2k + 1$
- ลูกขวาของ node ที่ index k อยู่ที่ index  $2k + 2$
- พ่อของ node ที่ index k อยู่ที่ index  $(k - 1) / 2$

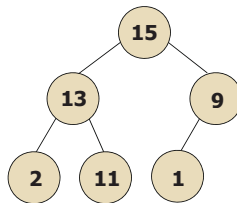
## Binary Heap : add



	0	1	2	3	4	5	6
5	13	12	1	2	12		
size	elementData						

$$t \propto \log_2 n$$

## Binary Heap : removeMax



	0	1	2	3	4	5	6
6	15	13	9	2	11	1	
size	elementData						

$$t \propto \log_2 n$$

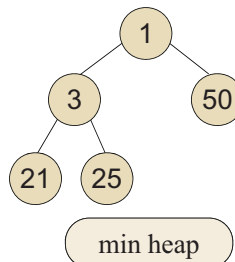
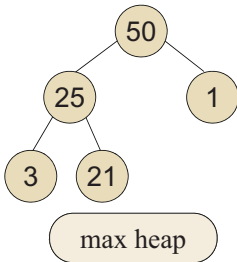
## MaxHeap Min Heap

### ❖ ไม้ปมากที่สุด

- ❖ ข้อมูลของ parent node มีค่ามากกว่าของลูก ๆ

### ❖ ไม้ปน้อยสุด

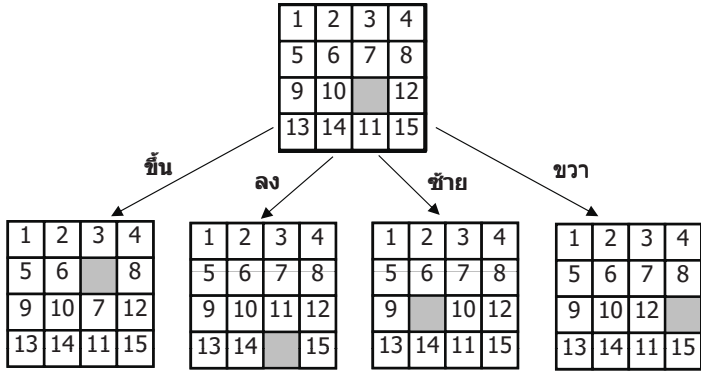
- ❖ ข้อมูลของ parent node มีค่าน้อยกว่าของลูก ๆ



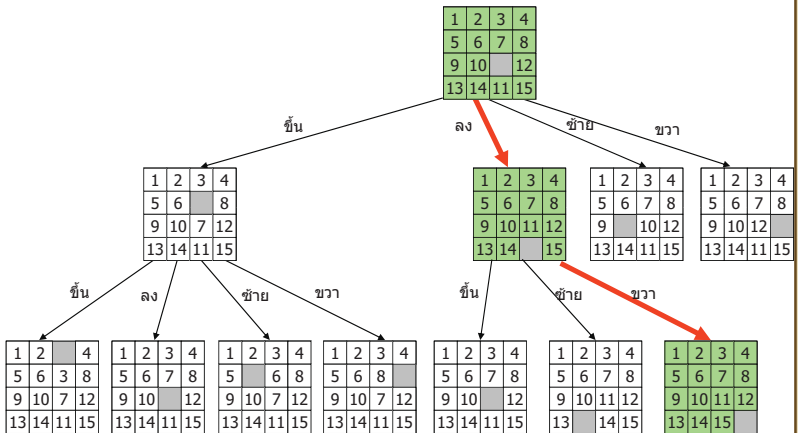
## ตัวอย่าง : 15-puzzle

1	2	3	4
5		7	8
9	6	10	12
13	14	11	15

## เลื่อนช่องว่างเพื่อผลิตตาราง



## พบคำตอบ พบวิธีเลื่อน



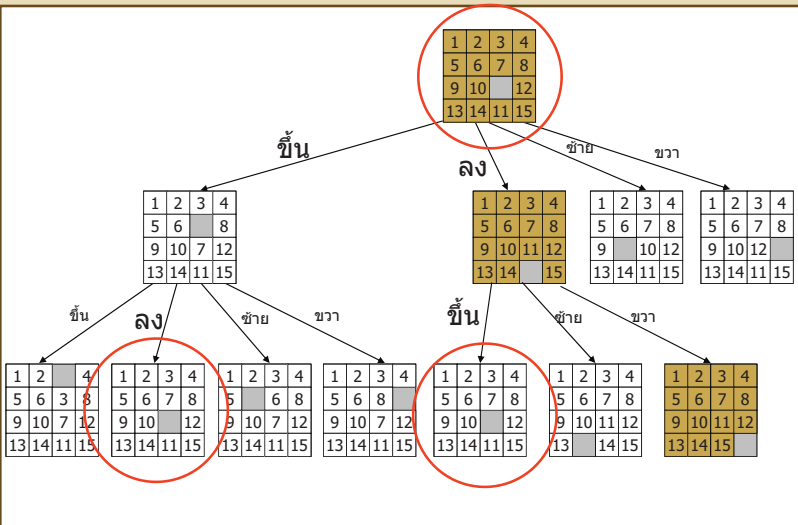
# 15-puzzle : ส่วนของโปรแกรม

```
public static PuzzleBoard solve(PuzzleBoard b) {
    Queue queue = new ArrayQueue();
    queue.enqueue(b);
    while (!queue.isEmpty()) {
        b = queue.dequeue();
        for (int d = 0; d < 4; d++) {
            PuzzleBoard b2 = b.moveBlank(d);
            if (b2 != null) {
                if (b2.isAnswer()) return b2;

                queue.enqueue(b2);
            }
        }
    }
    return null;
}
```

ใช้ queue เก็บตารางที่ผลิตใหม่

# 15-puzzle : ตารางที่ผลิตอาจซ้ำกัน





## 15-puzzle : ส่วนของโปรแกรม

```
public static PuzzleBoard solve(PuzzleBoard b) {
    Set set = new ArraySet();
    Queue queue = new ArrayQueue();
    queue.enqueue(b); set.add(b);
    while ( !queue.isEmpty() ) {
        b = queue.dequeue();
        for (int d = 0; d < 4; d++) {
            PuzzleBoard b2 = b.moveBlank(d);
            if (b2 != null) {
                if ( b2.isAnswer() ) return b2;
                if ( ! set.contains(b2) ) {
                    queue.enqueue(b2); set.add(b);
                }
            }
        }
    }
    return null;
}
```

ใช้ queue เก็บตารางที่ผลิตใหม่

ใช้ set เพื่อตรวจสอบความซ้ำซ้อน

## สร้าง Set ได้หลายแบบ

```
public static PuzzleBoard solve(PuzzleBoard b) {
    Set set = new HashSet();
    Queue queue = new ArrayQueue();
    queue.enqueue(b); set.add(b);
    while ( !queue.isEmpty() ) {
        b = queue.dequeue();
        for (int d = 0; d < 4; d++) {
            PuzzleBoard b2 = b.moveBlank(d);
            if (b2 != null) {
                if ( b2.isAnswer() ) return b2;
                if ( ! set.contains(b2) ) {
                    queue.enqueue(b2); set.add(b2);
                }
            }
        }
    }
    return null;
}
```

## ผลการทดลอง

ตารางเริ่มต้น	จำนวนตารางที่ผลิต	เวลาการทำงาน (วินาที)			
		ArraySet	BSTSet	AVLSet	HashSet
แบบที่ 1	552	0.03	0.02	0.04	0.05
แบบที่ 2	5242	1.94	0.22	0.18	0.12
แบบที่ 3	132049	1819.6	7.08	5.71	2.56

## สรุป

- ❖ **List**
  - ❖ array :  $\propto n$ , linked) :  $\propto n$ , constant
- ❖ **Search Tree**
  - ❖ BST :  $\propto \log n$  (avg), AVL  $\propto \log n$
- ❖ **Stack, Queue**
  - ❖ push, pop, peek, enqueue, dequeue, front : constant
- ❖ **Binary Heap**
  - ❖ add, removeMax :  $\propto \log n$ , findMax : constant
- ❖ **Hash Table**
  - ❖ add, remove, find :  $\propto (n / T)$

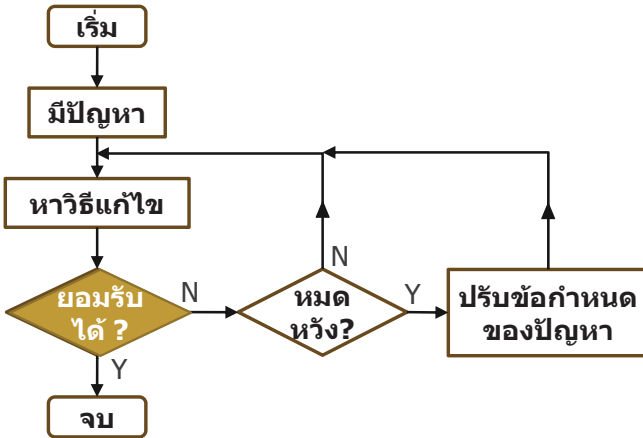
# การวิเคราะห์อัลกอริทึม

## สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

### หัวข้อ

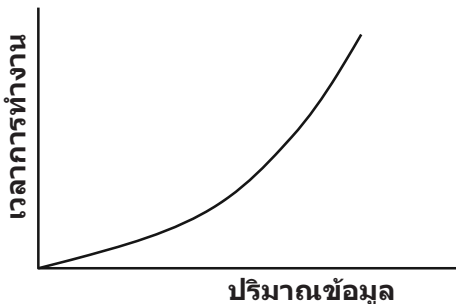
- ❖ การวิเคราะห์อัลกอริทึม
  - ❖ แบบทดลอง และแบบคณิตวิเคราะห์
- ❖ การนับจำนวนการทำงานของคำสั่งพื้นฐาน
- ❖ อัตราการเติบโตของฟังก์ชัน
- ❖ สัญกรณ์เชิงเส้นกำกับ
- ❖ การวิเคราะห์การทำงาน
  - ❖ แบบลำดับ, แบบเลือกทำ, แบบวงวน, แบบเรียกซ้ำ

## ขั้นตอนการออกแบบอัลกอริทึม



## การวิเคราะห์อัลกอริทึม

- ❖ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึม
  - ❖ เวลาการทำงาน
  - ❖ ปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการทำงาน
- ❖ จะเน้นวิเคราะห์เฉพาะเวลาการทำงาน



## การวิเคราะห์อัลกอริทึม

- ❖ **Mathematical Analysis**
- ❖ **Experimental analysis**
  - ❖ แปลงอัลกอริทึมเป็นโปรแกรม
  - ❖ สั่งทำงานกับข้อมูลทดสอบ
  - ❖ จับเวลาการทำงาน
  - ❖ บันทึกผล
  - ❖ วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเวลาการทำงานกับปริมาณข้อมูล

## Selection Sort

```
selectionSort( d[1..n] ) {  
  for (k = n; k > 1; k--) {  
    maxI = 1  
    for (i = 2; i <= k; i++)  
      if (d[i] > d[maxI]) maxI = i  
    d[k] ↔ d[maxI]  
  }  
}
```

## Selection Sort (ภาษา C)

```
void selectionSort(int d[], int n) {
    int k, i;
    for (k = n - 1; k > 0; k--) {
        int maxI = 1;
        for (i = 0; i <= k; i++)
            if (d[i] > d[maxI]) maxI = i;
        int t = d[k];
        d[k] = d[maxI];
        d[maxI] = t;
    }
}
```

## เขียนโปรแกรมทดลองจับเวลา

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <windows.h>

int main(int argc, char *argv[]) {
    int i, k, n, repeat = 10;
    for( n = 0; n<=20000; n+=2000) {
        int *d = malloc( n * sizeof(int) );
        long sum = 0;
        for (k=0; k<repeat; k++) {
            for (i=0; i<n; i++) d[i] = i;
            long start = GetTickCount();
            selectionSort(d, n);
            sum += GetTickCount() - start;
        }
        printf("%d \t %f \n", n, (float)sum/repeat);
    }
    system("PAUSE"); return 0;
}
```

## Selection Sort (ภาษา Java)

```
static void selectionSort(int[] d) {
    for (int k = d.length-1; k > 0; k--) {
        int maxI = 1;
        for (int i = 0; i <= k; i++)
            if (d[i] > d[maxI]) maxI = i;
        int t = d[k];
        d[k] = d[maxI];
        d[maxI] = t;
    }
}
```

## เขียนโปรแกรมทดลองจับเวลา

```
public class TestSelectionSort {
    public static void main(String[] args) {
        int repeat = 10;
        for (int n = 0; n <= 20000; n += 2000) {
            int[] d = new int[n];
            long sum = 0;
            for (int k = 0; k < repeat; k++) {
                for (int i = 0; i < n; i++) d[i] = i;
                long start = System.currentTimeMillis();
                selectionSort(d);
                sum += System.currentTimeMillis() - start;
            }
            System.out.printf("%d \t %f \n",
                               n, (double)sum/repeat);
        }
    }
}
```

```
for (int i = 0; i < 10000; i++)
    selectionSort(new int[1]);
```

## สั่งทำงาน + บันทึกผล

❖ ภาษา C : ใช้ GNU-C Compiler (3.4.2)

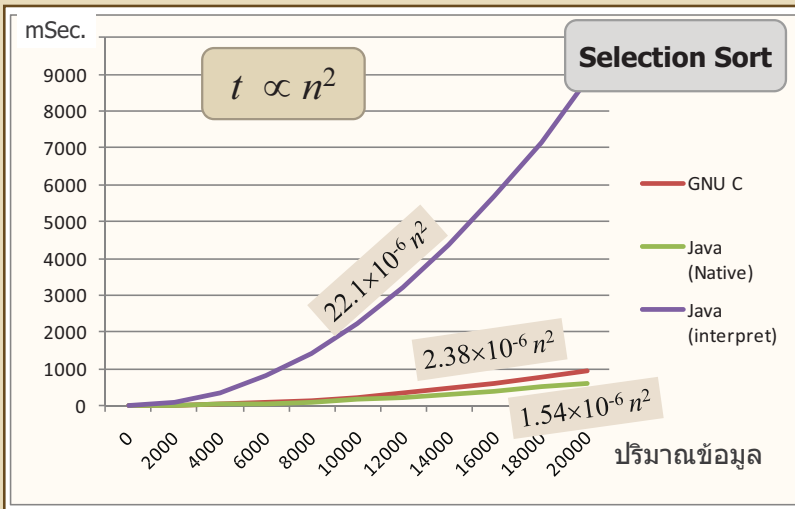
❖ ภาษา Java : ใช้ Java 6 (build 1.6.0\_14-b08)

- ❖ interpreted-only mode (option -Xint ตอนทำงาน)
- ❖ Compilation to native code (บังคับ compile ด้วยการเรียกเมท็อดซ้ำ ๆ สัก 10,000 ครั้ง)

n	GNU C	Java (Native)	Java (interpret)
0	0	0.0	0.0
2000	9.4	6.3	90.6
4000	39	25.0	359.4
6000	84.4	54.6	806.2
8000	151.6	98.5	1425.0
10000	237.5	156.2	2231.2
12000	343.7	220.4	3190.6
14000	467.2	300.0	4359.5
16000	610.9	393.7	5675.0
18000	773.5	500.0	7160.6
20000	957.8	614.0	8862.3

❖ **Lenovo X200**  
**Intel® Core™ 2 Duo**  
**P8400 @ 2.26GHz**  
**3GB Ram**  
**Windows XP**

## เปรียบเทียบเวลาการทำงาน





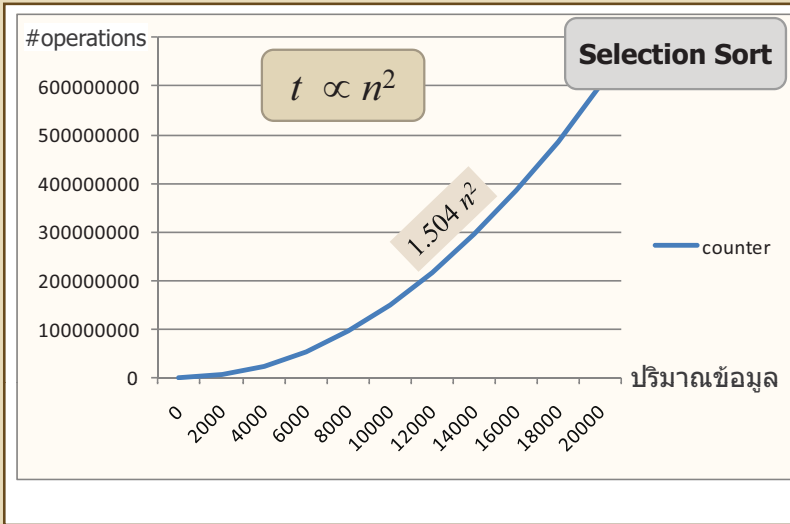
## ใช้จำนวนการทำงานของคำสั่งแทนเวลา

```
static int counter = 0;
static void selectionSort(int[] d) {
    counter = 1 + d.length + d.length - 1;
    for (int k = d.length-1; k > 0; k--) {
        int maxI = 1;
        counter += 2 + k+2 + k+1;
        for (int i = 0; i <= k; i++) {
            counter += 1;
            if (d[i] > d[maxI]) {
                maxI = i; counter += 1;
            }
        }
        counter += 3;
        int t = d[k]; d[k] = d[maxI]; d[maxI] = t;
    }
}
```

## เขียนโปรแกรมทดลองนับคำสั่ง

```
public class TestSelectionSort {
    public static void main(String[] args) {
        int repeat = 10;
        for (int n = 0; n <= 20000; n += 2000) {
            int[] d = new int[n];
            long sum = 0;
            for (int k = 0; k < repeat; k++) {
                for (int i = 0; i < n; i++) d[i] = i;
                counter = 0;
                selectionSort(d);
                sum += counter;
            }
            System.out.printf("%d \t %f \n",
                               n, (double)sum/repeat);
        }
    }
}
```

## นับจำนวนการทำงานของคำสั่ง

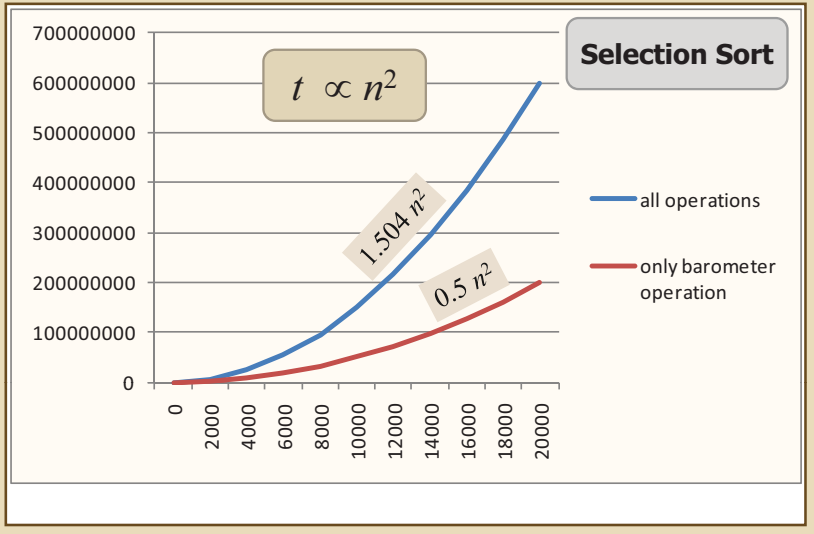


## นับเฉพาะคำสั่งตัวแทน

```
static int counter = 0;

static void selectionSort(int[] d) {
    for (int k = d.length-1; k > 0; k--) {
        int maxI = 1;
        for (int i = 0; i <= k; i++) {
            counter += 1;
            if (d[i] > d[maxI]) {
                maxI = i;
            }
        }
        int t = d[k]; d[k] = d[maxI]; d[maxI] = t;
    }
}
```

## นับทุกคำสั่ง vs. นับคำสั่งตัวแทน



## Mathematical Analysis

- ❖ ไม่ต้องเขียนเป็นโปรแกรม ไม่ต้องสั่งทำงานจริง  
ไม่ต้องวาดกราฟ วิเคราะห์จากอัลกอริทึม

```
selectionSort( d[1..n] ) {
  for (k = n; k > 1; k--) {
    maxI = 1
    for (i = 2; i <= k; i++)
      if (d[i] > d[maxI]) maxI = i
    d[k] ↔ d[maxI]
  }
}
```

$$\sum_{k=2}^n \left( \sum_{i=2}^k 1 \right) = \sum_{k=2}^n (k-1) = \sum_{j=1}^{n-1} j = \frac{n(n-1)}{2} = \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2}$$

## คำสั่งตัวแทนต้องเป็นคำสั่งพื้นฐาน

### ❖ คำสั่งพื้นฐาน คือคำสั่งที่

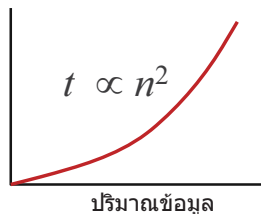
- ❖ ใช้เวลาการทำงานไม่เกินค่าคงตัวค่าหนึ่ง
- ❖ ใช้เวลาการทำงานไม่แปรตามขนาดของ input
- ❖ เป็นคำสั่งพื้นฐาน ๆ เช่น + - \* / if เปรียบเทียบ return break...

```
selectionSort( d[1..n] ) {
  for ( k = n; k > 1; k-- ) {
    m = maxI(d, k)
    d[k] ↔ d[m]
  }
}
```

## การวิเคราะห์อัลกอริทึม

- ❖ เวลาการทำงานแปรตามจำนวนการทำงานของคำสั่ง
- ❖ จำนวนการทำงานของคำสั่ง แปรตามจำนวนการทำงานของคำสั่งตัวแทน
- ❖ เพื่อความง่าย เราวิเคราะห์อัลกอริทึมเชิงเวลาด้วยการหาความสัมพันธ์ของ
  - ❖ จำนวนการทำงานของคำสั่งตัวแทน
  - ❖ กับปริมาณข้อมูล

จำนวนการทำงานของคำสั่งตัวแทน  
(เวลาการทำงาน)



## วัดปริมาณข้อมูลเข้าอย่างไร ?

- ❖ **ลำบาก** : ถ้าวัดจากขนาด (จำนวนบิต) ของ input
- ❖ **ง่ายขึ้น** : พิจารณาว่า ขนาดของ input แปรตามค่าอะไรของ input
- ❖ **ตัวอย่าง** : `sort( d[1..n] )`
  - ❖ input เป็นอาร์เรย์ของจำนวน n ช่อง
  - ❖ แต่ละจำนวนมีค่าจำกัด (int ในจาวามีค่า  $-2^{31}$  ถึง  $2^{31} - 1$ )
  - ❖ ดังนั้น n แทนปริมาณข้อมูล
- ❖ **ตัวอย่าง** : `shortestPath( V, E, w, s )`
  - ❖ input เป็นกราฟถ่วงน้ำหนัก
  - ❖ ขนาดของกราฟแปรตามจำนวนปมและจำนวนเส้นเชื่อม
  - ❖ ดังนั้น  $|V| + |E|$  แทนปริมาณข้อมูล

## เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

```
for (i = 1; i <= n; i++)
  for (j = i+1; j <= n; j++)
    sum += cosine(d[i][j])*i;
```

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n 1 = \sum_{i=1}^n (n-i) = \sum_{i=1}^n n - \sum_{i=1}^n i$$

$$= n^2 - \frac{n(n+1)}{2} = \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n 1 = \sum_{i=1}^n n = n^2$$

แบบใดเร็วกว่า ?

```
for (i = 1; i <= n; i++)
  for (j = 1; j <= n; j++)
    sum += j;
```

## เปรียบเทียบเวลาการทำงาน

```
for (i = 1; i <= n; i++)
    for (j = i+1; j <= n; j++)
        sum += cosine(d[i][j])*i;
```

$\frac{n^2}{2} - \frac{n}{2}$  จำนวนการทำงานของคำสั่ง : น้อยกว่า  
คำสั่งตัวแทน : ใช้เวลามากกว่า

สรุปได้ว่าแบบใดเร็วกว่า

$n^2$  จำนวนการทำงานของคำสั่ง : มากกว่า  
คำสั่งตัวแทน : ใช้เวลาน้อยกว่า

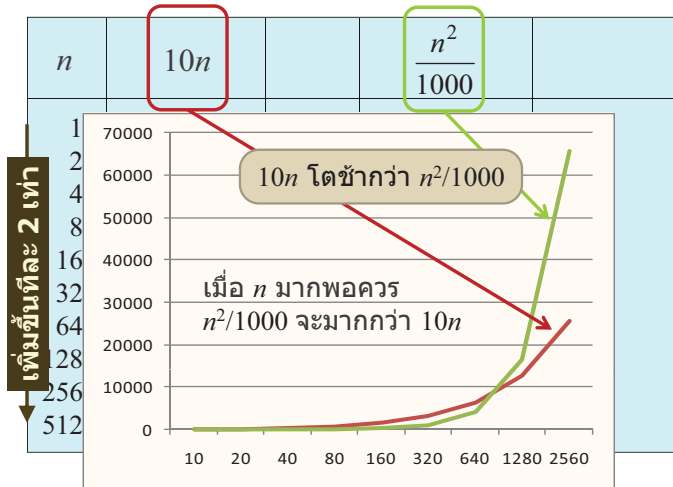
```
for (i = 1; i <= n; i++)
    for (j = 1; j <= n; j++)
        sum += j;
```

## เปรียบเทียบอัตราการเติบโต

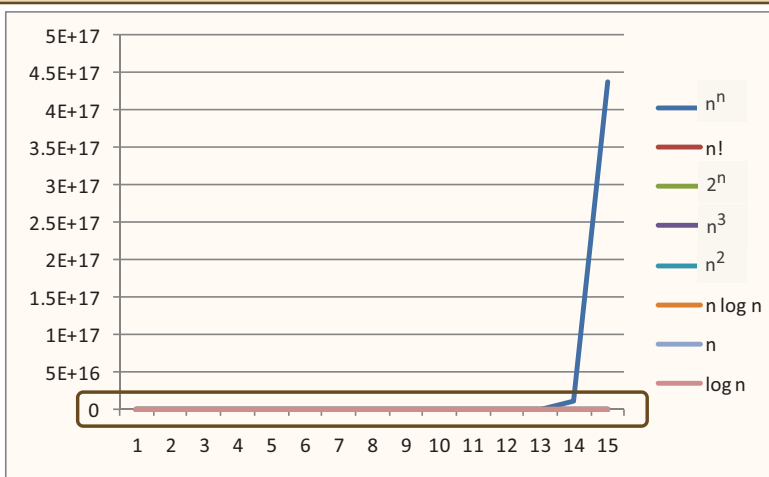
$n$	$n^2$		$\frac{n^2}{2} - \frac{n}{2}$	
10	100		45	
20	400	4 เท่า	190	4.22 เท่า
40	1600	4 เท่า	780	4.11 เท่า
80	6400	4 เท่า	3160	4.05 เท่า
160	25600	4 เท่า	12720	4.03 เท่า
320	102400	4 เท่า	51040	4.01 เท่า
640	409600	4 เท่า	204480	4.01 เท่า
1280	1638400	4 เท่า	818560	4.00 เท่า

สรุปได้ว่าทั้งคู่  
มีอัตราการเติบโตเท่ากัน

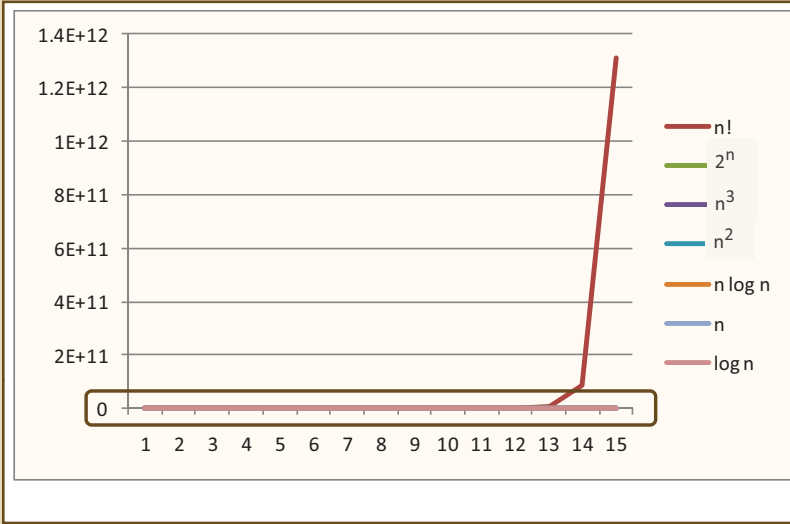
## เปรียบเทียบอัตราการเติบโต



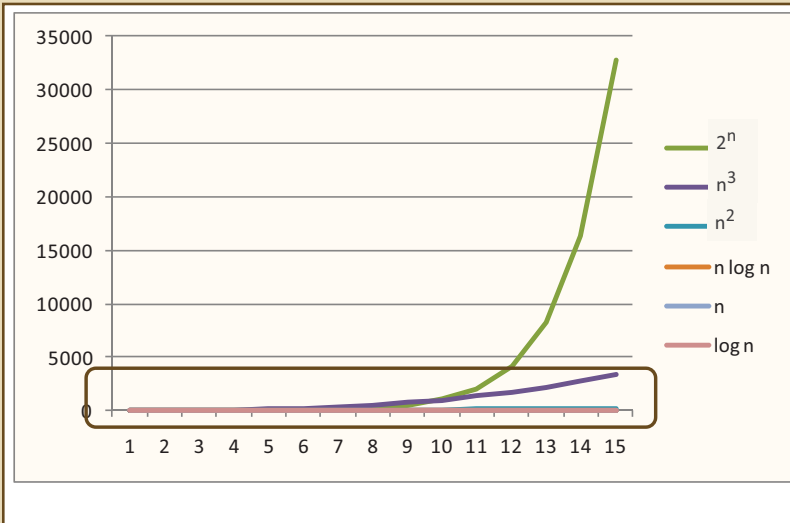
## อัตราการเติบโต



# อัตราการเติบโต

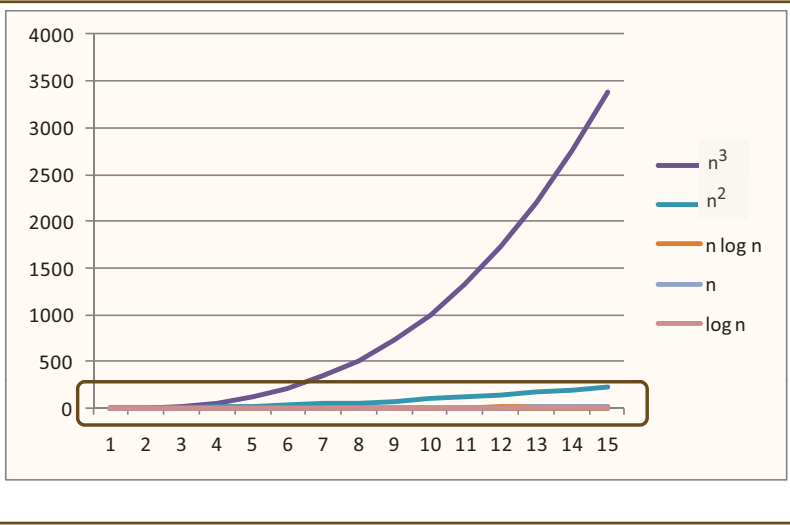


# อัตราการเติบโต

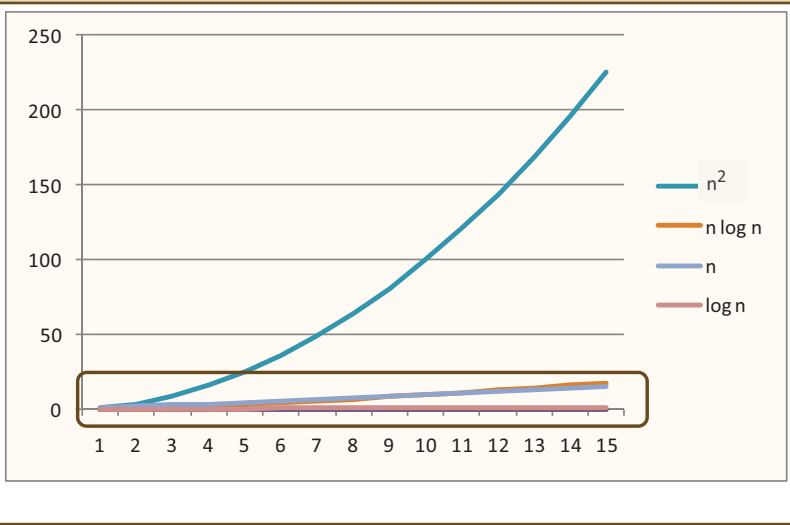




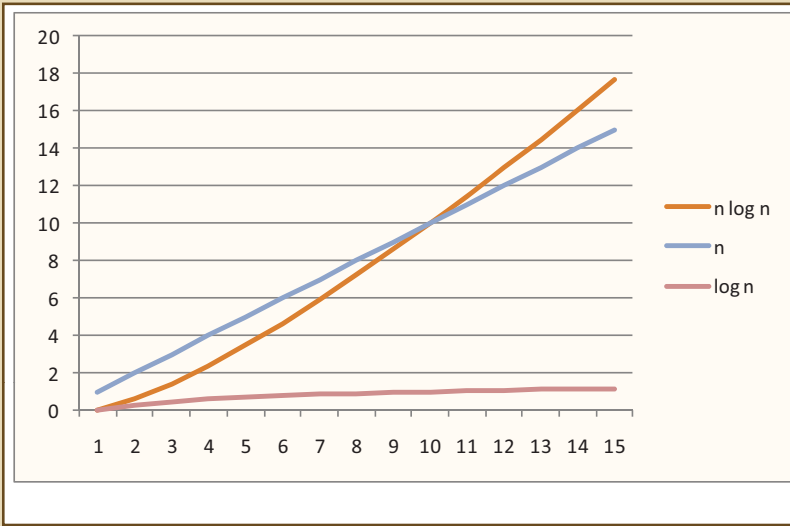
# อัตราการเติบโต



# อัตราการเติบโต



## อัตราการเติบโต



## ทบทวนสูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้บ่อย

$$\sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$S_n = n + (n-1) + \dots + 1$$

$$S_n = 1 + 2 + \dots + n$$

$$2S_n = n(n+1)$$

$$S_n = n(n+1)/2$$

$$\sum_{k=3}^n k = \frac{n(n+1)}{2} - (1+2)$$

## ทบทวนสูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้บ่อย

$$\log ab = \log a + \log b$$

$$\log \frac{a}{b} = \log a - \log b$$

$$\log n^a = a \log n$$

$$a^{\log_b n} = n^{\log_b a}$$

$$\log_b a^{\log_b n} = (\log_b n)(\log_b a) = \log_b n^{\log_b a}$$

$$2^{\log_2 n} = n^{\log_2 2} = n$$

## ทบทวนสูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้บ่อย

จำนวนเต็ม  $n$  หารด้วย 2 (ปัดเศษทิ้ง) ก็ครั้ง จึงจะเท่ากับ 1

$$31 \rightarrow 15 \rightarrow 7 \rightarrow 3 \rightarrow 1$$

$$32 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$$

$$\frac{n}{2^k} = 1 \quad 2^k = n, \quad \log_2 2^k = \log_2 n, \quad k = \lfloor \log_2 n \rfloor$$

จำนวนเต็ม  $n$  หารด้วย 3 (ปัดเศษทิ้ง) ก็ครั้ง จึงจะเท่ากับ 1

$$\lfloor \log_3 n \rfloor$$

จำนวนเต็ม  $n$  หารด้วย 4 (ปัดเศษทิ้ง) ก็ครั้ง จึงจะเท่ากับ 1

$$\lfloor \log_4 n \rfloor$$

## ทบทวนสูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้บ่อย

$$\sum_{k=0}^n x^k = \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1} \quad 2^0 + 2^1 + \dots + 2^n = 2^{n+1} - 1$$

$$\begin{aligned} (x-1) \sum_{k=0}^n x^k &= x \sum_{k=0}^n x^k - \sum_{k=0}^n x^k \\ &= \sum_{k=0}^n x^{k+1} - \sum_{k=0}^n x^k \\ &= \sum_{j=1}^{n+1} x^j - \sum_{k=0}^n x^k \\ &= x^{n+1} - 1 \end{aligned}$$

## ทบทวนสูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้บ่อย

$$\sum_{k=0}^{\infty} x^k = \frac{1}{1-x} \quad |x| < 1$$

$$\sum_{k=0}^n x^k = \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1} \quad \sum_{k=0}^{\infty} x^k = \frac{-1}{x-1} = \frac{1}{1-x}$$

ตัวอย่าง  $1 \leq \sum_{k=0}^n 2^{-k} < \sum_{k=0}^{\infty} 2^{-k} = \frac{1}{1-2^{-1}} = \frac{1}{1-\frac{1}{2}} = 2$

$$1 \leq \sum_{k=0}^n 2^{-k} < 2 \quad 1 \leq \sum_{k=0}^n \frac{1}{3^k} < \frac{3}{2}$$

## สรุปอีกครั้ง

$$a^{\log_b n} = n^{\log_b a}$$

$$\sum_{k=0}^n x^k = \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1}$$

$$\sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} x^k = \frac{1}{1-x}$$

$$|x| < 1$$

$$\log ab = \log a + \log b$$

$$\log \frac{a}{b} = \log a - \log b$$

## f(n) vs. g(n)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = \begin{cases} 0 & f(n) \text{ โตช้ากว่า } g(n) & f(n) \prec g(n) \\ \infty & f(n) \text{ โตเร็วกว่า } g(n) & f(n) \succ g(n) \\ c & f(n) \text{ โตเท่ากับ } g(n) & f(n) \asymp g(n) \end{cases}$$

$c$  คือค่าคงตัวที่ไม่ใช่ 0

$$f(n) \ll g(n)$$

$$f(n) \gg g(n)$$

$$f(n) \text{ โตไม่เร็วกว่า } g(n)$$

$$f(n) \text{ โตไม่ช้ากว่า } g(n)$$

## ตัวอย่าง

$$f(n) = 10n, \quad g(n) = \frac{n^2}{1000}$$

$10n$  โตช้ากว่า  $n^2/1000$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{10n}{\left(\frac{n^2}{1000}\right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{10000}{n} = 0$$

$$f(n) = 2n^2 - 5n, \quad g(n) = 10n^2$$

$2n^2 - 5n$  โตเท่ากับ  $10n^2$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n^2 - 5n}{10n^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{2n^2}{10n^2} - \frac{5n}{10n^2} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{2}{10} - \frac{5}{10n} \right) = \frac{1}{5}$$

## l'Hôpital's Rule

❖ ถ้า  $f(n)$  และ  $g(n)$  เป็นฟังก์ชันที่หาอนุพันธ์ได้ โดยที่

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(n) = \infty, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} g(n) = \infty$$

❖ และหาค่าของ  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f'(n)}{g'(n)}$  ได้

❖ จะได้ว่า  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f'(n)}{g'(n)}$

## ตัวอย่าง

$$f(n) = \log n \quad g(n) = \sqrt{n}$$

$\log n$  โตช้ากว่า  $n^{0.5}$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log n}{\sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\ln 10 \sqrt{n}}$$

สามารถแสดงให้เห็นว่า

$$= \frac{1}{\ln 10} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\sqrt{n}}$$

$(\log n)^{100}$  โตช้ากว่า  $n^{0.005}$

$$= \frac{1}{\ln 10} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1/n}{1/(2\sqrt{n})}$$

$$= \frac{1}{\ln 10} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{\sqrt{n}}$$

$$= 0$$

## ตัวอย่าง

$$\log n \prec \sqrt{n} \prec n \prec n \log n \prec n^2 \prec n^3 \prec 2^n \prec n^n$$

$$\log n^5 = 5 \log n$$

$n!$

$$n^2, \quad 10n^2, \quad 2n^2 - 10n, \quad 5n^2 + 8$$

← มีอัตราการเติบโตเท่ากันหมด →

## สัญกรณ์เชิงเส้นกำกับ

```

selectionSort( d[1..n] ) {
  for (k = n; k > 1; k--) {
    maxI = 1
    for (i = 2; i <= k; i++)
      if (d[i] > d[maxI]) maxI = i
    d[k] ↔ d[maxI]
  }
}

```

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=2}^n \left( \sum_{i=2}^k 1 \right) &= \sum_{k=2}^n (k-1) = \sum_{j=1}^{n-1} j = \frac{n(n-1)}{2} = \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2} \\
 &= \Theta(n^2)
 \end{aligned}$$

Selection sort ใช้เวลาเป็น  $\Theta(n^2)$

## สัญกรณ์เชิงเส้นกำกับ

- ❖ little – o                    o
- ❖ little – omega                ω
- ❖ Big – O                        O
- ❖ Big – Omega                 Ω
- ❖ Big – Theta                 Θ

Asymptotic Notations



**little - o**

$o(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \prec g(n) \}$  โตช้ากว่า

$$n^{0.98} \in o(n)$$

$$10^6 \in o(n)$$

$$\log n \in o(n)$$

**little - omega**

$\omega(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \succ g(n) \}$  โตเร็วกว่า

$$n^{1.001} \in \omega(n)$$

$$n^2 \in \omega(n)$$

$$2^n \in \omega(n)$$

## Big - Theta

$$\Theta(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \asymp g(n) \} \text{ โตเท่ากัน}$$

$$10 \log n \in \Theta(\log n)$$

$$2 + \log n^5 \in \Theta(\log n)$$

$$\ln n \in \Theta(\log n)$$

$$\frac{\log_2 n}{\ln n} = \frac{(\ln n)/(\ln 2)}{\ln n} = \frac{1}{\ln 2}$$

## Big - O

$$O(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \preccurlyeq g(n) \} \text{ โตไม่เร็วกว่า}$$

$$32n^{\ln 3} \in O(n^2) \quad \ln 3 < 1.099$$

$$n^2 + 7n \in O(n^2)$$

$$\log n \in O(n^2)$$

## Big - Omega

$\Omega(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \succcurlyeq g(n) \}$  โตไม่ช้ากว่า

$$10n^3 + 5n \in \Omega(n \log n)$$

$$20n \log n + 2n \in \Omega(n \log n)$$

$$n\sqrt{n} \in \Omega(n \log n)$$

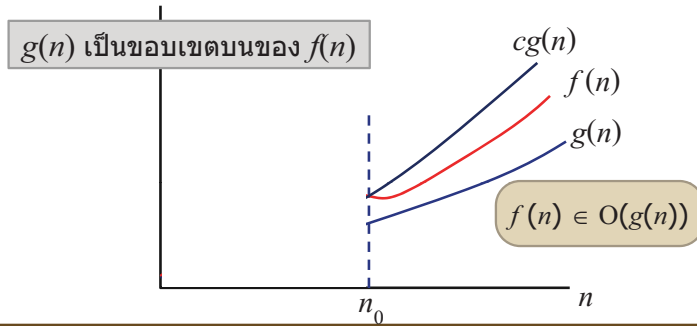
## สัญกรณ์เชิงเส้นกำกับ

- ❖  $o(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) < g(n) \}$  โตช้ากว่า
- ❖  $\omega(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) > g(n) \}$  โตเร็วกว่า
- ❖  $\Theta(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \asymp g(n) \}$  โตเท่ากัน  
 $= O(g(n)) \cap \Omega(g(n))$
- ❖  $O(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \leq g(n) \}$  โตไม่เร็วกว่า  
 $= o(g(n)) \cup \Theta(g(n))$
- ❖  $\Omega(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \geq g(n) \}$  โตไม่ช้ากว่า  
 $= \omega(g(n)) \cup \Theta(g(n))$

## Big - O : ขอบเขตบน

❖  $O(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \leq g(n) \}$

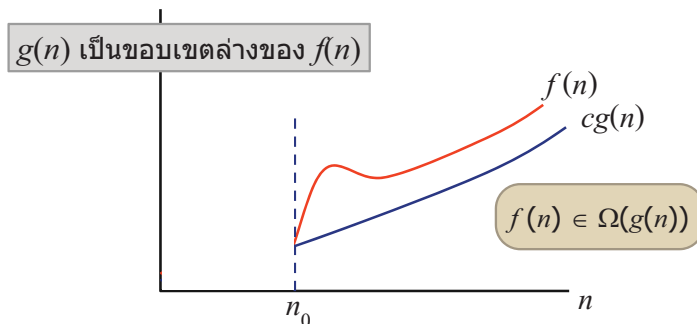
❖  $O(g(n)) = \{ f(n) \mid \text{มีจำนวน } c > 0 \text{ และ } n_0 \geq 0$   
 ที่ทำให้  $f(n) \leq cg(n)$  เมื่อ  $n \geq n_0 \}$



## Big - Omega : ขอบเขตล่าง

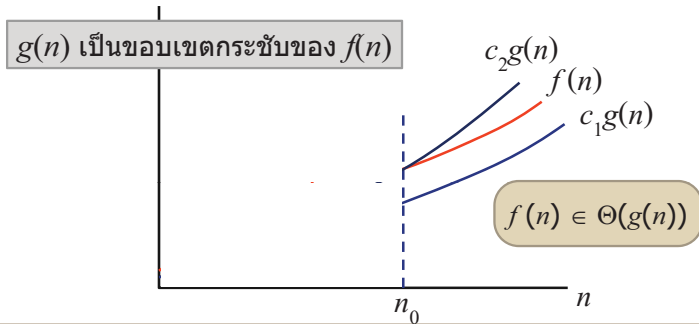
❖  $\Omega(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \geq g(n) \}$

❖  $\Omega(g(n)) = \{ f(n) \mid \text{มีจำนวน } c > 0 \text{ และ } n_0 \geq 0$   
 ที่ทำให้  $f(n) \geq cg(n)$  เมื่อ  $n \geq n_0 \}$



## Big - Theta : ขอบเขตกระชับ

- ❖  $\Theta(g(n)) = \{ f(n) \mid f(n) \asymp g(n) \}$
- ❖  $\Theta(g(n)) = \{ f(n) \mid \text{มีจำนวน } c_1, c_2 > 0 \text{ และ } n_0 \geq 0$   
 ที่ทำให้  $c_1g(n) \leq f(n) \leq c_2g(n)$  เมื่อ  $n \geq n_0 \}$



## สัญกรณ์เชิงเส้นกำกับ

- ❖ เข้าใจพฤติกรรมเมื่อพารามิเตอร์มีค่ามาก

- ❖  $5n^3 - 2n^2 - n \log n + 7 \in \Theta(n^3)$

- ❖ วิเคราะห์ได้ง่าย

- ❖  $\sum_{i=3}^{n-4} \sum_{j=i+2}^n 1 < \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n 1 = \sum_{i=1}^n n = n^2 = O(n^2)$

- ❖ จัดกลุ่มฟังก์ชันตามอัตราการเติบโต

- ❖  $\Theta(1), O(\log n), \Omega(n), \dots$

## วิเคราะห์ง่ายขั้นด้วย $O, \Omega, \Theta$

จงแสดงว่า  $\sum_{i=1}^n \left(\frac{i}{2}\right)^k = \Theta(n^{k+1})$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(\frac{i}{2}\right)^k &< \sum_{i=1}^n \left(\frac{n}{2}\right)^k \\ &< \sum_{i=1}^n n^k \\ &= n^{k+1} \\ &\in O(n^{k+1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(\frac{i}{2}\right)^k &> \sum_{i=1}^{\lceil n/4 \rceil} \left(\frac{n/2}{2}\right)^k \\ &= \sum_{i=1}^{\lceil n/4 \rceil} \left(\frac{n}{4}\right)^k \\ &> \left(\frac{n}{4}\right)^{k+1} \\ &\in \Omega(n^{k+1}) \end{aligned}$$

## ตัวอย่าง

จงแสดงว่า  $\sum_{h=0}^{\lfloor \log_2 n \rfloor} \left(\frac{n}{2^h} h\right) = O(n)$

$$\sum_{h=0}^{\lfloor \log_2 n \rfloor} \left(\frac{n}{2^h} h\right) = n \sum_{h=0}^{\lfloor \log_2 n \rfloor} \left(\frac{h}{2^h}\right)$$

$$\sum_{h=0}^{\infty} x^h = 1 + x + x^2 + \dots = \frac{1}{1-x} < n \sum_{h=0}^{\infty} \left(\frac{h}{2^h}\right)$$

$$\sum_{h=0}^{\infty} hx^{h-1} = \frac{1}{(1-x)^2} = 2n \in O(n)$$

$$\sum_{h=0}^{\infty} hx^h = \frac{x}{(1-x)^2} \quad \sum_{h=0}^{\infty} h\left(\frac{1}{2}\right)^h = \frac{1/2}{(1-1/2)^2} = \frac{1/2}{(1/2)^2} = 2$$

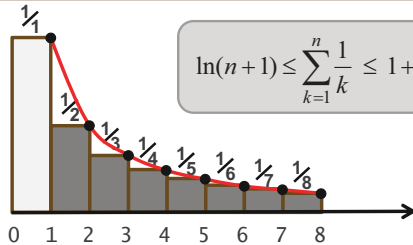
## ตัวอย่าง : $\log_2 n!$

$$\begin{aligned}
 n! &= n \times (n-1) \times \dots \times 2 \times 1 \\
 \text{ขอบเขตบน} \quad &\leq n \times n \times \dots \times n \times n = n^n \\
 \text{บน} \quad \log_2 n! &\leq \log_2 n^n = n \log_2 n \quad \text{เมื่อ } n \geq 1 \\
 \hline
 n! &= n \times (n-1) \times \dots \times (n/2) \times (n/2-1) \times \dots \times 2 \times 1 \\
 \text{ขอบเขตล่าง} \quad &\geq n/2 \times n/2 \times \dots \times n/2 \times 1 \times \dots \times 1 \times 1 \\
 &\geq (n/2)^{n/2} \\
 \log_2 n! &\geq (n/2) \log_2 (n/2) \\
 &= (n/2) \log_2 n - (n/2) \\
 &\geq 0.4n \log_2 n \quad \text{เมื่อ } n \geq 2^5
 \end{aligned}$$

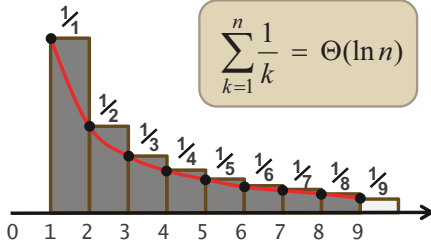
$$0.4n \log_2 n \leq \log_2 n! \leq n \log_2 n \quad \text{เมื่อ } n \geq 2^5$$

$$\log_2 n! \in \Theta(n \log n)$$

## Harmonic Number : $H_n = \sum 1/k$



$$\begin{aligned}
 \sum_{k=2}^8 \frac{1}{k} &\leq \int_1^8 \frac{1}{x} dx \\
 1 + \sum_{k=2}^8 \frac{1}{k} &\leq 1 + \int_1^8 \frac{1}{x} dx \\
 \sum_{k=1}^8 \frac{1}{k} &\leq 1 + \ln 8
 \end{aligned}$$



$$\ln 9 \leq \sum_{k=1}^8 \frac{1}{k} \leq 1 + \ln 8$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=1}^8 \frac{1}{k} &\geq \int_1^9 \frac{1}{x} dx \\
 \sum_{k=1}^8 \frac{1}{k} &\geq \ln 9
 \end{aligned}$$

## การเขียนฟังก์ชันในรูปของ $O$ , $\Theta$ แบบง่าย ๆ

- ❖ ผลบวกของพจน์หลายพจน์ เลือกพจน์ที่ **โตเร็วสุด**
- ❖ ข้อสังเกต
  - ❖  $cg(n) = \Theta(g(n))$  เมื่อ  $c$  เป็นค่าคงตัว
  - ❖  $\log_a n = \Theta(\log_b n)$  เพราะ  $\log_a n = (\log_a b) \log_b n$
  - ❖  $\cdot \sum \Theta(t(n)) = \Theta\left(\sum t(n)\right)$
- ❖ เช่น
  - ❖  $a_k n^k + a_{k-1} n^{k-1} + \dots + a_0 = \Theta(n^k)$
  - ❖  $0.001n^3 + 7000n^2 - 11 = \Theta(n^3)$
  - ❖  $\log_2 n^{10} = 10(\log_2 n) = \Theta(\log n)$
  - ❖  $\cdot \sum_{i=1}^n \Theta(i) = \Theta\left(\sum_{i=1}^n i\right) = \Theta(n(n+1)/2) = \Theta(n^2)$

## อัตราการเติบโต

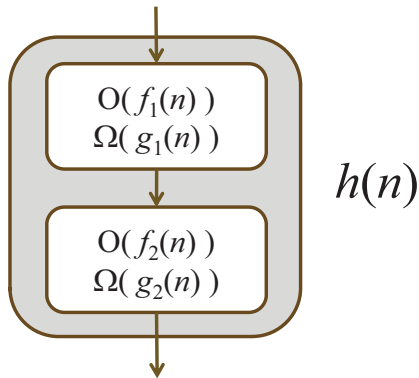
- ❖ **constant** :  $\Theta(1)$
- ❖ **logarithmic** :  $\Theta(\log n)$
- ❖ **polylogarithmic** :  $\Theta(\log^c n)$ ,  $c \geq 1$
- ❖ **sublinear** :  $\Theta(n^a)$ ,  $0 < a < 1$
- ❖ **linear** :  $\Theta(n)$
- ❖ **quadratic** :  $\Theta(n^2)$
- ❖ **polynomial** :  $\Theta(n^c)$ ,  $c \geq 1$
- ❖ **exponential** :  $\Theta(c^n)$ ,  $c > 1$



## การวิเคราะห์อัลกอริทึม

การทำงานแบบลำดับ  
การเลือกทำ  
การทำงานแบบวงวน  
การทำงานแบบเรียกซ้ำ

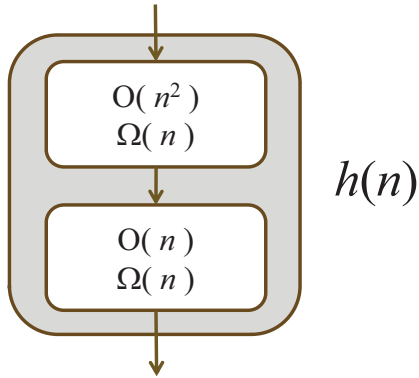
## การทำงานแบบลำดับ



$$h(n) \in O(f_1(n) + f_2(n))$$

$$h(n) \in \Omega(g_1(n) + g_2(n))$$

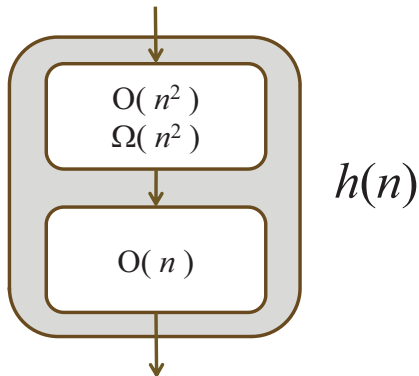
## การทำงานแบบลำดับ



$$h(n) \in O(n^2 + n) = O(n^2)$$

$$h(n) \in \Omega(n + n) = \Omega(n)$$

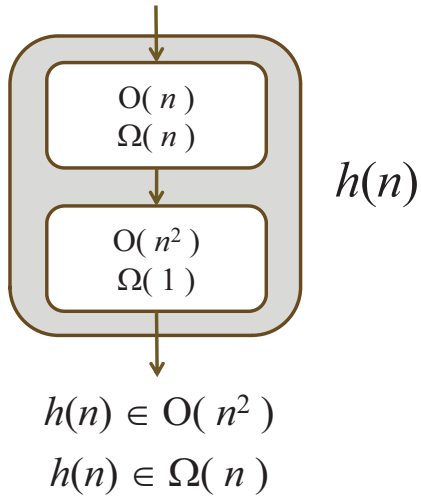
## การทำงานแบบลำดับ



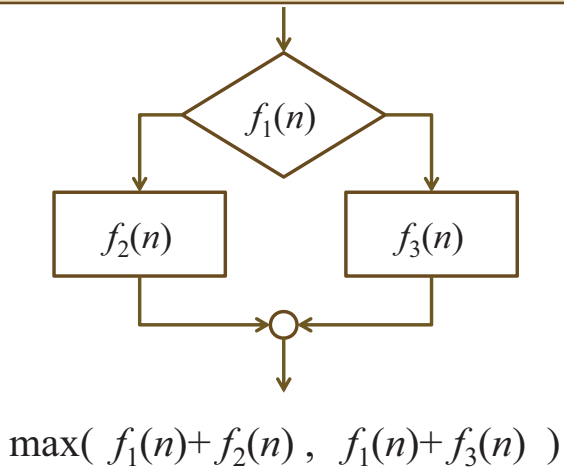
$$h(n) \in O(n^2)$$

$$h(n) \in \Omega(n^2)$$

## การทำงานแบบลำดับ



## การเลือกทำ



## การทำงานแบบวงวน

```
for (k = 1; k <= n; k++) {
  P(k)
}
```

P(k) ใช้เวลา  $t(k)$

$$\sum_{k=1}^n t(k)$$

## ตัวอย่าง : for

```
for (k = 1; k <= n; k++) {
  process( d, k )
}
```

process(d, k) ใช้เวลา  $\Theta(k^2)$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \Theta(k^2) &= \Theta\left(\sum_{k=1}^n k^2\right) \\ &= \Theta\left(\frac{n(n+1)(2n+1)}{6}\right) \\ &= \Theta(n^3) \end{aligned}$$

## ตัวอย่าง : for

```
for (i = 1; i <= n; i++)
  for (j = 1; j <= n; j++)
    sum += d[i][j]
```

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Theta(1) &= \sum_{i=1}^n \Theta(n) \\ &= \Theta\left(\sum_{i=1}^n n\right) \\ &= \Theta(n^2) \end{aligned}$$

## ตัวอย่าง : for

```
for (i = 1; i <= n; i++)
  for (j = 1; j <= i; j++)
    sum += d[i][j]
```

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \Theta(1) &= \sum_{i=1}^n \Theta(i) \\ &= \Theta\left(\sum_{i=1}^n i\right) \\ &= \Theta\left(\frac{n(n+1)}{2}\right) \\ &= \Theta(n^2) \end{aligned}$$

## ตัวอย่าง : for

```
for (i = 2; i <= m-1; i++)
    for (j = 3; j <= i; j++)
        sum += d[i][j]
```

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{j=3}^i \Theta(1) &= \sum_{i=2}^{m-1} \Theta(i) \\ &= \Theta\left(\sum_{i=2}^{m-1} i\right) \\ &= \Theta\left(\left(\sum_{i=1}^m i\right) + \Theta(m)\right) \\ &= \Theta(m^2 + \Theta(m)) = \Theta(m^2) \end{aligned}$$

## ตัวอย่าง : Insertion Sort

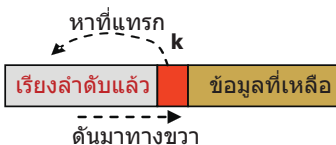
```
insertionSort( d[1..n] ) {
    for (k = 2; k <= n; k++) {
        t = d[k]
        for (j = k-1; j >= 1; j--) {
            if (t >= d[j]) break
            d[j+1] = d[j]
        }
        d[j+1] = t
    }
}
```

⇒ Ω(n)

$$\sum_{k=2}^n O(k)$$



O(n<sup>2</sup>)



4, 1, 3, 2, 5  
 1, 4, 3, 2, 5  
 1, 3, 4, 2, 5  
 1, 2, 3, 4, 5  
 1, 2, 3, 4, 5

## ตัวอย่าง : while

```

log10( n ) {
  c = 0
  while ( n > 1 ) {
    n = n / 3
    c++
  }
  return c
}

```

$\Theta(\log n)$

$$\frac{n}{10^{\log_{10} n}} = 1$$

```

i = 0, j = n
while ( i < j ) {
  i += 4
  j -= 7
}

```

$\Theta(n)$

## ตัวอย่าง : Binary Search

```

binarySearch( d[1..n], x ) {
  left = 1, right = n
  while ( left <= right ) {
    mid = ⌊(left + right) / 2⌋
    if ( x = d[mid] ) return mid
    if ( x < d[mid] )
      right = mid - 1
    else
      left = mid + 1
  }
  return -1;
}

```

$O(\log n)$

1000  
500  
125  
62  
31  
15  
7  
3  
1  
0

$$\frac{n}{2^{\lceil \log_2 n \rceil}} = 1$$

right - left + 1 คือจำนวนข้อมูลในช่วงที่สนใจค้น  
ค่าของ right - left + 1 คือ n ในรอบแรก ลดลง**รอบละครึ่ง**

## ตัวอย่าง : GCD

ถ้า  $a > b$   
สามารถแสดงว่า  
 $a \bmod b < a/2$   
เสมอ

แสดงว่า ทำงาน  
เป็น  $O(\log n)$

```
gcd(a, b) {
    while (b > 0) {
        t = a mod b
        a = b
        b = t
    }
    return a
}
```

a	b
34	21
21	13
13	8
8	5
5	3
3	2
2	1
1	0

ให้  $a > b$

- ถ้า  $b \leq a/2$ , จะได้  $a \bmod b < a/2$  (เพราะ  $a \bmod b < b$ )
- ถ้า  $b > a/2$ , จะได้  $a/b < 2$  ดังนั้น  $\lfloor a/b \rfloor = 1$   
 $a \bmod b = a - b \lfloor a/b \rfloor = a - b$   
 $< a - a/2 = a/2$

## การทำงานแบบเรียกซ้ำ

```
recursive( ... ) {
    if ( ... ) return ...
    ...
    recursive( ... )
    recursive( ... )
    ...
}
```

$\Theta(\dots)$

$t(\dots) +$   
 $\dots +$   
 $t(\dots)$

$$t(n) = t(\dots) + \dots + t(\dots) + \Theta(\dots)$$



## ตัวอย่าง : การค้นแบบทวิภาค

```

bsearch( d[1..n], x, left, right ) {
  if (left > right) return -1
  mid = ⌊(left + right) / 2⌋
  if (x = d[mid]) return mid
  if (x < d[mid])
    return bsearch( d, x, left, mid - 1)
  else
    return bsearch( d, x, mid + 1, right )
}

```

ให้  $m = \text{right} - \text{left} + 1$  คือจำนวนข้อมูลในช่วงที่ต้องการค้น  
ให้  $t(m)$  แทนเวลาการทำงานในการเรียก bsearch ที่ช่วงข้อมูล  
ที่ต้องการค้นมีจำนวน  $m$  ตัว จะได้ว่า

$$t(m) = t(m/2) + \Theta(1), \quad t(0) = \Theta(1)$$

$$t(m) = t(m/2) + \Theta(1)$$

$$t(m) = t\left(\frac{m}{2}\right) + \Theta(1)$$

$$t\left(\frac{m}{2}\right) = t\left(\frac{m}{2^2}\right) + \Theta(1)$$

$$t\left(\frac{m}{2^2}\right) = t\left(\frac{m}{2^3}\right) + \Theta(1)$$

...

$$t\left(\frac{m}{2^{k-1}}\right) = t\left(\frac{m}{2^k}\right) + \Theta(1)$$

$$\Theta(1)$$

$$\frac{m}{2^{k-1}} = 1$$

$$m = 2^{k-1}$$

$$k = 1 + \log_2 m$$

$$(2 + \log_2 m)\Theta(1)$$

$$t(m) = \Theta(\log m)$$

กรณีหาไม่พบ

กรณีทั่วไป binary search

$$t(m) = O(\log m)$$

## ตัวอย่าง : Tower of Hanoi

```

hanoi(n, a, b, c) {
  if (n == 0) return
  hanoi(n - 1, a, c, b)
  print("move ", n, a, "->", c)
  hanoi(n - 1, b, a, c)
}

```

ให้  $t(n)$  แทนเวลาการทำงานของ `hanoi(n, a, b, c)` จะได้ว่า

$$t(n) = 2t(n-1) + \Theta(1), \quad t(0) = \Theta(1)$$

$$t(n) = \Theta(2^n)$$

## $t(n) = 2t(n-1) + \Theta(1)$

$$\begin{aligned}
 t(n) &= 2t(n-1) + \Theta(1) \\
 &= 2(2t(n-2) + \Theta(1)) + \Theta(1) \\
 &= 4t(n-2) + 2\Theta(1) + \Theta(1) \\
 &= 4(2t(n-3) + \Theta(1)) + 2\Theta(1) + \Theta(1) \\
 &= 8t(n-3) + 4\Theta(1) + 2\Theta(1) + \Theta(1) \\
 &= 2^3t(n-3) + 2^2\Theta(1) + 2^1\Theta(1) + 2^0\Theta(1) \\
 &\dots \\
 &= 2^nt(n-n) + \dots + 2^2\Theta(1) + 2^1\Theta(1) + 2^0\Theta(1) \\
 &= (2^n + \dots + 2^2 + 2^1 + 2^0) \Theta(1) \\
 &= (2^{n+1} - 1) \Theta(1) \\
 &= \Theta(2^n)
 \end{aligned}$$

## ภาวะจริงกับการเรียกซ้ำ

```

DQ( n ) {
    if ( n = 0 ) return
    for ( i=1; i<=n; i++)
        for ( j=1; j<=n; j++)
            print( i )
    for ( i=1; i<=2; i++)
        DQ( n/2 )
}
    
```

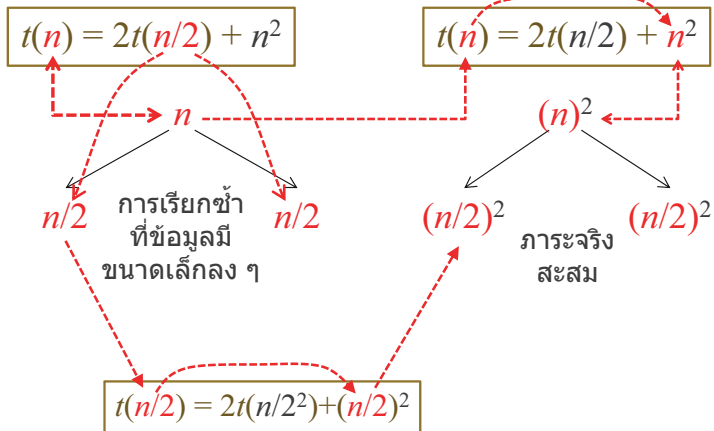
ภาวะจริง

การเรียกซ้ำ

$$t(n) = 2t(n/2) + n^2$$

↑ แทนการเรียกซ้ำ
 ← แทนภาวะจริง

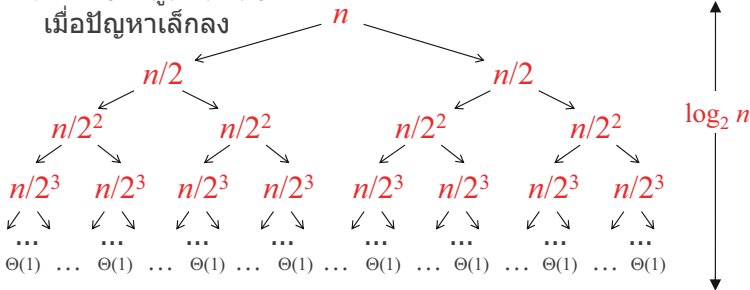
## ขนาดข้อมูลกับภาวะจริง



## ขนาดของข้อมูลลดลง ๆ

$$t(n) = 2t(n/2) + n^2$$

ขนาดของข้อมูลที่ลดลง  
เมื่อปัญหาเล็กลง



$$t(n/2) = 2t(n/4) + (n/2)^2$$

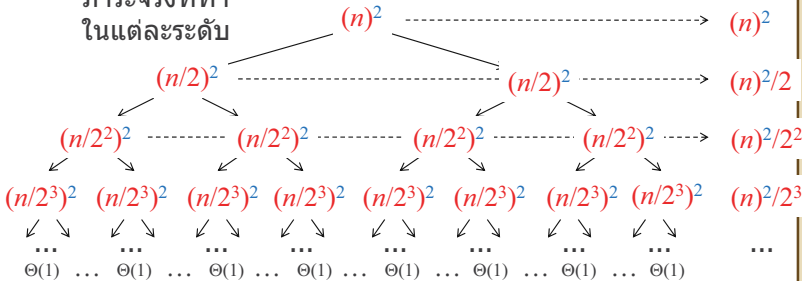
$$t(n/4) = 2t(n/8) + (n/4)^2$$

...

## Recursion Tree : ต้นไม้แสดงภาวะจริง

$$t(n) = 2t(n/2) + n^2$$

ภาวะจริงที่ทำ  
ในแต่ละระดับ



$$\sum_{k=0}^{\infty} x^k = \frac{1}{1-x}$$

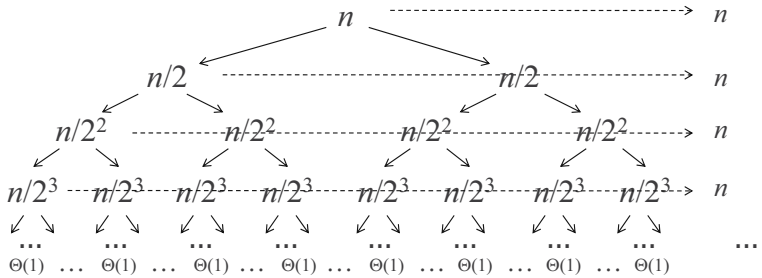
$$\sum_{k=0}^{\log_2 n} \frac{n^2}{2^k} = n^2 \sum_{k=0}^{\log_2 n} \frac{1}{2^k}$$

$1 \leq \dots < 2$

$$\Theta(n^2)$$

## Recursion Tree : ตัวอย่าง

$$t(n) = 2t(n/2) + n$$



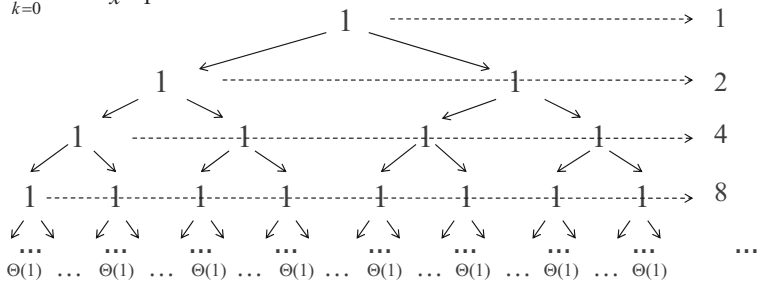
$$\sum_{k=0}^{\log_2 n} n = n \log_2 n$$

$$\Theta(n \log n)$$

## Recursion Tree : ตัวอย่าง

$$\sum_{k=0}^n x^k = \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1}$$

$$t(n) = 2t(n/2) + 1$$

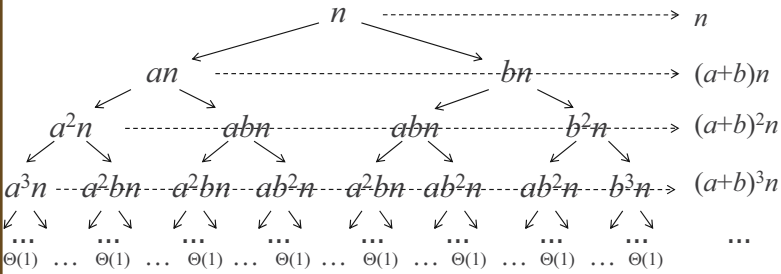


$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{\log_2 n} 2^k &= 2^0 + 2^1 + \dots + 2^{\log_2 n} \\ &= 2^{1+\log_2 n} - 1 = 2 \cdot 2^{\log_2 n} - 1 \\ &= 2n - 1 \end{aligned}$$

$$\Theta(n)$$

# Recursion Tree : ตัวอย่าง

$$t(n) = t(an) + t(bn) + n \quad (a+b) < 1$$



$$\sum_{k=0}^{\log n} (a+b)^k n = n \sum_{k=0}^{\log n} (a+b)^k \quad \Theta(n)$$

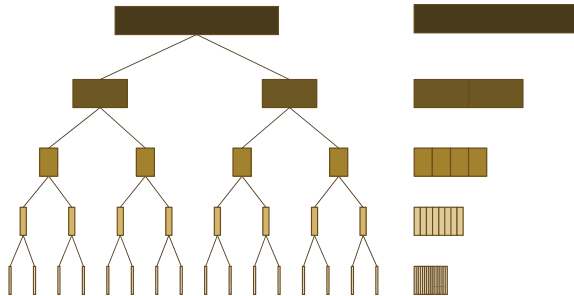
$$\sum_{k=0}^{\infty} x^k = \frac{1}{1-x}$$

$$1 \leq \frac{1}{1-(a+b)}$$

## T(n) = 2T(n/3) + n

3

ภาระจริง  
มากกว่า  
การเรียกซ้ำ



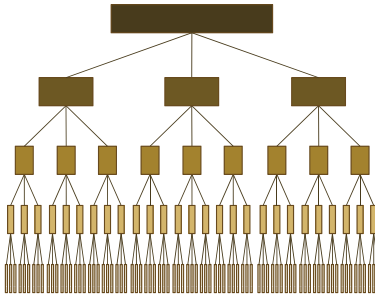
$$n \sum_{k=0}^{\log n} \left(\frac{2}{3}\right)^k < n \left(\frac{1}{1-2/3}\right) = 3n = \Theta(n)$$



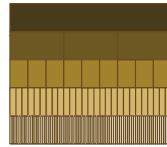
$$T(n) = 3T(n/3) + n$$

2

ภาระจริง  
เท่ากับ  
การเรียกซ้ำ



$$\sum_{k=0}^{\log_3 n} n = n \log_3 n = \Theta(n \log n)$$

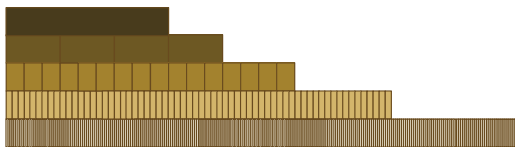


$$T(n) = 4T(n/3) + n$$

$$\begin{aligned} n \sum_{k=0}^{\log_3 n} \left(\frac{4}{3}\right)^k &= n \left( \left(\frac{4}{3}\right)^{1+\log_3 n} - 1 \right) = n \left( \frac{4}{3} \left( \frac{4^{\log_3 n}}{3^{\log_3 n}} \right) - 1 \right) \\ &= n \left( \frac{4}{3} \left( \frac{n^{\log_3 4}}{n} \right) - 1 \right) = \frac{4}{3} n^{\log_3 4} - n \\ &= \Theta(n^{\log_3 4}) \end{aligned}$$

1

ภาระจริง  
น้อยกว่า  
การเรียกซ้ำ



## Master Method (แบบง่าย)

$$t(n) = at(n/b) + \Theta(n^d) \quad a \geq 1, b > 1, d \geq 0$$

$$t(n) = \begin{cases} \Theta(n^c) & \text{if } n^d < n^c \quad \textcircled{1} \\ \Theta(n^c \log n) & \text{if } n^d = n^c \quad \textcircled{2} \\ \Theta(n^d) & \text{if } n^d > n^c \quad \textcircled{3} \end{cases} \quad c = \log_b a$$

← ภาวะจริง  
← การเรียกซ้ำ

$$t(n) = t(n/2) + \Theta(1) \quad c = \log_2 1 = 0 \quad 1 = n^0 \quad \textcircled{2} \rightarrow \Theta(\log n)$$

$$t(n) = 2t(n/2) + n^2 \quad c = \log_2 2 = 1 \quad n^2 > n^1 \quad \textcircled{3} \rightarrow \Theta(n^2)$$

$$t(n) = 2t(n/2) + n \quad c = \log_2 2 = 1 \quad n = n^1 \quad \textcircled{2} \rightarrow \Theta(n \log n)$$

$$t(n) = 4t(n/2) + 1 \quad c = \log_2 4 = 2 \quad 1 < n^2 \quad \textcircled{1} \rightarrow \Theta(n^2)$$

~~$$t(n) = 2t(n-1) + \Theta(1) \quad t(n) = t(an) + t(bn) + n$$~~

## Master Method

$$t(n) = at(n/b) + \Theta(n^d) \quad a \geq 1, b > 1$$

$$t(n) = \begin{cases} \Theta(n^c) & \text{if } n^d < n^c \\ \Theta(n^c \log n) & \text{if } n^d = n^c \\ \Theta(n^d) & \text{if } n^d > n^c \end{cases} \quad c = \log_b a$$

$$t(n) = at(n/b) + f(n)$$

$$t(n) = \begin{cases} \Theta(n^c) & \text{if } f(n) = O(n^{c-\epsilon}) \quad \textcircled{1} \quad \epsilon > 0 \\ \Theta(n^c \log n) & \text{if } f(n) = \Theta(n^c) \quad \textcircled{2} \\ \Theta(f(n)) & \text{if } f(n) = \Omega(n^{c+\epsilon}) \quad \textcircled{3} \\ & a f(n/b) \leq k f(n), k < 1, n \geq n_0 \end{cases}$$



## Master Method : ตัวอย่าง

$$t(n) = at(n/b) + f(n) \quad \begin{matrix} a \geq 1, b > 1, \\ c = \log_b a \end{matrix}$$

$$t(n) = \begin{cases} \Theta(n^c) & \text{if } f(n) = O(n^{c-\varepsilon}) \quad \textcircled{1} \quad \varepsilon > 0 \\ \Theta(n^c \log n) & \text{if } f(n) = \Theta(n^c) \quad \textcircled{2} \\ \Theta(f(n)) & \text{if } f(n) = \Omega(n^{c+\varepsilon}) \quad \textcircled{3} \end{cases}$$

$af(n/b) \leq kf(n), k < 1, n \geq n_0$

$$t(n) = 2t(n/2) + 1 \quad c = \log_2 2 = 1, 1 = O(n^{1-\varepsilon}) \quad \textcircled{1} \rightarrow \Theta(n)$$

$$t(n) = t(n/2) + 1 \quad c = \log_2 1 = 0, 1 = \Theta(n^0) \quad \textcircled{2} \rightarrow \Theta(\log n)$$

$$t(n) = 3t(n/2) + n^2 \quad c = \log_2 3, n^2 = \Omega(n^{(\log_2 3)+\varepsilon}) \quad \log_2 3 < 1.59$$

$$3(n/2)^2 \leq (3/4)n^2, n \geq 0 \quad \textcircled{3} \rightarrow \Theta(n^2)$$

## Master Method : ตัวอย่าง

$$t(n) = at(n/b) + f(n) \quad \begin{matrix} a \geq 1, b > 1, \\ c = \log_b a \end{matrix}$$

$$t(n) = \begin{cases} \Theta(n^c) & \text{if } f(n) = O(n^{c-\varepsilon}) \quad \textcircled{1} \quad \varepsilon > 0 \\ \Theta(n^c \log n) & \text{if } f(n) = \Theta(n^c) \quad \textcircled{2} \\ \Theta(f(n)) & \text{if } f(n) = \Omega(n^{c+\varepsilon}) \quad \textcircled{3} \end{cases}$$

$af(n/b) \leq kf(n), k < 1, n \geq n_0$

$$t(n) = 3t(n/4) + n \log n \quad c = \log_4 3 < 0.793$$

$$n \log n = \Omega(n^{(\log_4 3)+\varepsilon})$$

$$3((n/4) \log (n/4)) \leq (3/4) n \log n, n \geq 0$$

$$\textcircled{3} \rightarrow \Theta(n \log n)$$

# Master Method : ตัวอย่าง

$$t(n) = at(n/b) + f(n)$$

$$a \geq 1, b > 1, \\ c = \log_b a$$

$$t(n) = \begin{cases} \Theta(n^c) & \text{if } f(n) = O(n^{c-\epsilon}) \quad \textcircled{1} \quad \epsilon > 0 \\ \Theta(n^c \log n) & \text{if } f(n) = \Theta(n^c) \quad \textcircled{2} \\ \Theta(f(n)) & \text{if } f(n) = \Omega(n^{c+\epsilon}) \quad \textcircled{3} \\ & a f(n/b) \leq k f(n), k < 1, n \geq n_0 \end{cases}$$

$$t(n) = 2t(n/2) + n \log n \quad c = \log_2 2 = 1$$

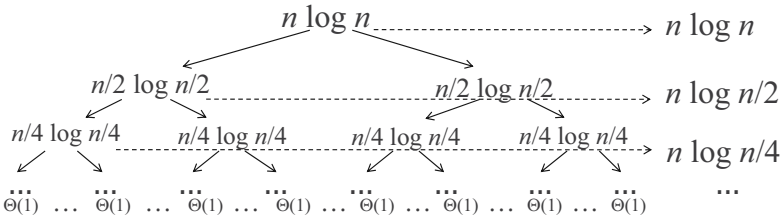
~~$n \log n = O(n^{1-\epsilon})$~~

~~$n \log n = \Theta(n)$~~

~~$n \log n = \Omega(n^{1+\epsilon})$~~   $\log n = o(n^\epsilon)$

ใช้ Master method ไม่ได้ → ใช้วิธีอื่น

## $t(n) = 2t(n/2) + n \log n$



$$\sum_{k=0}^{\lfloor \log_2 n \rfloor} n \log_2 \frac{n}{2^k} = \sum_{k=0}^{\lfloor \log_2 n \rfloor} (n \log_2 n - n \log_2 2^k)$$

$$= \sum_{k=0}^{\lfloor \log_2 n \rfloor} n \log_2 n - \sum_{k=0}^{\lfloor \log_2 n \rfloor} nk$$

$$= n(\log_2 n)^2 - n(1 + 2 + \dots + \lfloor \log_2 n \rfloor)$$

$$= n(\log_2 n)^2 - n(\log_2 n)(\log_2 n + 1)/2$$

$\Theta(n(\log n)^2)$

$\Theta(n \log^2 n)$

## การวิเคราะห์อัลกอริทึม

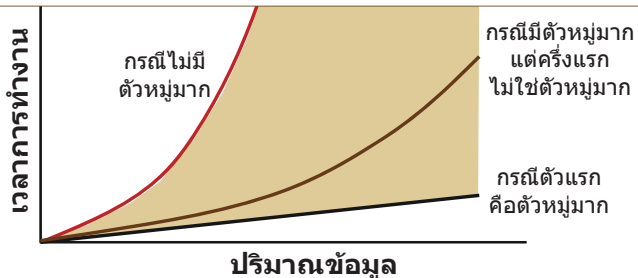
- ❖ เวลาการทำงานของอัลกอริทึม ขึ้นกับ
  - ❖ ปริมาณข้อมูลขาเข้า
    - ❖ ข้ามเมื่อปริมาณมาก เร็วเมื่อปริมาณน้อย
    - ❖ แต่ก็มีอัลกอริทึม ที่ใช้เวลาคงตัวไม่ขึ้นกับปริมาณ
  - ❖ ลักษณะของข้อมูลขาเข้า
    - ❖ ข้อมูลบางลักษณะ ใช้เวลาทำงานมาก
    - ❖ ข้อมูลบางลักษณะ ใช้เวลาทำงานน้อย
    - ❖ แต่ก็มีอัลกอริทึม ที่ลักษณะข้อมูลไม่มีผลต่อเวลาการทำงาน

## การหาตัวหุ้มมาก

```

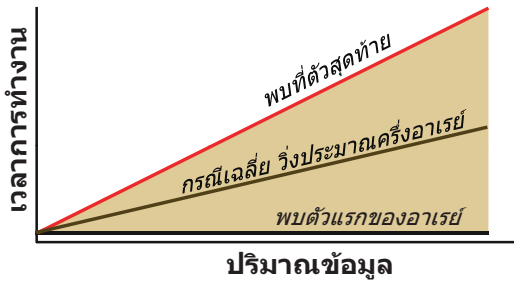
hasMajority( d[1..n] ) {
  for ( i = 1; i <= n; i++ ) {
    c = 0;
    for ( j = 1; j <= n; j++ ) if ( d[i] == d[j] ) c++
    if ( c > n/2 ) return TRUE
  }
  return FALSE
}

```



## เวลาการทำงานขึ้นกับลักษณะข้อมูล

```
seqSearch( d[1..n], x ) {
  for (k = 1; k <= n; k++) {
    if (d[k] = x) return k
  }
  return -1
}
```



## การค้นแบบลำดับ

```
seqSearch( d[1..n], x ) {
  for (k = 1; k <= n; k++) {
    if (d[k] = x) return k
  }
  return -1
}
```

พบที่	d[1]	เปรียบเทียบ	1 ครั้ง
"	d[2]	"	2 ครั้ง
"	⋮	"	⋮
"	d[k]	"	k ครั้ง

มีข้อมูล  $n$  ตัว, ถ้าข้อมูลแต่ละตัวมีโอกาสถูกค้นเท่า ๆ กัน  $\rightarrow 1/n$

$$\text{จำนวนการเปรียบเทียบเฉลี่ย} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{n} k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n k = \frac{1}{n} \left( \frac{n(n+1)}{2} \right) = \frac{n+1}{2}$$

## Insertion Sort : Best Case

```

insertionSort( d[1..n] ) {
  for (k = 2; k <= n; k++) {
    t = d[k]
    for (j = k-1; k >= 1; k--) {
      if (t >= d[j]) break
      d[j+1] = d[j]
    }
    d[j+1] = t
  }
}

```

กรณีเร็วสุด : ข้อมูลเรียงลำดับ ทำ  $k \geq 1$  ครั้งเดียว

$$\sum_{k=2}^n 1 = n - 1 = \Theta(n)$$

## Insertion Sort : Worst Case

```

insertionSort( d[1..n] ) {
  for (k = 2; k <= n; k++) {
    t = d[k]
    for (j = k-1; k >= 1; k--) {
      if (t >= d[j]) break
      d[j+1] = d[j]
    }
    d[j+1] = t
  }
}

```

กรณีช้าสุด : ข้อมูลเรียงกลับลำดับ ทำ  $k \geq 1$   $k$  ครั้ง

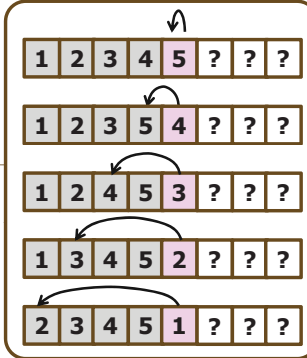
$$\sum_{k=2}^n \sum_{j=0}^{k-1} 1 = \sum_{k=2}^n k = \Theta(n^2)$$

## Insertion Sort : Average Case

```
insertionSort( d[1..n] ) {
    for (k = 2; k <= n; k++) {
        t = d[k]
        for (j = k-1; k >= 1; k--) {
            if (t >= d[j]) break
        }
    }
}
```

กรณีเฉลี่ย: ทำ  $k \geq 1$  1,2, ...,  $k$  ครั้ง  
ด้วยความน่าจะเป็น  $1/k$  ในแต่ละกรณี

$$\begin{aligned} \sum_{k=2}^n \left( \frac{1}{k} (1+2+\dots+k) \right) &= \sum_{k=2}^n \left( \frac{1}{k} \frac{k(k+1)}{2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=2}^n (k+1) = \frac{1}{2} \left( \frac{(n+1)(n+2)}{2} - 3 \right) \\ &= \frac{n^2 + 3n - 4}{4} = \Theta(n^2) \end{aligned}$$



## การหาตัวมากที่สุด

```
max( d[1..n] ) {
    max = d[1]
    for (k = 2; k <= n; k++)
        if (d[k] > max) max = d[k]
    return max
}
```

d เรียงจากน้อยไปมาก  
max เปลี่ยนค่า  $n$  ครั้ง  
d เรียงจากมากไปน้อย  
max เปลี่ยนค่า 1 ครั้ง

ถ้า  $d$  เก็บข้อมูลสุ่ม :

ให้  $C(n)$  แทนจำนวนการเปลี่ยน max เฉลี่ยใน  $d[1..n]$

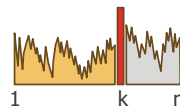
ให้  $C(n,k)$  " " " " " " เมื่อ max คือ  $d[k]$

ถ้า max คือ  $d[k] \rightarrow d[k+1] \dots d[n]$  ไม่มีผลกับ max

$C(n,k)$  ย่อมเท่ากับ #การเปลี่ยน max เพื่อหา max

ใน  $k-1$  ตัวแรก ตามด้วย การเปลี่ยน max อีกครั้ง

เมื่อเปรียบเทียบกับ  $d[k]$   $C(n,k) = C(k-1) + 1$



$$C(n) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{n} C(n,k) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (C(k-1) + 1)$$

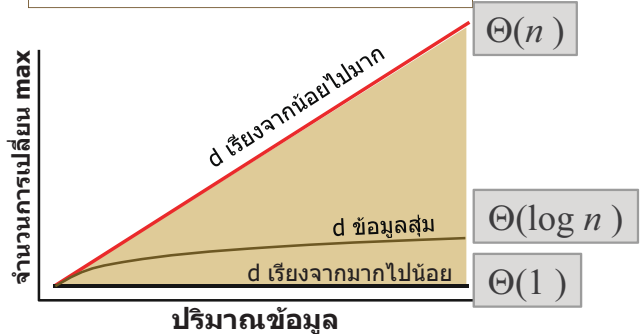
## การหาค่ามากที่สุด

$$\begin{aligned}
 C(n) &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (C(k-1) + 1) \\
 &= \frac{1}{n} (n + C(1) + C(2) + \dots + C(n-1)) \\
 nC(n) &= n + C(1) + C(2) + \dots + C(n-1) \\
 (n-1)C(n-1) &= (n-1) + C(1) + C(2) + \dots + C(n-2) \\
 nC(n) - (n-1)C(n-1) &= 1 + C(n-1) \\
 nC(n) - nC(n-1) &= 1 \\
 C(n) &= \frac{1}{n} + C(n-1) = \frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + C(n-2) \\
 &= \frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \dots + \frac{1}{1} \quad \Theta(\ln n)
 \end{aligned}$$

## การหาค่ามากที่สุด : การเปลี่ยน max

```

max( d[1..n] ) {
    max = d[1]
    for (k = 2; k <= n; k++)
        if (d[k] > max) max = d[k]
    return max
}
    
```







# อัลกอริทึม แบบแบ่งแยกและเอาชนะ

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## หัวข้อ

- ❖ โครงของอัลกอริทึมแบบ Divide & Conquer
- ❖ ตัวอย่าง
  - ❖ Binary search
  - ❖ Modular exponentiation
  - ❖ Karatsuba integer multiplication
  - ❖ Strassen matrix multiplication
  - ❖ Merge sort
  - ❖ Quick sort
  - ❖ Quick select
  - ❖ Closest point
  - ❖ Min + Max
  - ❖ Celebrity problem

## Divide – Conquer – Combine

```

DQ( P ) {
    if ( P is trivial ) return Solve( P )
    Divide P into P1, P2, ..., Pk
    for ( i = 1 to k )
        Si = DQ( Pi )
    S = Combine( S1, S2, ..., Sk )
    return S
}
    
```

## การค้นแบบทวิภาค (binary search)

❖ input :  $x$  และ  $D = \langle d_1, d_2, d_3, \dots, d_n \rangle$   
 $d_1 \leq d_2 \leq d_3 \leq \dots \leq d_n$   
 $x$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง

❖ output : ค่า  $k$  ที่  $d_k = x$  ถ้าหาไม่พบ คืน -1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d	2	3	5	9	11	20	25	39	44	49	52	79

$x = 25$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d	2	3	5	9	11	20	25	39	44	49	52	79

$x = 27$

## Binary Search

```

bsearch( d[1..n], x, left, right ) {
    if (left > right) return -1
    mid = ⌊(left + right) / 2⌋
    if (x == d[mid]) return mid
    if (x < d[mid])
        return bsearch( d, x, left, mid - 1)
    else
        return bsearch( d, x, mid + 1, right )
}

```

ให้  $m = \text{right} - \text{left} + 1$  คือจำนวนข้อมูลในช่วงที่ต้องการค้น  
ให้  $t(m)$  แทนเวลาการทำงานในการเรียก bsearch ที่ช่วงข้อมูล  
ที่ต้องการค้นมีจำนวน  $m$  ตัว จะได้ว่า

$$t(m) = t(m/2) + \Theta(1), \quad t(0) = \Theta(1)$$

$$c = \log_2 1 = 0, \quad 1 = \Theta(m^0) \rightarrow \Theta(\log m)$$

## อย่าสับสน binary search

- ❖ A เป็นอาร์เรย์เก็บข้อมูลแตกต่างกันที่เรียงลำดับแล้ว
- ❖ อยากทราบว่า ช่องใดใน A ที่  $A[k]$  มีค่าเป็น k

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
-4	-3	-1	0	1	2	6	8	11	13	14	19	20	24	26	35	48	49	80	90	92
-4	-3	-1	0	1	2	6	8	11	13											
					2	6	8	11	13											

## อย่าลืมใช้ binary search

- ❖ A เป็นอาเรย์  $n+1$  ช่อง
- ❖ A เก็บจำนวนเต็มมีค่า 1 ถึง  $n$   
ค่าละอย่างน้อย 1 ช่อง (แสดงว่ามีค่าหนึ่งซ้ำ)
- ❖ จงหาว่า ค่าใดซ้ำใน A

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	10	19	15	14	9	13	12	11	8	7	3	4	6	16	17	20	2	5	18	16

↓

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	16	17	18	19	20
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

ลองคิดวิธีที่ใช้ binary search ค้นตัวติดกันเหมือนกัน ?  
ลองคิดวิธีที่ไม่ต้อง sort ข้อมูล ? และหาได้ใน  $O(n)$

## $a^k \bmod m$

- ❖  $a^k \bmod m$  เป็นการคำนวณที่ใช้บ่อยเพื่อเข้ารหัส
- ❖ คำนวณแบบซ้ำ
  - ❖  $a^k \bmod m = a(a^{k-1} \bmod m) \bmod m$

- ❖ คำนวณแบบเร็ว

$$a^k \bmod m = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ (a^{\lfloor k/2 \rfloor} \bmod m)^2 \bmod m & k \text{ is even} \\ a(a^{\lfloor k/2 \rfloor} \bmod m)^2 \bmod m & k \text{ is odd} \end{cases}$$

$$2^{60} \bmod 10 = (2^{30} \bmod 10)^2 \bmod 10$$

$$2^{30} \bmod 10 = (2^{15} \bmod 10)^2 \bmod 10$$

$$2^{15} \bmod 10 = 2(2^7 \bmod 10)^2 \bmod 10$$

$a^k \bmod m$ 

$$\begin{array}{rcl}
 2^{60} & = & (2^{30})^2 = 4^2 = 6 \\
 2^{30} & = & (2^{15})^2 = 8^2 = 4 \\
 2^{15} & = & 2 \times (2^7)^2 = 2 \times 8^2 = 8 \\
 2^7 & = & 2 \times (2^3)^2 = 2 \times 8^2 = 8 \\
 2^3 & = & 2 \times (2^1)^2 = 2 \times 2^2 = 8 \\
 2^1 & = & 2 \times (2^0)^2 = 2 \times 1^2 = 2 \\
 2^0 & = & 1
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{rcl} 2^{60} \\ 2^{30} \\ 2^{15} \\ 2^7 \\ 2^3 \\ 2^1 \\ 2^0 \end{array}} \right\} \text{mod } 10$$

การคำนวณ  $a^k \bmod m$ 

$$a^k \bmod m = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ (a^{\lfloor k/2 \rfloor} \bmod m)^2 \bmod m & k \text{ is even} \\ a(a^{\lfloor k/2 \rfloor} \bmod m)^2 \bmod m & k \text{ is odd} \end{cases}$$

```

powerMod( a, k, m ) {
  if (k == 0) return 1;
  p = powerMod(a, k / 2, m);
  if ( k is even )
    return (p * p) % m;
  else
    return (a * p * p) % m;
}

```

$$\begin{aligned}
 t(k) &= t(k/2) + \Theta(1) \\
 &= \Theta(\log k)
 \end{aligned}$$

## การคูณหารเลขขนาดใหญ่ไม่ใช่ $\Theta(1)$

```
powerMod( a, k, m ) {
  if ( k == 0 ) return 1;
  p = powerMod(a, k / 2, m);
  if ( k is even )
    return (p * p) % m;
  else
    return (a * p * p) % m;
}
```

```
x 011
  110
  ---
  000
  011
  011
  ---
 10010
```

คูณเลข  $\beta$  บิต กับ  $\beta$  บิต ใช้  $\Theta(\beta^2)$

$k$	#bits
256	8
128	7
64	6
...	...

ถ้า  $a, k$ , และ  $m$  เป็นจำนวนขนาด  $\beta$  บิต

$$\begin{aligned}
 t(\beta) &= t(\beta-1) + \Theta(\beta^2) \\
 &= t(\beta-2) + \Theta(\beta^2) + \Theta(\beta^2) \\
 &= t(\beta-3) + \Theta(\beta^2) + \Theta(\beta^2) + \Theta(\beta^2) \\
 &= \sum_{k=1}^{\beta} \Theta(\beta^2) = \Theta\left(\sum_{k=1}^{\beta} \beta^2\right) = \Theta(\beta^3)
 \end{aligned}$$

## การหาค่า Fibonacci

$$f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$$

$$f_0 = 0, f_1 = 1$$

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 370, ...

$$\begin{aligned}
 F &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} & F^{(2)} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} & F^{(3)} &= \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \end{bmatrix} \\
 F^{(4)} &= \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 5 \end{bmatrix} & F^{(5)} &= \begin{bmatrix} 3 & 5 \\ 5 & 8 \end{bmatrix} & & \text{หา } F^n
 \end{aligned}$$

ถ้าการคูณใช้  $\Theta(1)$  :  $T(n) = T(n/2) + \Theta(1) \rightarrow T(n) = \Theta(\log n)$

ถ้าต้องการ  $F_n$  ที่ได้จำนวนขนาดใหญ่ การคูณจะไม่ใช้  $\Theta(1)$  ลองทำดู

# A x B : คุณได้เร็วกว่า $\Theta(n^2)$ ?

$$\begin{array}{r}
 \times 1003 \\
 0410 \\
 \hline
 0000 \\
 1003 \\
 4012 \\
 0000 \\
 \hline
 0411230
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 1003 &= 10 \times 10^2 + 03, & 0410 &= 04 \times 10^2 + 10 \\
 (10 \times 10^2 + 03) \times (04 \times 10^2 + 10) & \\
 &= 10 \times 04 \times 10^4 + (10 \times 10 + 03 \times 04) \times 10^2 + 03 \times 10 \\
 &= 400000 + 11200 + 30 \\
 &= 411230
 \end{aligned}$$

## A x B

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{cc}
 n/2 \text{ digits} & n/2 \text{ digits} \\
 A = & \begin{array}{|c|c|}
 \hline
 A_L & A_R \\
 \hline
 \end{array} \\
 B = & \begin{array}{|c|c|}
 \hline
 B_L & B_R \\
 \hline
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 A \times B &= (A_L 10^{n/2} + A_R) \times (B_L 10^{n/2} + B_R) \\
 &= A_L \times B_L 10^n + (A_L \times B_R + A_R \times B_L) 10^{n/2} + A_R \times B_R
 \end{aligned}$$

$$t(n) = 4t(n/2) + \Theta(n)$$

Master method :  $c = \log_2 4 = 2$ ,

$$n = O(n^{2-\epsilon}) \quad \text{①} \rightarrow t(n) = \Theta(n^2)$$



## A x B (อีกแบบ)

$$1003 = 10 \times 10^2 + 03, \quad 0410 = 04 \times 10^2 + 10$$

$$10 \times 04 = 40$$

$$03 \times 10 = 30$$

$$(10 + 03) \times (04 + 10) = 13 \times 14 = 182$$

$$\begin{aligned} (10 \times 10^2 + 03) \times (04 \times 10^2 + 10) \\ &= 40 \times 10^4 + (182 - 40 - 30) \times 10^2 + 30 \\ &= 400000 + 11200 + 30 \\ &= 411230 \end{aligned}$$

## A x B : Karatsuba (1962)

$$\begin{array}{l} A = \begin{array}{|c|c|} \hline \text{\small } n/2 \text{ digits} & \text{\small } n/2 \text{ digits} \\ \hline A_L & A_R \\ \hline \end{array} \\ B = \begin{array}{|c|c|} \hline B_L & B_R \\ \hline \end{array} \end{array}$$

$$A \times B = A_L \times B_L 10^n + (A_L \times B_R + A_R \times B_L) 10^{n/2} + A_R \times B_R$$

$$C_1 = A_L \times B_L$$

$$C_2 = A_R \times B_R$$

$$C_3 = (A_L + A_R) \times (B_L + B_R) = \cancel{A_L B_L} + \cancel{A_L B_R} + \cancel{A_R B_L} + \cancel{A_R B_R}$$

$$A \times B = C_1 10^n + (C_3 - C_1 - C_2) 10^{n/2} + C_2$$

$$t(n) = 3t(n/2) + \Theta(n)$$

$$\text{Master method : } c = \log_2 3$$

$$n = O(n^{c-\epsilon}) \quad \text{①} \rightarrow t(n) = \Theta(n^{\log_2 3})$$

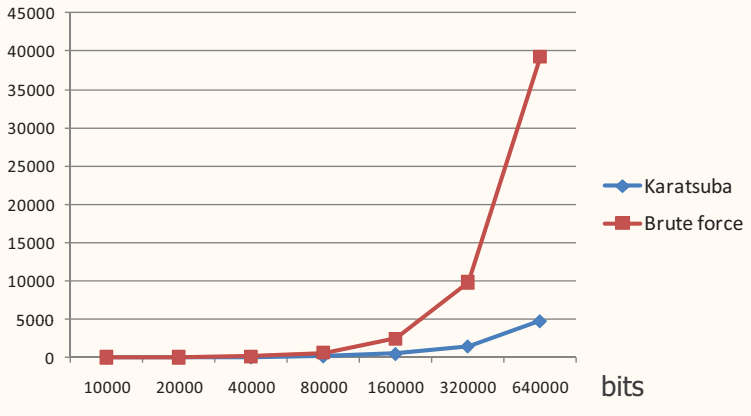


$$O(n^{1.59})$$



## เปรียบเทียบเวลาการทำงาน

mSec. (interpreted-only mode)



## A x B : การคูณเมทริกซ์

```

MatrixMult( A[1..n][1..n], B[1..n][1..n] ){
  C = new array[1..n][1..n]
  for ( i = 1; i <= n; i++ ) {
    for ( j = 1; j <= n; j++ ) {
      C[i][j] = 0
      for ( k = 1; k <= n; k++ ) {
        C[i][j] += A[i][k] * B[k][j]
      }
    }
  }
  return C
}

```

$$c_{i,j} = \sum_{k=1}^n a_{i,k} \cdot b_{k,j}$$

คูณเมทริกซ์ขนาด  $n \times n$  สองตัว ใช้จำนวนการคูณสเกลาร์เป็น  $n^3$

ใช้เวลา  $\Theta(n^3)$

## A x B : Divide & Conquer

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n/2} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \boxed{A_{1,1}} & \vdots & \cdots & \boxed{A_{1,2}} & \vdots \\ a_{n/2,1} & \cdots & a_{n/2,n/2} & \cdots & a_{n/2,n} \\ \vdots & \boxed{A_{2,1}} & \vdots & \cdots & \boxed{A_{2,2}} & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n/2} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix}$$

## A x B : Divide & Conquer

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} \\ C_{2,1} & C_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_{1,1} & B_{1,2} \\ B_{2,1} & B_{2,2} \end{bmatrix}$$

$$C_{1,1} = A_{1,1} \times B_{1,1} + A_{1,2} \times B_{2,1}$$

$$C_{2,1} = A_{2,1} \times B_{1,1} + A_{2,2} \times B_{2,1}$$

$$C_{1,2} = A_{1,1} \times B_{1,2} + A_{1,2} \times B_{2,2}$$

$$C_{2,2} = A_{2,1} \times B_{1,2} + A_{2,2} \times B_{2,2}$$

$$t(n) = 8t(n/2) + \Theta(n^2)$$

$$\text{Master method : } c = \log_2 8 = 3$$

$$n^2 = O(n^{3-\epsilon}) \Rightarrow \Theta(n^3)$$



## A x B : Strassen (1969)

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} \\ C_{2,1} & C_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_{1,1} & B_{1,2} \\ B_{2,1} & B_{2,2} \end{bmatrix}$$

$$M_1 = (A_{12} - A_{22}) \times (B_{21} + B_{22})$$

$$M_2 = (A_{11} + A_{22}) \times (B_{11} + B_{22})$$

$$M_3 = (A_{11} - A_{21}) \times (B_{11} + B_{12})$$

$$M_4 = (A_{11} + A_{12}) \times B_{22}$$

$$M_5 = A_{11} \times (B_{12} - B_{22})$$

$$M_6 = A_{22} \times (B_{21} - B_{11})$$

$$M_7 = (A_{21} + A_{22}) \times B_{11}$$

$$C_{11} = M_1 + M_2 - M_4 + M_6$$

$$C_{12} = M_4 + M_5$$

$$C_{21} = M_8 + M_7$$

$$C_{22} = M_2 - M_3 + M_5 - M_7$$

$$t(n) = 7t(n/2) + \Theta(n^2)$$

Master method :  $c = \log_2 7$

$$n^2 = O(n^{c-\epsilon}) \quad t(n) = \Theta(n^{\log_2 7})$$

1969 :  $O(n^{2.81})$  Strassen

1987 :  $O(n^{2.376})$  Coppersmith-Winograd

## Master Method (ตีความ)

$$t(n) = \begin{cases} \Theta(n^c) & \text{if } f(n) = O(n^{c-\epsilon}) \quad \textcircled{1} \quad \epsilon > 0 \\ \Theta(n^c \log n) & \text{if } f(n) = \Theta(n^c) \quad \textcircled{2} \\ \Theta(f(n)) & \text{if } f(n) = \Omega(n^{c+\epsilon}) \quad \textcircled{3} \end{cases}$$

$a f(n/b) \leq k f(n), k < 1, n \geq n_0$

$$t(n) = at(n/b) + f(n)$$

ภาวะในเรียก recursive เพื่อแก้ปัญหาย่อย

$$\Theta(n^{\log_b a})$$

>

①

>

=

②

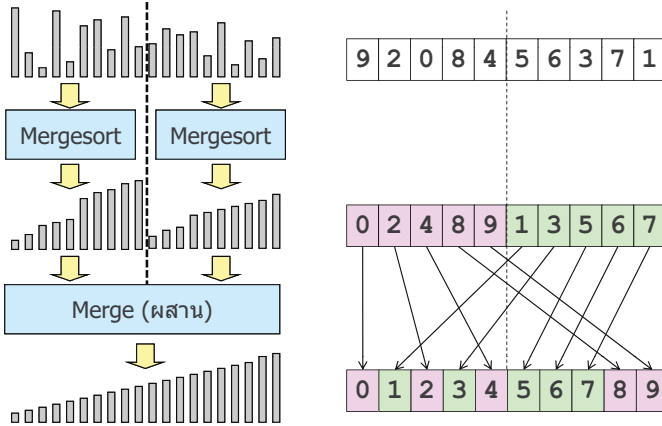
<

③

ภาวะในการแบ่งปัญหา และการรวมคำตอบ

$$f(n)$$

# Merge Sort



# Merge Sort

```
mergeSort( d[1..n], left, right ) {
    if (left >= right) return
    mid = ⌊(left + right) / 2⌋;
    mergeSort(d, left, mid);
    mergeSort(d, mid + 1, right);
    merge(d, left, mid, right);
}
```

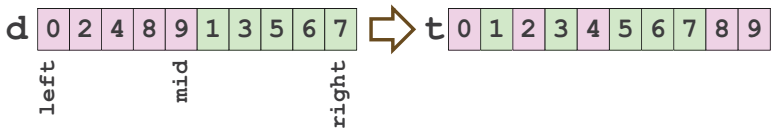
ให้  $t(n)$  คือเวลาในการ mergesort ข้อมูลจำนวน  $n$  ตัว

$$t(n) = 2t(n/2) + (\text{เวลาในการ merge})$$

## Merge : #cmps

```
merge( d[1..n], left, mid, right ) {
  create t[left..right]
  i = left, j = mid+1;
  for (k = left; k <= right; k++) {
    if (i > mid) {t[k] = d[j++]; continue}
    if (j > right) {t[k] = d[i++]; continue}
    t[k] = (d[i] < d[j]) ? d[i++] : d[j++]
  }
  for (k = left; k <= right; k++) d[k] = t[k]
}
```

$$n/2 \leq \#cmps \leq n - 1$$



## Merge Sort : เวลาทำงาน

```
mergeSort( d[1..n], left, right ) {
  if (left >= right) return
  mid =  $\lfloor (left + right) / 2 \rfloor$ ;
  mergeSort(d, left, mid);
  mergeSort(d, mid + 1, right);
  merge(d, left, mid, right);
}
```

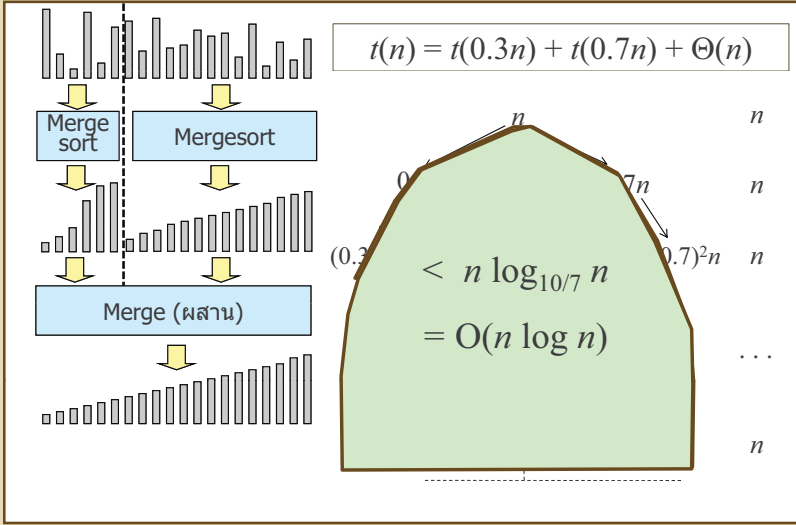
ให้  $t(n)$  คือ เวลา  
ในการ mergesort  
ข้อมูลจำนวน  $n$  ตัว

$$t(n) = 2t(n/2) + \Theta(n)$$

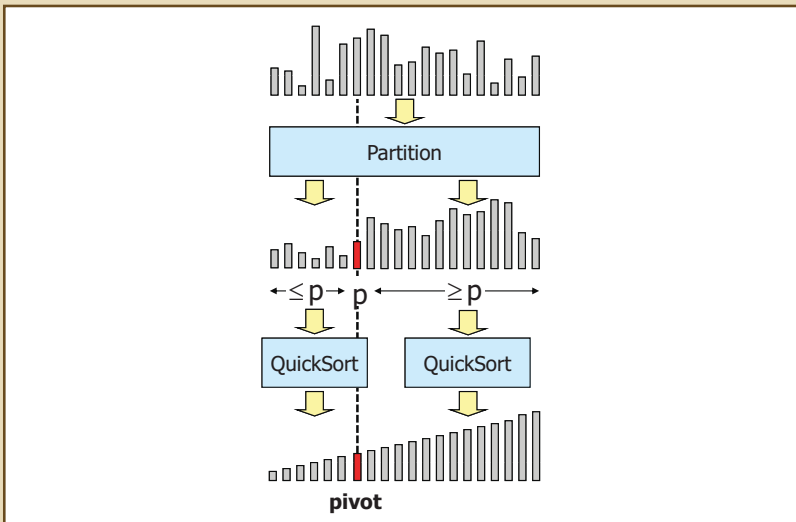
$$\text{master method : } n = \Theta(n^{\log_2 2})$$

$$\text{ได้ } t(n) = \Theta(n \log n)$$

# Merge Sort : ๓๐ - ๗๐



# Quick Sort



## Quick Sort

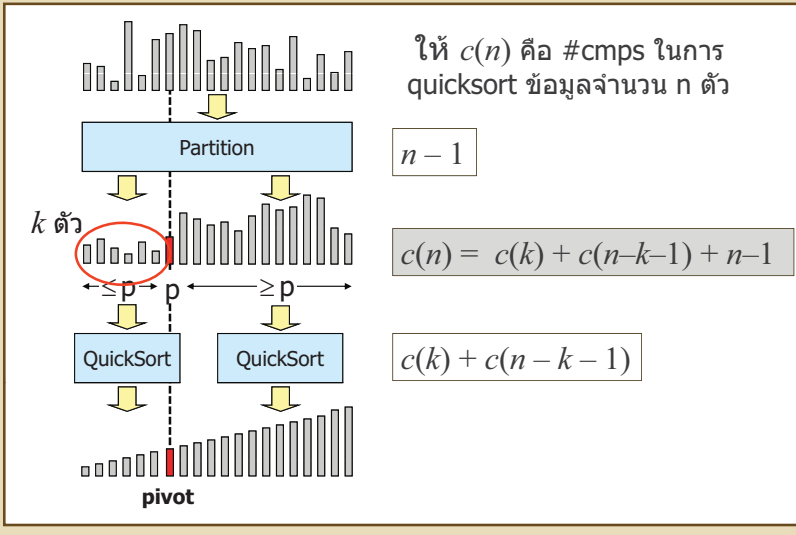
```
quickSort(d[1..n], left, right) {
  if (left >= right) return
  j = partition(d, left, right)
  quickSort(d, left, j - 1)
  quickSort(d, j + 1, right)
}
```

## การแบ่งส่วน (partition)

d	12	5	15	18	0	9	11	52
---	----	---	----	----	---	---	----	----

```
partition( d[1..n], left, right ) {
  p = d[left]
  i = left, j = right + 1
  while (i < j) {
    while (d[--j] > p) ;
    while (d[++i] < p) if (i == right) break
    if (i < j) d[i] ↔ d[j]
  }
  d[left] ↔ d[j]
  return j
}
```

## Quick Sort : วิเคราะห์



## Quick Sort : กรณีเร็วสุด

หลัง partition จำนวนข้อมูลของทั้งสองเท่ากัน

$$c(n) = c(k) + c(n-k-1) + (n-1)$$

$$c_{\min}(n) = c_{\min}(n/2) + c_{\min}(n-n/2-1) + (n-1)$$

$$= 2c_{\min}(n/2) + (n-1)$$

$$= \Theta(n \log n)$$



## Quick Sort : กรณีเข้าสู่

หลัง partition จำนวนข้อมูลของฝั่งซ้ายหรือขวาเป็น 0

$$c(n) = c(k) + c(n - k - 1) + (n - 1)$$

$$c_{max}(n) = c(0) + c_{max}(n - 1) + (n - 1)$$

$$= c_{max}(n - 1) + (n - 1)$$

$$= c_{max}(n - 2) + (n - 2) + (n - 1)$$

...

$$= c_{max}(1) + 1 + 2 + \dots + (n - 2) + (n - 1)$$

$$= n(n - 1)/2$$

$$= \Theta(n^2)$$

## Quick Sort : กรณีเฉลี่ย

$$c(n) = c(k) + c(n - k - 1) + (n - 1)$$

$$c_{avg}(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (c_{avg}(k) + c_{avg}(n - k - 1)) + (n - 1)$$

$$= \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} c_{avg}(k) + (n - 1)$$

$$nc_{avg}(n) = 2 \sum_{k=0}^{n-1} c_{avg}(k) + n(n - 1)$$

$$(n - 1)c_{avg}(n - 1) = 2 \sum_{k=0}^{n-2} c_{avg}(k) + (n - 1)(n - 2)$$

$$nc_{avg}(n) = (n + 1)c_{avg}(n - 1) + 2(n - 1)$$

## Quick Sort : กรณีเฉลี่ย

$$nc_{\text{avg}}(n) = (n+1)c_{\text{avg}}(n-1) + 2(n-1)$$

$$\frac{c_{\text{avg}}(n)}{n+1} = \frac{c_{\text{avg}}(n-1)}{n} + \frac{2(n-1)}{n(n+1)}$$

$$= \frac{c_{\text{avg}}(1)}{2} + 2 \sum_{i=2}^n \frac{(i-1)}{i(i+1)}$$

$$\approx 2 \sum_{i=2}^n \frac{1}{(i+2)}$$

$$= 2(\ln n + \Theta(1))$$

$$c_{\text{avg}}(n) = 2n \ln n + \Theta(n)$$

$$\approx 1.39n \log_2 n + \Theta(n)$$

$$= \Theta(n \log n)$$

## Quick Sort : เวลาการทำงาน

### ❖ Quicksort

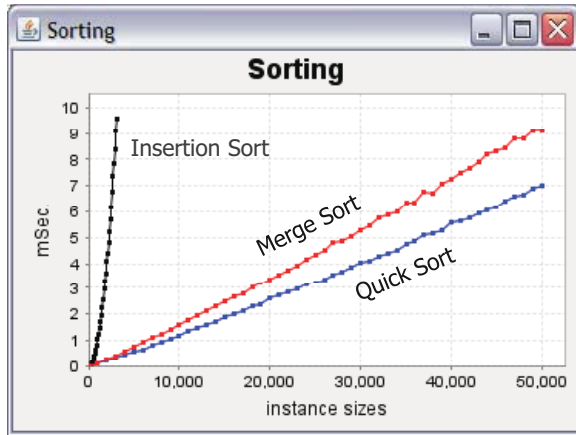
- ❖ กรณีช้าสุด :  $\Theta(n^2)$
- ❖ กรณีเร็วสุด :  $\Theta(n \log n)$
- ❖ กรณีเฉลี่ย :  $\Theta(n \log n)$

### ❖ เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีช้าสุด เลือก pivot แบบสุ่ม

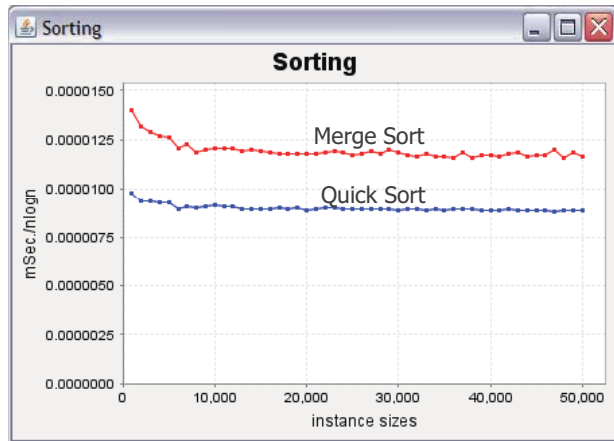
- ❖ มีโอกาสสูงที่ทำให้ quicksort ทำงานในเวลา  $\Theta(n \log n)$

```
partition( d[1..n], left, right ) {
    k = random(left, right)
    d[k] ↔ d[left]
    p = d[left]
    i = left, j = right + 1
    ...
}
```

# เวลาการทำงาน



# เวลา / $n \log n$



## Selection : หาตัวน้อยสุดอันดับ $k$

- ❖ **Input** :  $D = \langle d_1, d_2, \dots, d_n \rangle$  มีค่าต่างกันหมด จำนวนเต็ม  $k$ ,  $1 \leq k \leq n$
- ❖ **Output** : ข้อมูลใน  $D$  ที่มีค่าน้อยสุดอันดับที่  $k$  (ข้อมูลใน  $D$  ที่มีค่ามากกว่า  $d$  อื่นใน  $D$  เป็นจำนวน  $k-1$  ตัว)
- ❖ ตัวอย่าง :  $D = \langle 4, 0, 2, 6, 8, 9, 7 \rangle$ ,  $k = 5$

ผลคือ 7 (0, 2, 4, 6 มีค่าน้อยกว่า 7 นอกนั้นมากกว่า 7 หมด)

## sort ได้ $d[k]$ คือคำตอบ

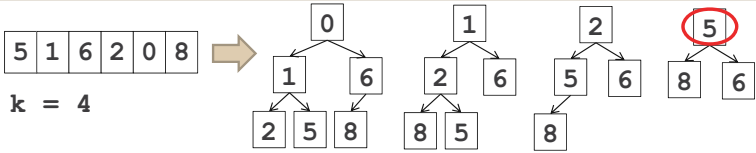
5 1 6 2 0 8  $\rightarrow$  0 1 2 5 6 8

$k = 4$

```
select( d[1..n], k ) {
  mergeSort( d )
  return d[k]
}
```

$\Theta( n \log n )$

## ใช้ min-heap

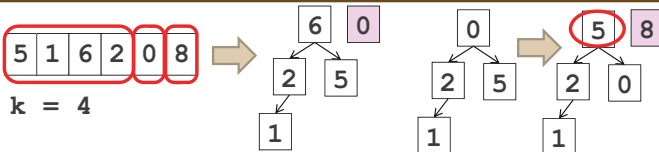


```

select( d[1..n], k ) {
    h = buildMinHeap( d )
    for (i = 1; i <= k-1; i++) {
        h.removeMin()
    }
    return h.getMin()
}
    
```

$O(n + k \log n)$

## ใช้ max-heap

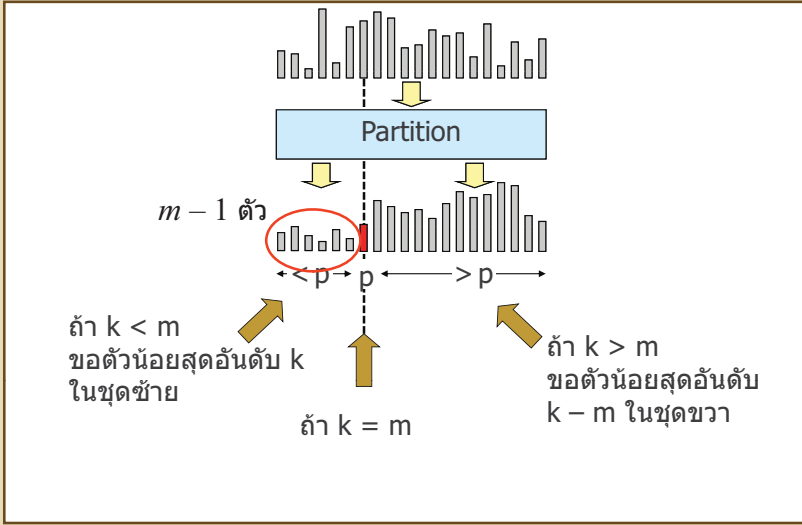


```

select( d[1..n], k ) {
    h = buildMaxHeap( d[1..k] )
    for (i = k+1; i <= n; i++) {
        if (d[i] < h.getMax()) {
            h.removeMax()
            h.add( d[i] )
        }
    }
    return h.getMax()
}
    
```

$O(k + n \log k)$

# QuickSelect



# QuickSelect

```

quickSelect( d[1..n], left, right, k ) {
    if (left == right) return d[left];
    j = partition(d, left, right);
    m = j - left + 1;
    if (k == m) return d[j];
    if (k < m)
        return quickSelect(d, left, j-1, k);
    else
        return quickSelect(d, j+1, right, k-m);
}
    
```

ตัวน้อยสุดอันดับ  $k$  จาก  $d[\text{left}]$  ถึง  $d[\text{right}]$

1	2	3	4	5	6
1	0	2	6	9	8

## QuickSelect : วิเคราะห์

ให้  $t(n)$  คือ เวลาของ quickselect กับข้อมูลจำนวน  $n$  ตัว

$\Theta(n)$

$\max( t(m-1), t(n-m) )$

$t(n) = \max( t(m-1), t(n-m) ) + \Theta(n)$

## QuickSelect : กรณีเร็วสุด

pivot ที่หาได้ ไม่ใช่ตัวที่ต้องการ partition แล้วจำนวนข้อมูลของทั้งสองฝั่งเท่ากัน

$$t(n) \leq \max( t(m-1), t(n-m) ) + \Theta(n)$$

$$t_{\min}(n) \leq t_{\min}(n/2) + \Theta(n)$$

$$= O(n) \quad (\text{Master method})$$

## QuickSelect : กรณีเข้าสู่

หลัง partition,  $m = 1$  หรือ  $n$

$$t(n) = \max(t(m-1), t(n-m)) + \Theta(n)$$

$$t_{\max}(n) = t_{\max}(n-1) + \Theta(n)$$

$$= t_{\max}(n-2) + \Theta(n-1) + \Theta(n)$$

...

$$= t_{\max}(1) + \sum_{j=2}^n \Theta(j)$$

$$= n(n+1)/2 - 1$$

$$= \Theta(n^2)$$

## QuickSelect : กรณีเฉลี่ย

- ❖ เลือก pivot สุ่ม ๆ ช่วงกว้าง 50% ของข้อมูล
- ❖ มีโอกาส 1/2 ที่ได้ pivot เป็นอันดับ 25% - 75% เป็นการแบ่งที่ "ดี"
- ❖ ถ้า pivot เป็น
  - ❖ ตัวที่อันดับ 25% ฝั่งขวามี 75% ของจำนวนข้อมูลทั้งหมด
  - ❖ ตัวที่อันดับ 75% ฝั่งซ้ายมี 75% ของจำนวนข้อมูลทั้งหมด
- ❖ จะได้  $t(n) \leq t(3n/4) + \Theta(n)$ ,  $c = \log_{4/3} 1 = 0$   
 $n = \Omega(n^{0+\epsilon})$ ,  $(3n/4 - 1) \leq (n-1)$ ,  $n \geq 0$ ,  $\rightarrow \Theta(n)$
- ❖ โยนเหรียญ 1 ครั้ง มีโอกาส 1/2 ได้หัว อยากรได้หัว ต้องโยนเหรียญโดยเฉลี่ย 2 ครั้ง ( $E = 1 + E/2$ )
- ❖ โดยเฉลี่ยการแบ่งส่วนทุก 2 ครั้ง ได้การแบ่งที่ "ดี"



## QuickSelect : กรณีเข้าสู่ $O(n)$

- ❖ วิธี partition ที่แบ่งได้ "ดี" แน่ ๆ
- ❖ ใช้ "mm5" เป็น pivot ในการแบ่ง
  - ❖ ประกันว่าจะแบ่ง 30% – 70% แม้กรณีแย่สุด
  - ❖  $t(n) = t(0.7n) + \text{เวลาในการหา "mm5"} + \Theta(n)$
  - ❖ จะเสนอวิธีหา mm5 ที่ใช้เวลา  $t(0.2n)$
  - ❖ จะได้  $t(n) = t(0.7n) + t(0.2n) + \Theta(n)$   
 $= \Theta(n)$

Median-of-Median-of-Five

## Median-of-Median-of-Five

1. แบ่งข้อมูลทั้งหมดเป็นชุด ๆ ชุดละ 5 ตัว
2. หามัธยฐานของข้อมูลในแต่ละชุด
3. mm5 คือมัธยฐานที่หาจากข้อมูลที่เป็นมัธยฐานของแต่ละชุด

10, 11, 3, 2, **5**, 6, 19, 20, **13**, 8, 7, 1, **9**, 14, 15,

4, 31, 34, 25, **28**, 21, 43, 12, 16, **18**, 17, **33**, 90, 81, 0,

**61**, 72, 37

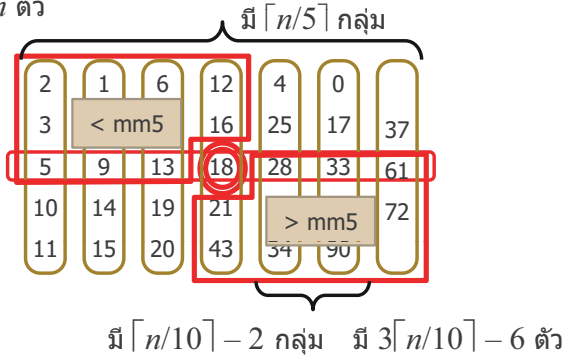
5, 13, 9, 28, **18**, 33, 61

mm5

## Median-of-Median-of-Five

- ❖ มีข้อมูลอย่างน้อย 30% ที่มีค่าน้อยกว่า  $mm5$
- ❖ มีข้อมูลอย่างน้อย 30% ที่มีค่ามากกว่า  $mm5$

มีข้อมูล  $n$  ตัว



## เวลาในการหา $mm5$

- แบ่งข้อมูลทั้งหมดเป็นชุด ๆ ชุดละ 5 ตัว  $\Theta(n)$ 
  - ❖ ได้ทั้งหมด  $\lceil n/5 \rceil$  ชุด
- หามัธยฐานของข้อมูลในแต่ละชุด  $\Theta(n)$ 
  - ❖ หามัธยฐานของข้อมูล 5 ตัวใช้  $\Theta(1)$
  - ❖ หาของ  $\lceil n/5 \rceil$  ชุด
  - ❖ ได้มัธยฐานจำนวน  $\lceil n/5 \rceil$  ตัว
- หา  $mm5$  จากข้อมูลที่เป็นมัธยฐานของแต่ละชุด  $t(n/5)$ 
  - ❖ ใช้ quickselect หา median ของข้อมูลจำนวน  $\lceil n/5 \rceil$  ตัว ที่ได้ในข้อ 2)
  - ❖ ให้  $t(n)$  คือเวลาเพื่อ quickSelect กับข้อมูล  $n$  ตัว

$$t(n/5) + \Theta(n)$$

## QuickSelect

- ❖ หา mm5 :  $t(n/5) + \Theta(n)$
- ❖ ใช้ mm5 partition :  $\Theta(n)$
- ❖ quickSelect ในชุดใหญ่ต่อ (อย่างมาก 70%) :  $t(0.7n)$
- ❖ เวลารวมของ quickSelect กรณีเข้าสัด

$$t(n) = t(0.7n) + t(0.2n) + \Theta(n)$$

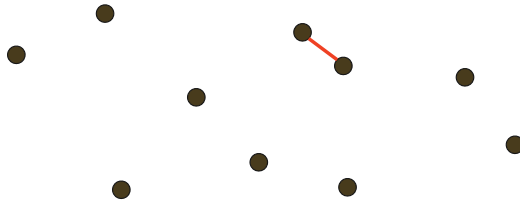
$$= \Theta(n)$$

ได้ผลเช่นไร ถ้าใช้ mm7, mm9, mm3 ?  
นำใช้ mm5 กับ quicksort ?

## Closest Point

- ❖ Input : จุด  $n$  จุดบนระนาบสองมิติ
- ❖ Output : ระยะทางระหว่างคู่จุดที่ใกล้กันที่สุด

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$



## ลุยทุกคู่

- ❖ คำนวณระยะทางของคู่จุดทุกคู่
- ❖ ต้องลอง  $n(n-1)/2$  คู่ ใช้เวลา  $\Theta(n^2)$

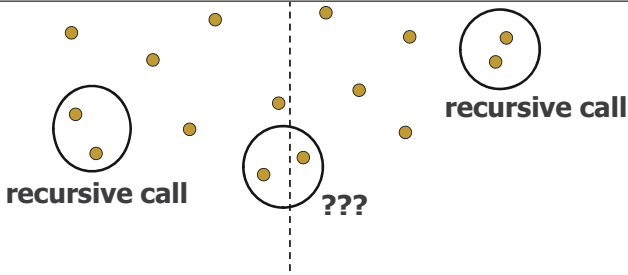
```

closestPair( x[1..n], y[1..n] ) {
    min = ∞
    for (i = 1; i <= n; i++)
        for (j = i+1; j <= n; j++)
            dx = |x[i] - x[j]|
            dy = |y[i] - y[j]|
            d = sqrt(dx2 + dy2)
            if (d < min) min = d
    }
}
return min
}

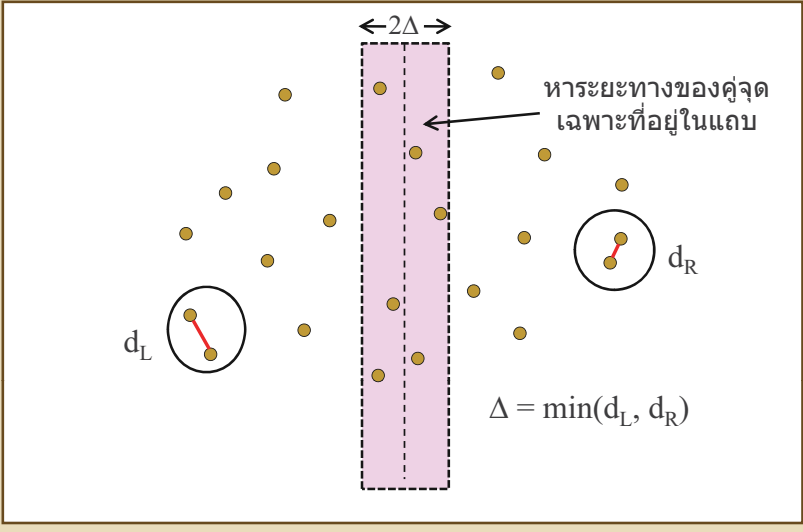
```

## Divide & Conquer

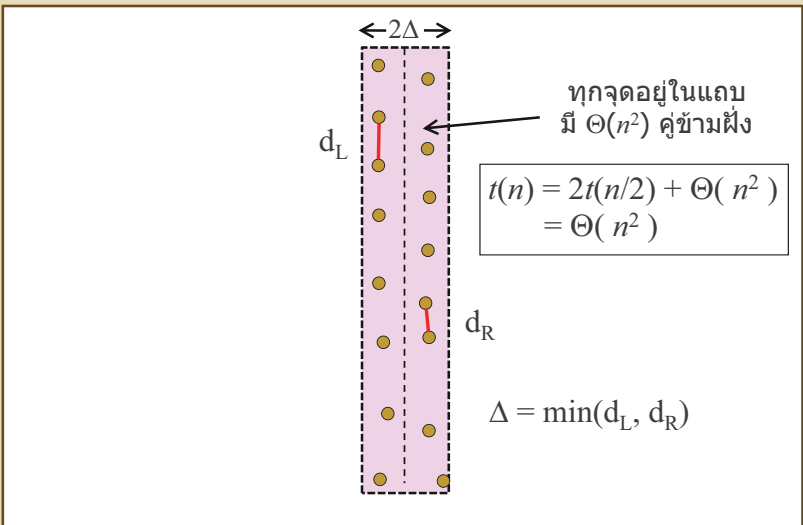
$$\begin{aligned}
 t(n) &= 2t(n/2) + \Theta(?) \\
 t(n) &= 2t(n/2) + \Theta(n^2) &= \Theta(n^2) \\
 t(n) &= 2t(n/2) + \Theta(n \log n) &= \Theta(n \log^2 n) \\
 t(n) &= 2t(n/2) + \Theta(n) &= \Theta(n \log n)
 \end{aligned}$$



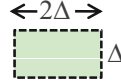
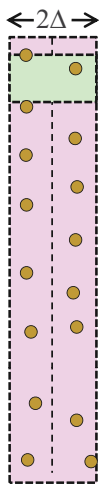
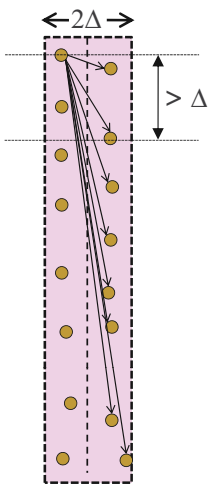
# Divide & Conquer



# คำนวณทุกคู่ที่ข้ามฝั่ง



## ไม่จำเป็นต้องคำนวณทุกคู่ที่ข้ามฝั่ง

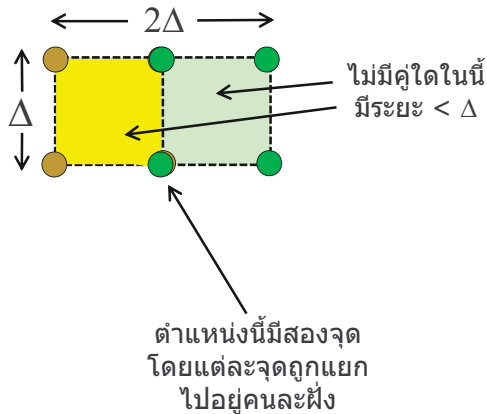


- มีจุดอยู่ในกรอบ  $2\Delta \times \Delta$  อย่างมาก 8 จุด
- ค่าวนคู่อจุดข้ามฝั่งในหนึ่งกรอบใช้เวลา  $\Theta(1)$
- ต้องเลื่อนกรอบ  $\Theta(n)$  ครั้ง
- มีจำนวน  $\Theta(n)$  คู่ที่ต้องคำนวณ

$$t(n) = 2t(n/2) + \Theta(n)$$

$$= \Theta(n \log n)$$

## มีอย่างมาก 8 จุดในกรอบ $2\Delta \times \Delta$



## $T(n) = 2T(n/2) + \Theta(n)$ ?

- ❖ เลื่อนกรอบจากบนลงล่างได้อย่างไร ?
- ❖ รู้ได้อย่างไรว่าจุดใดอยู่ทางซ้าย จุดใดอยู่ขวา
- ❖ ต้อง sort จุดตามแนวตั้ง และแนวนอน
- ❖ ถ้า sort ทุกครั้งในทุกระดับของ recursive
  - ❖  $T(n) = 2T(n/2) + \Theta(n \log n) \rightarrow T(n) = \Theta(n \log^2 n)$
- ❖ sort ครั้งเดียวเก็บไว้ก่อนก็ได้
  - ❖ ทุกระดับของ recursive ต้องเทียบกับรายการที่ sort ไว้
  - ❖  $T(n) = \max(\Theta(n \log n), 2T(n/2) + \Theta(n))$
  - ❖ เนื่องจาก  $T(n) = 2T(n/2) + \Theta(n) = \Theta(n \log n)$
  - ❖ ดังนั้น  $T(n) = \Theta(n \log n)$

## min + max

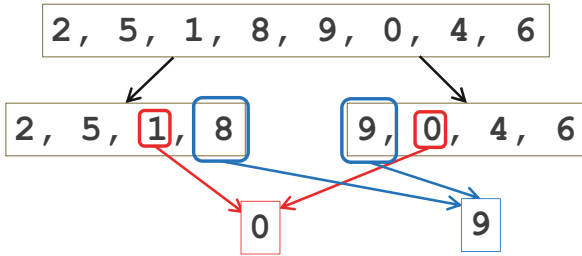
```

minmax( d[1..n] ) {
  max = d[1], min = d[1]
  for (k=2; k<=n; k++) {
    if (d[k] > max) max = d[k]
    if (d[k] < min) min = d[k]
  }
  return (min,max)
}

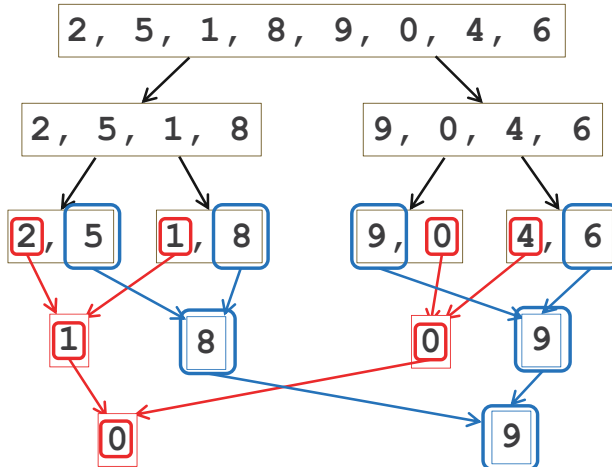
```

#cmps =  $2(n - 1)$

## min + max : แบ่งครึ่ง



## min + max : แบ่งครึ่ง ๑





## min + max : แบ่งครึ่ง ๆ

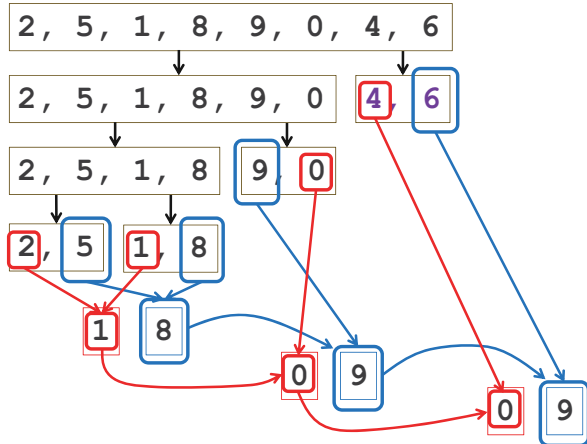
```

minmax1( d[1..n], left, right ) {
  if (right-left == 0) // มี 1 ตัว
    return (d[right], d[right])
  if (right-left == 1) { // มี 2 ตัว
    if (d[left] < d[right])
      return (d[left], d[right]);
    else
      return (d[right], d[left]);
  }
  mid = ⌊(left + right)/2⌋
  (min1, max1) = minmax1(d, left, mid)
  (min2, max2) = minmax1(d, mid + 1, right)
  return (min(min1, min2), max(max1, max2));
}
    
```

$$c(n) = c(\lceil n/2 \rceil) + c(\lfloor n/2 \rfloor) + 2$$

$$c(1) = 0, c(2) = 1$$

## min + max : แบ่ง (n-2) + 2



min + max : แบ่ง  $(n-2) + 2$ 

```

minmax2( d[1..n], right ) {
  if (right == 1)
    return (d[right], d[right])
  if (d[right-1] < d[right])
    min1 = d[right-1], max1 = d[right];
  else
    min1 = d[right], max1 = d[right-1];
  if (right > 2) {
    (min2, max2) = minmax2(d, right - 2);
    min1 = min(min1, min2);
    max1 = max(max1, max2);
  }
  return (min1, max1);
}

```

$$c(n) = c(n-2) + 3$$

$$c(1) = 0, c(2) = 1$$

วิเคราะห์ : แบ่ง  $(n-2) + 2$ 

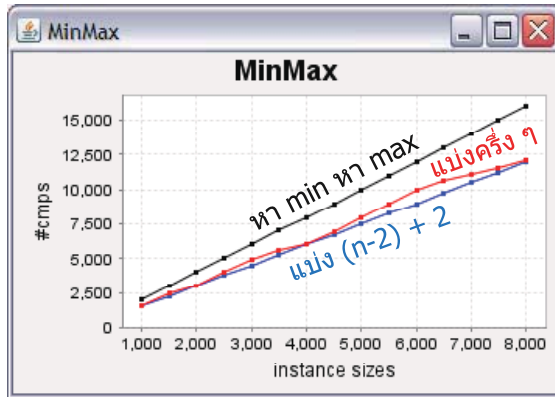
$$c(n) = c(n-2) + 3, c(1) = 0, c(2) = 1$$

$$c(n) = \lceil 3n/2 \rceil - 2$$

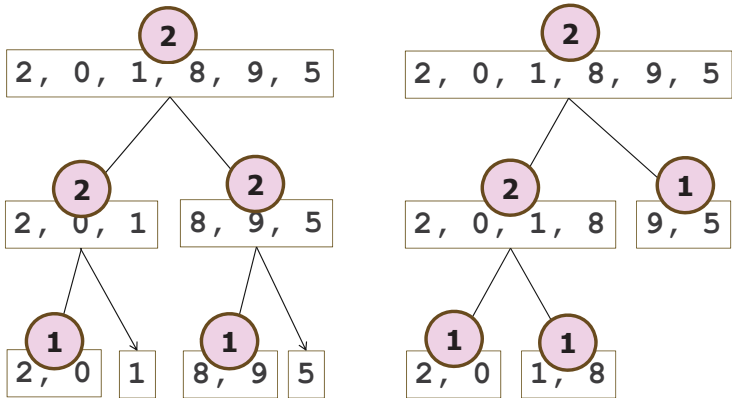
$n$	$c(n)$
1	0
3	3
5	6
7	9
9	12
...	...

$n$	$c(n)$
2	1
4	4
6	7
8	10
10	13
...	...

# เปรียบเทียบ



# แบ่งครึ่งเหลือเศษมากกว่า

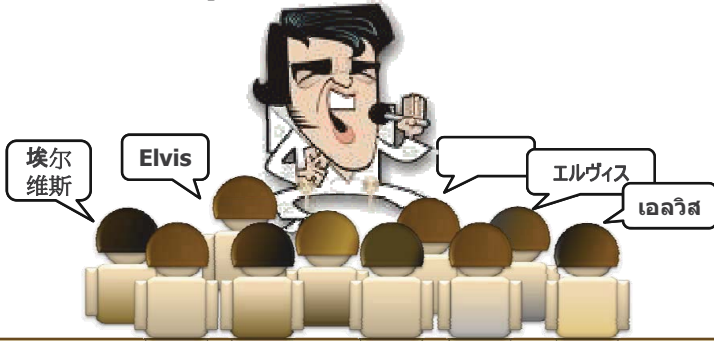


เปรียบเทียบ 8 ครั้ง

เปรียบเทียบ 7 ครั้ง

## Celebrity Problem

- ❖ อยากทราบว่าใครคือ "ดาวเด่น" ของงานสังคมที่มีผู้ร่วมงาน  $n$  คน
- ❖ "ดาวเด่น" คือผู้ซึ่งทุก ๆ คนในงานรู้จัก แต่เจ้าตัวไม่รู้จักใครเลย



## ลุย

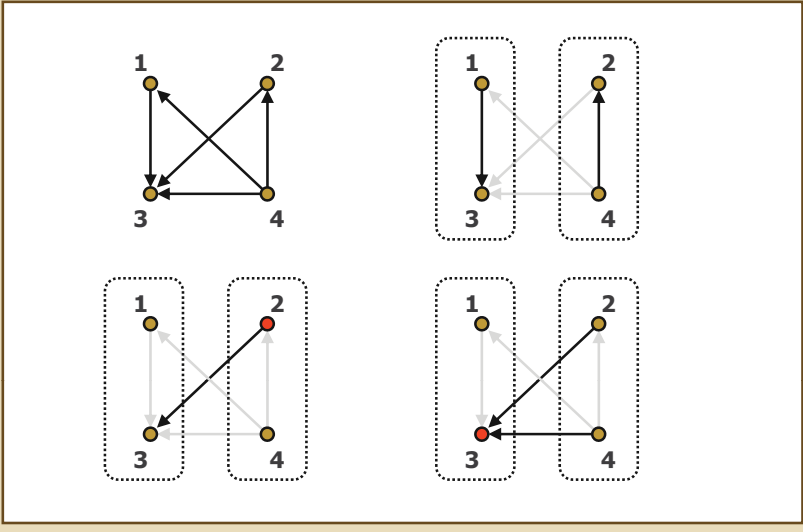
```

Celebrity ( a[1..n, 1..n] ) {
  for i = 1 to n {
    c1 = 0
    for k = 1 to n
      c1 = c1 + a[k,i]
    c2 = 0
    for k = 1 to n
      c2 = c2 + a[i,k]
    if (c1 == n-1 AND c2 == 0) return i
  }
  return 0
}

```

	1	2	3	4
1	0	0	1	0
2	0	0	1	0
3	0	0	0	0
4	1	1	1	0

# Divide & Conquer

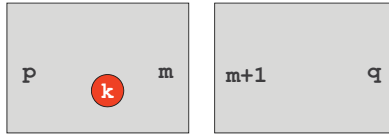


# Divide & Conquer (50 : 50)



```
Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
```

## Divide & Conquer (50 : 50)

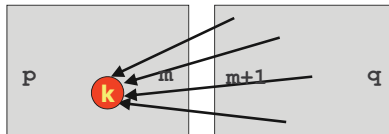


```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
  if ( p == q ) return p
  m = (p+q)/2
  k = Celebrity_DQ( a, p, m )

```

## Divide & Conquer (50 : 50)

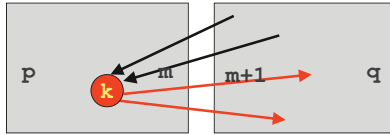


```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
  if ( p == q ) return p
  m = (p+q)/2
  k = Celebrity_DQ( a, p, m )
  k = Celebrity_Check( a, k, m+1, q )
  if ( k > 0 ) return k

```

## Divide & Conquer (50 : 50)

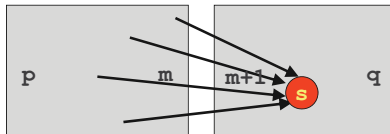


```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
  if ( p == q ) return p
  m = (p+q)/2
  k = Celebrity_DQ( a, p, m )
  k = Celebrity_Check( a, k, m+1, q )
  if ( k > 0 ) return k
}

```

## Divide & Conquer (50 : 50)



```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
  if ( p == q ) return p
  m = (p+q)/2
  k = Celebrity_DQ( a, p, m )
  k = Celebrity_Check( a, k, m+1, q )
  if ( k > 0 ) return k
  s = Celebrity_DQ( a, m+1, q )
  s = Celebrity_Check( a, s, p, m )
  return s
}

```

## Divide & Conquer (50 : 50)



```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
    if ( p == q ) return p
    m = (p+q)/2
    k = Celebrity_DQ( a, p, m )
    k = Celebrity_Check( a, k, m+1, q )
    if ( k > 0 ) return k
    s = Celebrity_DQ( a, m+1, q )
    s = Celebrity_Check( a, s, p, m )
    return s
}

```

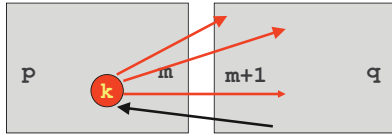
## Divide & Conquer (50 : 50)



0	0	1	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	1	0

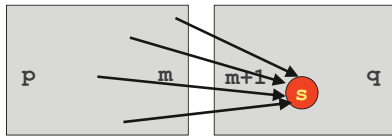


## Divide & Conquer (50 : 50)



0	0	1	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	1	0

## Divide & Conquer (50 : 50)



0	0	1	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	1	0

## Divide & Conquer (1 : n - 1)



```
Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
```

## Divide & Conquer (1 : n - 1)



```
Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {  
  if ( p == q ) return p  
  k = Celebrity_Check( a, p, p+1, q )  
  if ( k > 0 ) return k
```

## Divide & Conquer (1 : n - 1)

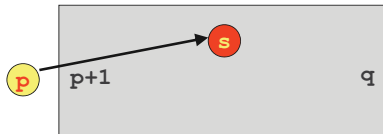


```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
  if ( p == q ) return p
  k = Celebrity_Check( a, p, p+1, q )
  if ( k > 0 ) return k
  s = Celebrity_DQ( a, p+1, q )
}

```

## Divide & Conquer (1 : n - 1)



```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
  if ( p == q ) return p
  k = Celebrity_Check( a, p, p+1, q )
  if ( k > 0 ) return k
  s = Celebrity_DQ( a, p+1, q )
  s = Celebrity_Check( a, s, p, p )
  return s
}

```

## Divide & Conquer (1 : n - 1)

```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
  if ( p == q ) return p
  k = Celebrity_Check( a, p, p+1, q )
  if ( k > 0 ) return k
  s = Celebrity_DQ( a, p+1, q )
  s = Celebrity_Check( a, s, p, p )
  return s
}

```

## Decrease & Conquer

$$t(n) =$$

$$t(n) =$$

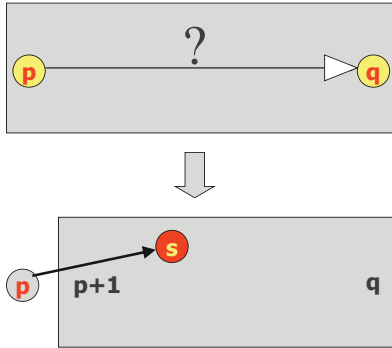
```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
  if ( p == q ) return p
  k = Celebrity_Check( a, p, p+1, q )
  if ( k > 0 ) return k
  s = Celebrity_DQ( a, p+1, q )
  s = Celebrity_Check( a, s, p, p )
  return s
}

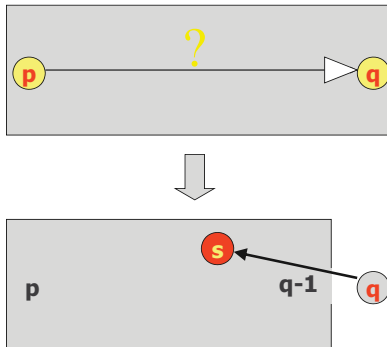
```

จะเลือกตัวใด ให้แน่ใจว่าไม่ใช่ "ดาวเด่น" แน่ ๆ

## Decrease & Conquer



## Decrease & Conquer



# Decrease & Conquer

① 2 3 4 5 6 7 ⑧

①		①
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

# Decrease & Conquer

1 ② 3 4 5 6 7 ⑧

1		1
②		①
3		
4		
5		
6		
7		
8		

# Decrease & Conquer

1 (2) 3 4 5 6 (7) 8

1		1
(2)		(1) 0
3		
4		
5		
6		
7		
8		

# Decrease & Conquer

1 2 (3) 4 5 6 (7) 8

1		1
2		1 0
(3)		(1)
4		
5		
6		
7		
8		

# Decrease & Conquer

1 2 3 4 5 6 7 8

1							1
2						1	0
3						1	
4	4					0	
5							
6							
7							
8							

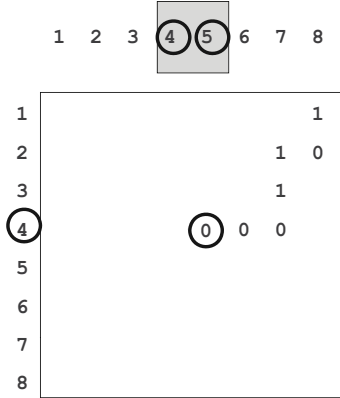
# Decrease & Conquer

1 2 3 4 5 6 7 8

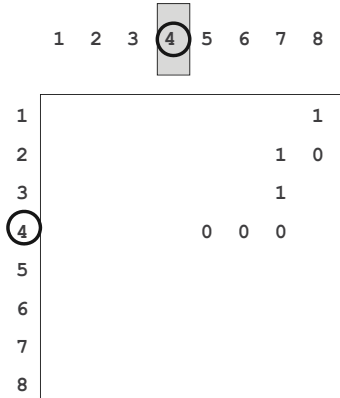
1							1
2						1	0
3						1	
4	4					0	0
5							
6							
7							
8							



# Decrease & Conquer



# Decrease & Conquer



# Decrease & Conquer

1 2 3 **4** 5 6 7 8

1								1
2						1	0	
3					1			
<b>4</b>	?	?	?	0	0	0	0	?
5								
6								
7								
8								

# Decrease & Conquer

1 2 3 **4** 5 6 7 8

1								1
2						1	0	
3					1			
<b>4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
5								
6								
7								
8								

# Decrease & Conquer

	1	2	3	4	5	6	7	8
1				?				1
2				?			1	0
3				?			1	
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5				?				
6				?				
7				?				
8				?				

# Decrease & Conquer

	1	2	3	4	5	6	7	8
1				1				1
2				1			1	0
3				1			1	
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5				1				
6				1				
7				1				
8				1				

## Decrease & Conquer

```

Celebrity_DQ( a[1..n, 1..n], p, q ) {
    if ( p == q ) return p

    if ( a[p,q] == 1 ) {
        s = Celebrity_DQ( a, p+1, q )
        s = Celebrity_Check( a, s, p, p )
    } else {
        s = Celebrity_DQ( a, p, q-1 )
        s = Celebrity_Check( a, s, q, q )
    }

    return s
}

```



จำนวน probes =  $p(n) = p(n-1)+3 = 3(n-1)$

## สรุป

- ❖ **Divide + Conquer + Combine**
- ❖ วิเคราะห์ด้วย Master method, recursion tree,
- ❖ หาว่าภาระการแบ่งปัญหา การรวมคำตอบ หรือการแก้ปัญหาย่อย ส่วนใดเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพ
- ❖ โดยทั่วไปมักแบ่งปัญหาใหญ่เป็นสองปัญหาย่อย แต่ควรลองแบบอื่น อาจดีกว่า

# กำหนดการพลวัต

## Dynamic Programming

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

### หัวข้อ

- ❖ แบ่งใหญ่เป็นย่อย ถ้ามีปัญหาย่อยที่ซ้ำ จะซ้ำ
- ❖ จำค่าตอบไว้ใช้ในอนาคด → เร็ว
- ❖ ใช้กับการแก้ปัญหาได้ทั้งแบบ
  - ❖ top-down
  - ❖ bottom-up
- ❖ กำหนดการพลวัต (Dynamic Programming)
- ❖ ตัวอย่าง

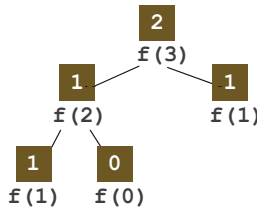
# จำนวนฟีโบนัคซี (Fibonacci)

$$f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$$

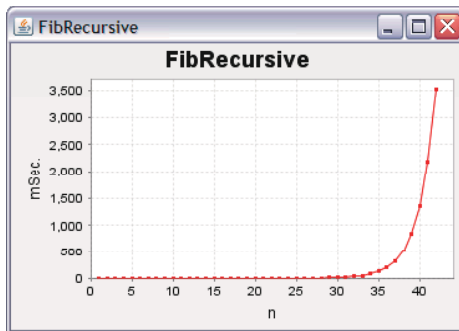
$$f_0 = 0, f_1 = 1$$

Top-down

```
f(n) {  
  if (n < 2) return n  
  return f(n - 1) + f(n - 2)  
}
```



# เวลาการทำงาน



Intel P8400 2.26GHz, Java 6u14

## วิเคราะห์เวลาการทำงาน

```
f(n) {
    if (n < 2) return n
    return f(n - 1) + f(n - 2)
}
```

ให้  $t(n)$  แทนจำนวนครั้งที่เรียก  $f(n)$  จะได้

$$t(n) = t(n-1) + t(n-2) + 1, \quad t(0) = 1, t(1) = 1$$

n =	0	1	2	3	4	5	6	7	8
f(n) =	0	1	1	2	3	5	8	13	21
t(n) =	1	1	3	5	9	15	25	41	67

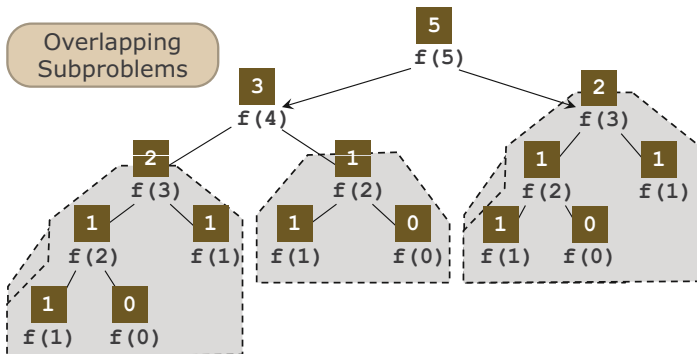
$$t(n) = 2f(n+1) - 1$$

$$\Theta(\phi^n)$$

$$f(n) = \frac{\phi^n - (1-\phi)^n}{\sqrt{5}}, \quad \phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1.61803\dots$$

## ซ้ำเพราะคำนวณซ้ำ ๆ

```
f(n) {
    if (n < 2) return n
    return f(n - 1) + f(n - 2)
}
```

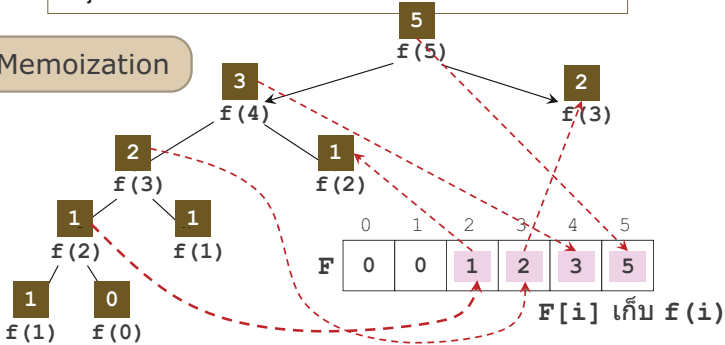


# หลีกเลี่ยงการคำนวณซ้ำด้วยการจำ

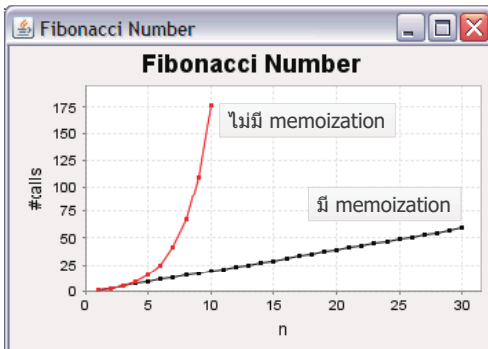
```
f(n, F[0..n]) {
    if (n < 2) return n
    if (F[n] > 0) return F[n]
    return F[n] = f(n-1, F) + f(n-2, F)
}
```

$\Theta(n)$

Memoization



# แบบมีกับไม่มี memoization





## เติมตารางอีกแบบ : Bottom-Up

	0	1	2	3	4	5
F	0	1	1	2	3	5

```
f( n ) {
  F = new array[0..n]
  F[0] = 0; F[1] = 1
  for (i = 2; i <= n; i++) {
    F[i] = F[i - 1] + F[i - 2]
  }
  return F[n]
}
```

 $\Theta(n)$ 

bottom-up

## ลดขนาดของตารางเหลือแค่ 3 ตัว

f0	f1	f2
0	1	2

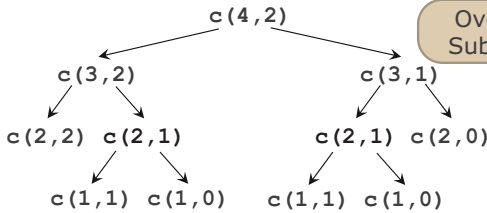
```
f( n ) {
  f0 = 0, f1 = 1, f2 = 1
  for (i = 2; i <= n; i++) {
    f2 = f0 + f1
    f0 = f1
    f1 = f2
  }
  return f2
}
```

## $C(n, k)$ : $n$ เลือก $k$

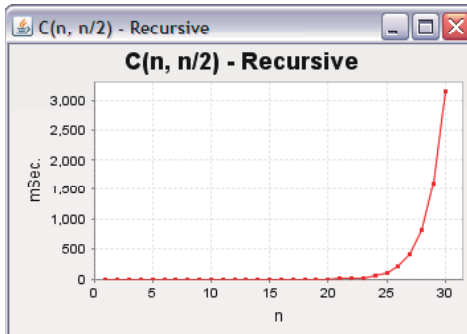
$$C(n, k) = \begin{cases} C(n-1, k) + C(n-1, k-1) & \text{if } 0 < k < n \\ 1 & \text{if } k = 0 \text{ or } k = n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

```

c(n, k) {
  if (k == 0 OR k == n) return 1
  if (k < 0 OR k > n) return 0
  return c(n-1, k) + c(n-1, k-1)
}
    
```



## $C(n, k)$ : เวลาการทำงาน



## C(n,k) : Top-down + Memoization

c(10,5)

ทำ 503 ครั้ง

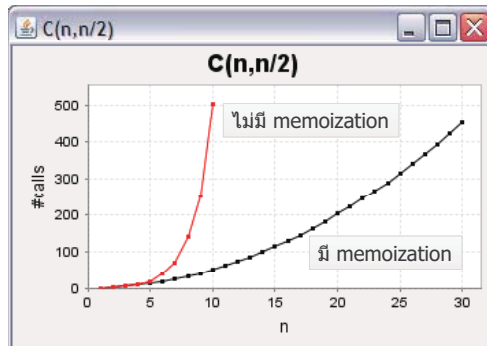
```
c(n, k) {
    if (k == 0 OR k == n) return 1
    if (k < 0 OR k > n) return 0
    return c(n-1, k) + c(n-1, k-1)
}
```

ทำ 51 ครั้ง

c(10, 5, new array[1..10][1..5])

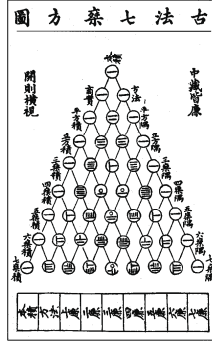
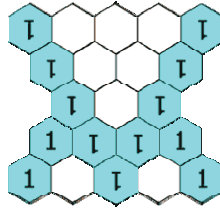
```
c(n, k, C[1..n][1..k]) {
    if (k == 0 OR k == n) return 1
    if (k < 0 OR k > n) return 0
    if (C[n][k] > 0) return C[n][k]
    return C[n][k] = c(n-1, k, C) + c(n-1, k-1, C)
}
```

## แบบมีกับไม่มี memoization



# C(n, k) : Bottom-up

Pascal's Triangle



Bottom = หาค่าตอบของกรณีเล็ก ๆ  
 Up = หาค่าตอบของกรณีใหญ่ขึ้น  
 โดยใช้คำตอบของกรณีเล็กที่รู้แล้ว

# Pascal's Triangle : เขียนอีกแบบ

		k						
		0	1	2	3	4	5	6
n	0	1						
	1	1	1					
	2	1	2	1				
	3	1	3	3	1			
	4	1	4	6	4	1		
	5	1	5	10	10	5	1	
	6	1	6	15	20	15	6	1

$C(6, 2) = 15$

## C(n, k) : Bottom-up

$$C(n, k) = \begin{cases} C(n-1, k) + C(n-1, k-1) & \text{if } 0 < k < n \\ 1 & \text{if } k = 0 \text{ or } k = n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

		k		
		0	1	2
n	0	1		
	1	1	1	
	2	1	2	1
	3	1	3	3
	4	1	4	6
	5	1	5	10
	6	1	6	15

ต้องการ C(6, 2)

## C(n, k) : Bottom-up

```

c(n, k) {
    C = new array[0..n][0..k]
    for (i = 0; i <= n; i++) C[i][0] = 1
    for (i = 0; i <= k; i++) C[i][i] = 1
    for (i = 2; i <= n; i++)
        for (j = 1; j <= k && j < i; j++)
            C[i][j] = C[i-1][j] + C[i-1][j-1]
    return C[n][k];
}
    
```

$\Theta(nk)$

		k		
		0	1	2
n	0	1		
	1	1	1	
	2	1	2	1
	3	1	3	3
	4	1	4	6
	5	1	5	10
	6	1	6	15

## Top-Down vs. Bottom-Up

### ❖ Top-Down

- ❖ แบ่งปัญหาใหญ่เป็นปัญหาย่อย
- ❖ หาค่าตอบของปัญหาย่อย
- ❖ นำคำตอบย่อย ๆ มารวมเป็นคำตอบของปัญหาใหญ่
- ❖ มักเขียนแบบ recursive
- ❖ แก้ปัญหาย่อยเท่าที่จำเป็น (แต่อาจแก้ซ้ำ แก้แล้วแก้อีก)
- ❖ ลดการแก้ปัญหาย่อยซ้ำด้วย memoization

### ❖ Bottom-Up

- ❖ เริ่มหาค่าตอบของปัญหาเล็ก ๆ
- ❖ นำคำตอบของปัญหาเล็กมาหาค่าตอบของปัญหาใหญ่ขึ้น
- ❖ มักเขียนแบบวงวน
- ❖ แก้ปัญหาย่อย ๆ ทุกปัญหา ปัญหาละครั้ง

## Dynamic Programming

### ❖ ทำงานแบบ bottom-up ด้วยการแก้ปัญหาย่อย จำคำตอบที่ได้ เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาใหญ่ขึ้น

### ❖ มักใช้กับ optimization problems

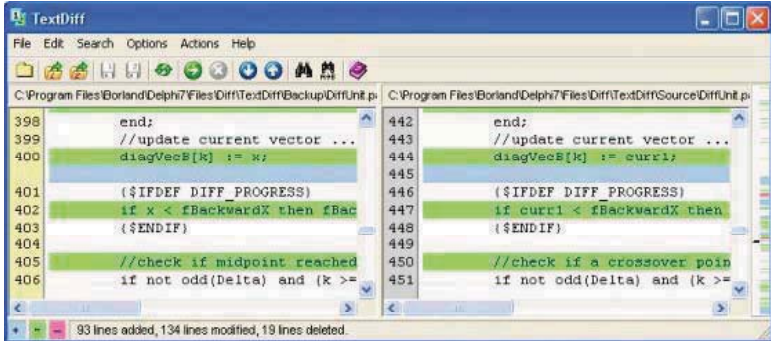
- ❖ การหาเส้นทางสั้นสุด
- ❖ การหาลำดับย่อยรวมกันที่ยาวสุด
- ❖ การเลือกของที่ได้มูลค่ารวมสูงสุด
- ❖ การจัดเก็บข้อมูลในต้นไม้ค้นหาให้ค้นได้เร็วสุด
- ❖ การหาลำดับการคูณเมทริกซ์ เพื่อให้คูณได้เร็วสุด
- ❖ ...



Richard Bellman นักคณิตศาสตร์  
ผู้คิดวิธี Dynamic programming  
ในปี ค.ศ. 1953

# Longest Common Subsequence

## แฟ้มสองแฟ้มเหมือนกัน (ต่างกัน) ตรงไหนบ้าง

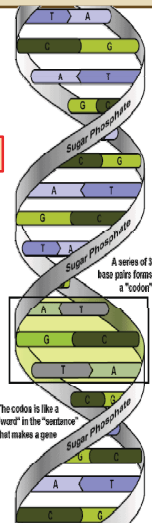
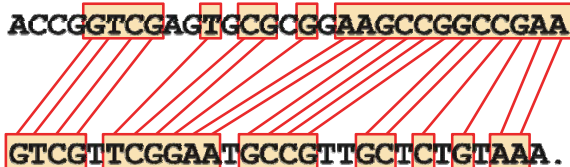


# Longest Common Subsequence

## วัดความคล้ายของ DNA sequences

ACCGGTCGAGTGC CGCGGAAGCCGGCCGAA

GTCGTTCCGAAATGCCGTTGCTCTGTAAA.



## Longest Common Subsequence

❖  $X = \langle H, E, L, L, O \rangle$  มี subsequences

❖  $\langle H, E, L, L, O \rangle \rightarrow \langle H, E \rangle$

❖  $\langle H, E, L, L, O \rangle \rightarrow \langle H, E, O \rangle$

❖  $\langle H, E, L, L, O \rangle \rightarrow \langle \rangle$

❖ ...

❖  $Y = \langle H, E, R, O \rangle$  มี subsequences

❖  $\langle H, E, R, O \rangle \rightarrow \langle H, E \rangle$

❖  $\langle H, E, R, O \rangle \rightarrow \langle H, R \rangle$

❖  $\langle H, E, R, O \rangle \rightarrow \langle H, E, O \rangle$

❖ ...

❖ common subsequence( $X, Y$ )

❖ longest common subsequence( $X, Y$ )

## นิยาม

❖  $X = \langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_m \rangle$

❖  $Y = \langle y_1, y_2, y_3, \dots, y_n \rangle$

❖  $X_i = \langle x_1, x_2, \dots, x_i \rangle$

❖  $Y_j = \langle y_1, y_2, \dots, y_j \rangle$

❖  $LCS(X_i, Y_j)$  :

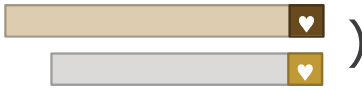
longest common subsequence ของ  $X_i, Y_j$

❖  $LCS(X, Y) = LCS(X_m, Y_n)$

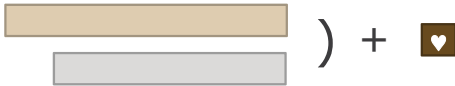

❖  $L(i, j)$  : ความยาวของ  $LCS(X_i, Y_j)$



## คำตอบใหญ่ได้จากคำตอบย่อย ๆ

LCS(  )

=

LCS(  ) + 


LCS(HELL**O**, HER**O**) = LCS(**H**ELL, **H**ER) + **O**  
 = **HE** + **O**  
 = **HEO**

## คำตอบใหญ่ได้จากคำตอบย่อย ๆ

LCS(  ) LCS(COP, CEO)

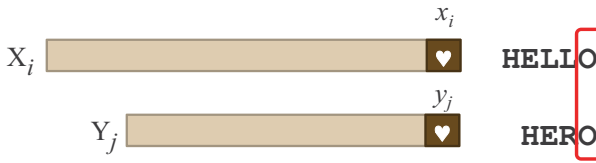
=

=

LCS(  ) LCS(**C**OP, **C**E)

LCS(  ) LCS(**CO**, **CEO**)

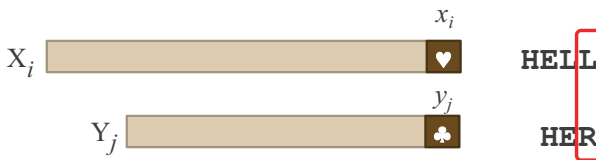
## Recurrence ของ $L(i, j)$



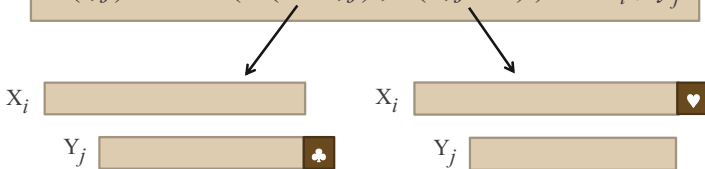
$$L(i, j) = L(i - 1, j - 1) + 1 \quad \text{if } x_i = y_j$$

↑                      ↑  
 ความยาวของ  $LCS(X_{i-1}, Y_{j-1})$       ตัวขวาที่เท่ากัน 1 ตัว

## Recurrence ของ $L(i, j)$



$$L(i, j) = \max(L(i - 1, j), L(i, j - 1)) \quad \text{if } x_i \neq y_j$$



## Recurrence ของ $L(i, j)$

$X_i$     $x_i$

$Y_j$     $y_j$

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

## LCS : Top-down

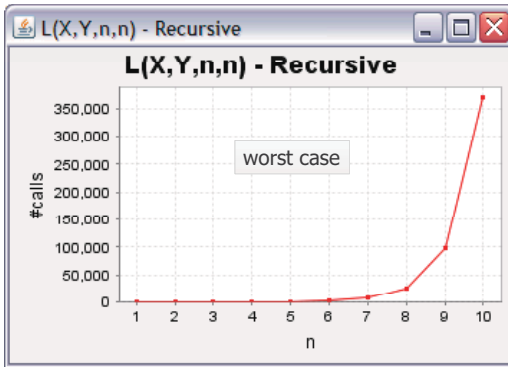
$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

```

L(x[1..m], y[1..n]) {
    return L(x, y, m, n)
}
L(x[1..m], y[1..n], i, j) {
    if (i == 0 OR j == 0) return 0
    if (x[i] == y[j]) {
        return L(x, y, i-1, j-1) + 1
    } else {
        return max( L(x, y, i-1, j),
                    L(x, y, i, j-1) )
    }
}

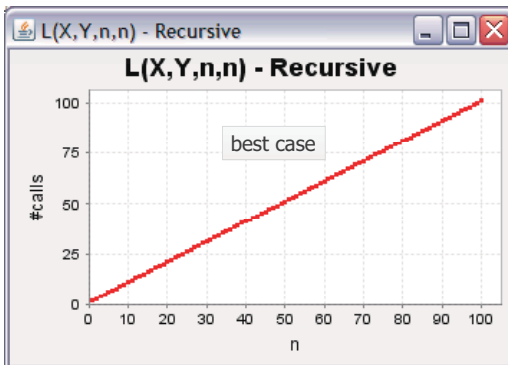
```

## หาความยาว LCS : เวลาการทำงาน



ลักษณะข้อมูลของกรณี worst case และ best case เป็นอย่างไร ?  
กรณี best case มีประสิทธิภาพเชิงเวลาอย่างไร ?  
ลองปรับด้วย memoization จะได้ผลอย่างไร ?

## LCS : best cases



worst case เมื่อสองลำดับไม่เหมือนกันเลย  
best case เมื่อสองลำดับเหมือนกันหมด

## Top-down + Memoization

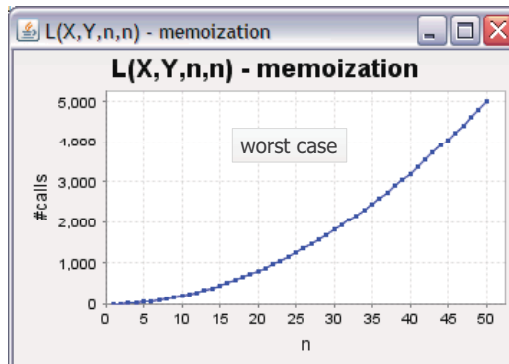
$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

```

L(x[1..m], y[1..n], i, j, M[1..m][1..n]) {
  if (i == 0 OR j == 0) return 0
  if (M[i][j] > 0) return M[i][j]
  if (x[i] == y[j]) {
    return M[i][j] = L(x, y, i-1, j-1, M) + 1
  } else {
    return M[i][j] = max( L(x, y, i-1, j, M),
                          L(x, y, i, j-1, M) )
  }
}

```

## LCS : memoization



## LCS : Bottom-up

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

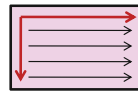
			H	E	L	L	O
	j						
i		0	0	0	0	0	0
	H	0	1	1	1	1	1
	E	0	1	2	2	2	2
	R	0	1	2	2	2	2
	O	0	1	2	2	2	3

## LCS : Dynamic Prog.

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

```

LCS_Length(x[1..m], y[1..n]) {
    L = new array[0..m][0..n]
    for (i = 0; i <= m; i++) L[i][0] = 0
    for (j = 0; j <= n; j++) L[0][j] = 0
    for (i = 1; i <= m; i++)
        for (j = 1; j <= n; j++)
            if (x[i] == y[j])
                L[i][j] = L[i - 1][j - 1] + 1
            else
                L[i][j] = max(L[i - 1][j], L[i][j - 1])
    return L;
}
    
```



$\Theta(nm)$

## ต้องการ LCS : จำผลการตัดสินใจ

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j				
		H	E	L	L	O
i	0	0	0	0	0	0
H	0	1	1	1	1	1
E	0	1	2	2	2	2
R	0	1	2	2	2	2
O	0	1	2	2	2	3

## จำผลการตัดสินใจ

```

LCS(x[1..m], y[1..n]) {
    L = new array[0..m][0..n]
    D = new array[1..m][1..n]
    for (i = 0; i <= m; i++) L[i][0] = 0
    for (j = 0; j <= n; j++) L[0][j] = 0
    for (i = 1; i <= m; i++)
        for (j = 1; j <= n; j++)
            if (x[i] == y[j])
                L[i][j] = L[i-1][j-1] + 1
                D[i][j] = ↖
            else
                if (L[i-1][j] > L[i][j-1])
                    L[i][j] = L[i-1][j]
                    D[i][j] = ↑
                else
                    L[i][j] = L[i][j-1]
                    D[i][j] = ←

```

## ใช้ผลการตัดสินใจสร้างคำตอบ

```

lcs = an empty sequence
i = n, j = m
while (i > 0 AND j > 0) {
  switch( D[i][j] ) {
    case : ←
      lcs = x[i] + lcs
      i--; j--
    case : ←
      j--
    case : ↑
      i--
  }
}
return lcs

```

		H	E	L	L	O
H		↖	←	←	←	←
E		↑	↖	←	←	←
R		↑	↑	↖	↖	←
O		↑	↑	←	←	↖

## ต้องการประหยัด ไม่จำผลการตัดสินใจ

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		H	E	L	L	O
0	0	0	0	0	0	0
H	0	1	1	1	1	1
E	0	1	2	2	2	2
R	0	1	2	2	2	2
0	0	1	2	2	2	3



## สร้าง LCS ได้จากตาราง L

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j					
	i		H	E	L	L	O
		0	0	0	0	0	0
	H	0	1	1	1	1	1
	E	0	1	2	2	2	2
	R	0	1	2	2	2	2
	O	0	1	2	2	2	3

## สร้าง LCS ได้จากตาราง L

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j					
	i		H	E	L	L	O
		0	0	0	0	0	0
	H	0	1	1	1	1	1
	E	0	1	2	2	2	2
	R	0	1	2	2	2	2
	O	0	1	2	2	2	3

## สร้าง LCS ได้จากตาราง L

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j				
		H	E	L	L	O
i		0	0	0	0	0
	H	0	1	1	1	1
	E	0	1	2	2	2
	R	0	1	2	2	2
	O	0	1	2	2	3

## สร้าง LCS ได้จากตาราง L

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j				
		H	E	L	L	O
i		0	0	0	0	0
	H	0	1	1	1	1
	E	0	1	2	2	2
	R	0	1	2	2	2
	O	0	1	2	2	3

## สร้าง LCS ได้จากตาราง L

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		H	E	L	L	O
H	0	1	1	1	1	1
E	0	1	2	2	2	2
R	0	1	2	2	2	2
O	0	1	2	2	2	3

## สร้าง LCS ได้จากตาราง L

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		H	E	L	L	O
H	0	1	1	1	1	1
E	0	1	2	2	2	2
R	0	1	2	2	2	2
O	0	1	2	2	2	3

## LCS\_Soln(x, y, L)

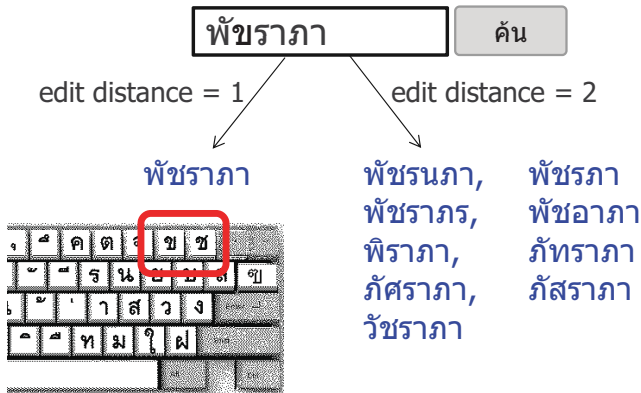
```

LCS_Soln(x[1..n], y[1..m], L[0..n][0..m]) {
  lcs = an empty sequence
  i = n, j = m
  while (i > 0 AND j > 0) {
    if (x[i] == y[j]) {
      lcs = x[i] + lcs
      i--; j--
    } else {
      if (L[i][j-1] > L[i-1][j])
        j--
      else
        i--
    }
  }
  return lcs
}
    
```

สามารถหา LCS ได้ด้วยเนื้อที่  $O(n + m)$

D. Hirschberg "A linear space algorithm for computing maximal common subsequences"

## สะกดผิด : หาคำใกล้เคียง



## Minimum Edit Distance

- ❖ เปลี่ยน HELLO ให้เป็น HERO เช่น
  - ❖ HELLO → ELLO → LLO → LO → RO → ERO → HERO
  - ❖ HELLO → HELO → HERO
- ❖ ให้การแก้ไขสตริงประกอบด้วย
  - ❖ การลบอักขระหนึ่งตัว
  - ❖ การเพิ่มอักขระหนึ่งตัว
  - ❖ การแทนอักขระหนึ่งตัวด้วยอักขระอีกตัว
- ❖ การแก้ไขมีต้นทุน  $c_D$ ,  $c_I$ ,  $c_S$
- ❖ Edit distance คือต้นทุนการแก้ไขเพื่อเปลี่ยนสตริง
- ❖ ปัญหา : เปลี่ยนสตริง  $s$  ให้เป็น  $t$  อย่างไรให้มี minimum edit distance

ลองทำเอง  
คล้าย ๆ LCS

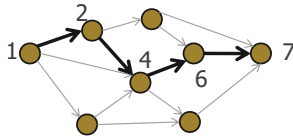
## ลักษณะของปัญหา

- ❖ overlapping subproblems :
  - ❖ ต้องแก้ปัญหาย่อย ๆ ซ้ำ ๆ หลายครั้ง  
การจำคำตอบจึงประหยัดเวลาการทำงานได้มาก
  - ❖ ต้องมีจำนวนปัญหาย่อยทั้งหมดไม่มาก
- ❖ optimal substructures (principle of optimality) :
  - ❖ คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาใหญ่ได้มาจากคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาที่เล็กกว่า
  - ❖ ทำให้เขียน recurrence ของคุณภาพของคำตอบได้
  - ❖ คิด : ใช้คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาเล็กใด และเลือกอย่างไร

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i-1, j-1) + 1 & \text{if } x_i = y_j \\ \max(L(i-1, j), L(i, j-1)) & \text{if } x_i \neq y_j \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

## Optimal Substructures

LCS("HELLO", "HERO") คือ LCS("HELL", "HER") ต่อด้วย "O"



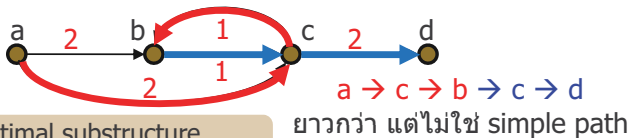
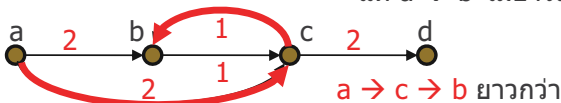
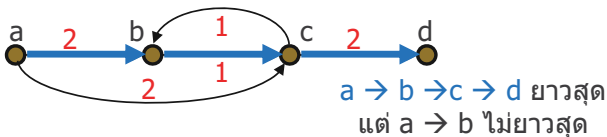
ถ้าทางเดินสั้นสุดจาก 1 ไป 7 คือ  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7$   
แสดงว่า

- ทางจาก 1 ไป 4 ซึ่งคือ  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4$  ต้องสั้นสุดด้วย
- ทางจาก 1 ไป 6 ซึ่งคือ  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6$  ต้องสั้นสุดด้วย
- ทางจาก 2 ไป 6 ซึ่งคือ  $2 \rightarrow 4 \rightarrow 6$  ต้องสั้นสุดด้วย
- ทางจาก 2 ไป 7 ซึ่งคือ  $2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7$  ต้องสั้นสุดด้วย

ปัญหา optimization ไม่จำเป็นต้องมี  
optimal substructure เสมอไป

## Longest Simple Path

Simple path คือ path ที่ไม่ผ่านปมซ้ำ



ไม่มี optimal substructure  
ใช้ dynamic programming ไม่ได้

## 0/1 Knapsack

- ❖ ของ  $n$  ชิ้นมีหมายเลข :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละชิ้นหนัก :  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$
- ❖ แต่ละชิ้นมีมูลค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ถุงเป้หนึ่งใบจุของได้หนักไม่เกิน  $W$
- ❖ ปัญหา : จงเลือกของใส่ถุง เพื่อให้
  - ❖ ถุงไม่ขาด
  - ❖ ได้มูลค่ารวมมากที่สุด

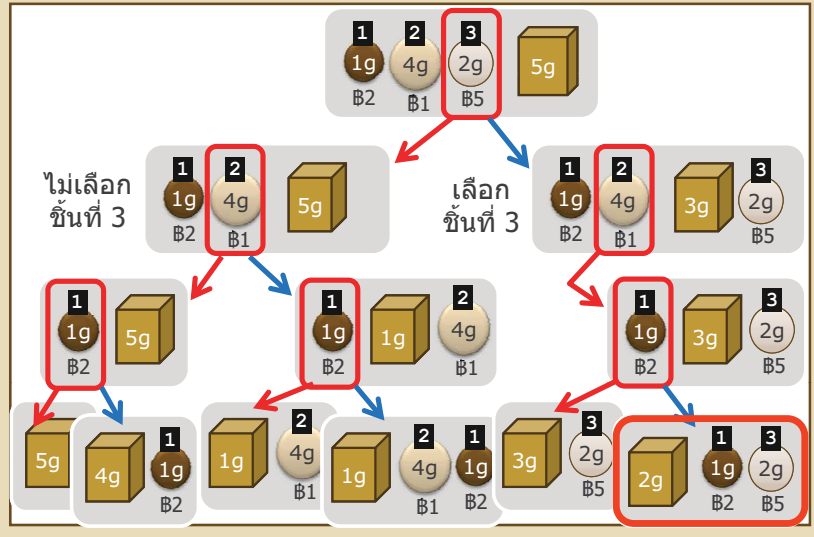


## 0/1 Knapsack

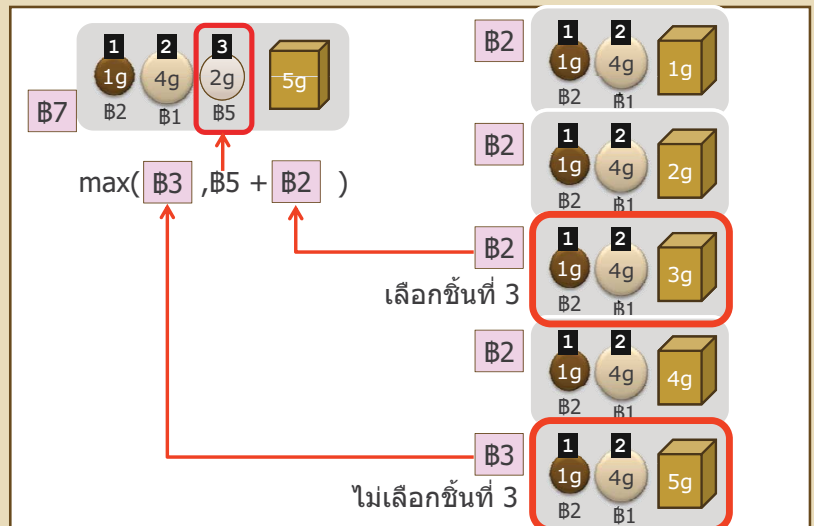
- ❖ ของ  $n$  ชิ้นมีหมายเลข :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละชิ้นหนัก :  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$
- ❖ แต่ละชิ้นมีมูลค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ถุงเป้หนึ่งใบจุของได้หนักไม่เกิน  $W$
- ❖ หา  $\langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle$ ,  $x_k = 0$  หรือ  $1$

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{k=1}^n x_k v_k \\ & \text{subject to} \quad \sum_{k=1}^n x_k w_k \leq W \\ & \quad \quad \quad x_k \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

## แบ่งปัญหาใหญ่เป็นปัญหาย่อย



## หาคำตอบใหญ่จากคำตอบเล็ก



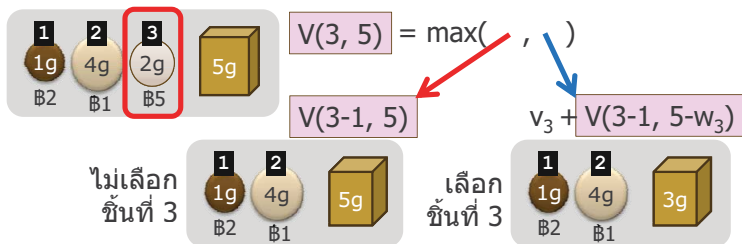


## ปัญหาใหญ่ : ปัญหาย่อย

- ❖ **LCS** :  $L(i, j)$ 
    - ❖ ปัญหาใหญ่หรือเล็กขึ้นกับความยาวของลำดับ  $X_i$  และ  $Y_j$
  - ❖ **Edit distance** :  $D(i, j)$
  - ❖ **Knapsack** :  $V(?)$ 
    - ❖ ปัญหาใหญ่หรือเล็กขึ้นกับจำนวนของ และน้ำหนักที่บรรจุได้
- $V(i, j)$  : มูลค่ารวมสูงสุดในการ
- ❖ เลือกของชิ้นที่ 1, 2, 3, ...,  $i$
  - ❖ ใส่ลงเป้ที่รับน้ำหนักได้ไม่เกิน  $j$

เขียน recurrence ของ  $V(i, j)$

## เขียน recurrence $V(i, j)$



$V(i, j)$  แทนมูลค่าของการเลือกที่ดีที่สุดเมื่อมีของให้เลือกชิ้นที่ 1, 2, ...,  $i$  ใส่ลงเป้ที่จุได้หนัก  $j$

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j-w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

## Knapsack : Top-down

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j - w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

```

V( v[1..n], w[1..n], W ) {
    return V(v, w, n, W)
}
V( v[1..n], w[1..n], i, j ) {
    if (i == 0 OR j == 0) return 0
    if (j < w[i]) {
        return V(v, w, i-1, j)
    } else {
        return max( V(v, w, i-1, j),
                    V(v, w, i-1, j-w[i]) + v[i] )
    }
}

```

## Top-down + Memoization

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j - w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

```

V(v[1..n], w[1..n], i, j, M[1..n][1..W]) {
    if (i == 0 || j == 0) return 0
    if (M[i][j] > 0) return M[i][j]
    if (j < w[i]) {
        return M[i][j] = V(v, w, i-1, j)
    } else {
        return M[i][j] = max( V(v, w, i-1, j),
                             V(v, w, i-1, j-w[i]) )
    }
}

```

## 0/1 Knapsack : Bottom-Up

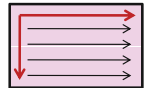
$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j - w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

				j										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	i	j											
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	1	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
30	2	2	0	0	30	30	50	50	50	50	50	50	50	50
66	3	3	0	0	30	66	66	96	96	96	116	116	116	116
40	4	4	0	0	30	66	66	96	96	96	116	116	136	136
60	5	5	0	0	30	66	66	96	96	96	116	126	136	156

W = 10

## 0/1 Knapsack : Bottom-Up

```
knapsack_value(v[1..n], w[1..n], W) {
    v = new array[0..n][0..W]
    for (i = 0; i <= n; i++) v[i][0] = 0
    for (j = 0; j <= W; j++) v[0][j] = 0
    for (i = 1; i <= n; i++)
        for (j = 1; j <= W; j++)
            if (j < w[i])
                v[i][j] = v[i-1][j]
            else
                v[i][j] = max(v[i-1][j], v[i-1][j-w[i]] + v[i])
    return v
}
```



$\Theta(nW)$

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j - w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

## อยากรู้เลือกอะไร : จำผลการตัดสินใจ

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j - w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j					
		0	1	2	3	4	5
i	v <sub>i</sub>	0	0	0	0	0	0
	w <sub>i</sub>	0	0	0	0	0	0
	20	2	1	20	20	20	20
	30	2	2	0	30	30	50
25	3	3	0	0	30	30	50

W = 5

## ใช้ผลการตัดสินใจสร้างคำตอบ

		j					
		0	1	2	3	4	5
i	v <sub>i</sub>	0	0	0	0	0	0
	w <sub>i</sub>	0	0	0	0	0	0
	20	2	1	20	20	20	20
	30	2	2	0	30	30	50
25	3	3	0	0	30	30	50

## 0/1 Knapsack : จำการตัดสินใจ

```

knapsack(v[1..n], w[1..n], W) {
  V = new array[0..n][0..W]
  X = new array[1..n][1..W]
  for (i = 0; i <= n; i++) V[i][0] = 0
  for (j = 0; j <= W; j++) V[0][j] = 0
  for (i = 1; i <= n; i++)
    for (j = 1; j <= W; j++)
      if (j < w[i])
        V[i][j] = V[i-1][j]; X[i][j] = ✖
      else
        if ( V[i-1][j] > v[i]+V[i-1][j - w[i]] ) {
          V[i][j] = V[i-1][j]
          X[i][j] = ✖
        } else {
          V[i][j] = v[i] + V[i-1][j - w[j]]
          X[i][j] = ✔
        }
    }
}

```

## 0/1 Knapsack : จำการตัดสินใจ

```

S = an empty set
i = n; j = W
while (i > 0 AND j > 0) {
  if ( X[i][j] == ✔ ) {
    S.add(i);
    j = j - w[i];
  }
  i--
}
return S;
}

```

		j					
		0	1	2	3	4	5
i	$v_i$	0	0	0	0	0	0
	$w_i$	0	2	2	3	4	5
	20	1	✖	✔	✔	✔	✔
	30	2	✖	✔	✔	✔	✔
25	3	0	✖	✖	✖	✖	✔

## ต้องการประหยัด ไม่จำผลการตัดสินใจ

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j-w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
v <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20	2	1	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20
30	2	2	0	0	30	30	50	50	50	50	50	50	
66	3	3	0	0	30	66	66	96	96	116	116	116	116
40	4	4	0	0	30	66	66	96	96	116	116	136	136
60	5	5	0	0	30	66	66	96	96	116	126	136	156

$i = 0 \text{ or } j = 0 ? \rightarrow \text{false}$   
 $j < w_i ? \rightarrow \text{false}$   
 $V(i, j) = v_i + V(i-1, j-w_i) ? \rightarrow \text{true} \rightarrow \text{เลือกชั้นที่ 5}$

## แล้วเลือกของชิ้นใดบ้าง ?

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j-w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	2	1	0	0	20	20	20	20	20	20	20
30	2	2	0	0	30	30	50	50	50	50	50	
66	3	3	0	0	30	66	66	96	96	116	116	116
40	4	4	0	0	30	66	66	96	96	116	116	136
60	5	5	0	0	30	66	66	96	96	116	126	136

$i = 0 \text{ or } j = 0 ? \rightarrow \text{false}$   
 $j < w_i ? \rightarrow \text{false}$   
 $V(i, j) = v_i + V(i-1, j-w_i) ? \rightarrow \text{false}$

## แล้วเลือกของชิ้นใดบ้าง ?

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j-w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	2	1	0	0	20	20	20	20	20	20	20
30	2	2	0	0	30	30	50	50	50	50	50	50
66	3	3	0	0	30	66	66	96	96	116	116	116
40	4	4	0	0	30	66	66	96	96	116	116	136
60	5	5	0	0	30	66	66	96	96	116	126	136
60	5	5	0	0	30	66	66	96	96	116	126	136

$i = 0$  or  $j = 0$  ?

→ false

$j < w_i$  ?

→ false

$V(i, j) = v_i + V(i-1, j-w_i)$  ? → true → เลือกชิ้นที่ 3

## แล้วเลือกของชิ้นใดบ้าง ?

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j-w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	2	1	0	0	20	20	20	20	20	20	20
30	2	2	0	0	30	30	50	50	50	50	50	50
66	3	3	0	0	30	66	66	96	96	116	116	116
40	4	4	0	0	30	66	66	96	96	116	116	136
60	5	5	0	0	30	66	66	96	96	116	126	136

$i = 0$  or  $j = 0$  ?

→ false

$j < w_i$  ?

→ false

$V(i, j) = v_i + V(i-1, j-w_i)$  ? → true → เลือกชิ้นที่ 2

## แล้วเลือกของชิ้นใดบ้าง ?

$$V(i, j) = \begin{cases} \max(V(i-1, j), v_i + V(i-1, j - w_i)) & \text{if } i > 0 \text{ and } j \geq w_i \\ V(i-1, j) & \text{if } j < w_i \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

		j										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v <sub>i</sub>	w <sub>i</sub>	i										
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
30	2	0	0	30	30	50	50	50	50	50	50	50
66	3	0	0	30	66	66	96	96	116	116	116	116
40	4	0	0	30	66	66	96	96	116	116	136	136
60	5	0	0	30	66	66	96	96	116	126	136	156

$i = 0 \text{ or } j = 0 ? \quad \rightarrow \text{true}$

## knapsack\_Soln(v, w, V)

```
knapsack_Soln( v[1..n], w[1..n], V[0..n][0..W] ) {
  S = an empty set
  i = n; j = W
  while ( i > 0 AND j > 0 ) {
    if ( j >= w[i] AND
         V[i][j] == v[i] + V[i-1][j - w[i]] ) {
      S.add(i);
      j = j - w[i];
    }
    i--
  }
  return S;
}
```



## ทอนเงิน

- ❖ มีเหรียญอยู่  $n$  แบบ :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละแบบมีค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ต้องการทอนเงินให้ลูกค้ามูลค่า  $V$
- ❖ โดยใช้เหรียญเป็นจำนวนน้อยสุด
  - ❖ (มีเหรียญแต่ละแบบจำนวนไม่จำกัด)
- ❖ ตัวอย่าง
  - ❖ มีเหรียญ :  $1, 3, 4, 10$
  - ❖ ต้องการทอนเงินมูลค่า  $6$
  - ❖ คำตอบ :  $3, 3$

ลองทำเอง  
คล้าย ๆ Knapsack

## Sum of Subset

- ❖ กำหนดให้
  - ❖  $S$  เป็นเซตของจำนวน
  - ❖  $K$  เป็นจำนวน
- ❖ จงหาว่า
  - ❖ มีเซตย่อยของ  $S$  ที่ผลรวมของจำนวนมีค่าเท่ากับ  $K$  หรือไม่
- ❖ ตัวอย่าง
  - ❖  $S = \{1, 3, 2, 9, 8\}, K = 11 \rightarrow$  คำตอบ : มี
  - ❖  $S = \{1, 3, 2, 9, 8\}, K = 7 \rightarrow$  คำตอบ : ไม่มี

ลองทำเอง  
คล้าย ๆ Knapsack

## Maximum Contiguous Sum

### ❖ กำหนดให้

❖  $A$  คือลำดับของจำนวน  $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$

### ❖ จงหา

❖ ช่วงของข้อมูลที่ติดกันใน  $A$  ที่ผลรวมมีค่ามากที่สุด

### ❖ ตัวอย่าง

❖  $A = \langle 31, -41, 59, 26, -53, 58, 97, -93, -23, 84 \rangle$

### ❖ แนวคิด

❖ ลุยทุกช่วงของข้อมูล มีทั้งหมด  $C(n,2)$  ช่วง ใช้เวลา  $\Theta(n^2)$

❖ ใช้การแบ่งแยกและเอาชนะ

ลองทำเอง ❖ แบ่งครึ่ง, หาฝั่งซ้าย, หาฝั่งขวา, หาข้ามฝั่ง

❖ ใช้เวลา  $\Theta(n \log n)$

## Dynamic Programming

### ❖ เขียน recurrence ของผลรวม

❖  $P(i)$  คือผลรวมของข้อมูลที่ติดกันใน  $A$  ที่มีค่ามากที่สุด โดยให้ตัวท้ายสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $i$

$$P(i) = \max(P(i-1) + a_i, a_i) \quad P(1) = a_1$$

❖  $S(i)$  คือผลรวมของข้อมูลที่ติดกันใน  $A[1..i]$  ที่มีค่ามากที่สุด (คำตอบก็คือ  $S(n)$ )

$$S(i) = \max_{1 \leq k \leq i} \{ P(k) \} = \max( \max_{1 \leq k \leq i-1} \{ P(k) \}, P(i) )$$

$$S(i) = \max(S(i-1), P(i)) \quad S(1) = a_1$$

$$A = \langle 2, 1, -4, 2 \rangle \rightarrow P(1) = 2, P(2) = 3, P(3) = -1, P(4) = 2 \\ S(1) = 2, S(2) = 3, S(3) = 3, S(4) = 3$$

# Dynamic Programming

```

MCS_Value(A[1..n]) {
  create S[1..n], P[1..n];
  P[1] = A[1];
  for (i = 2; i <= n; i++)
    P[i] = max(P[i - 1] + A[i], A[i]);
  S[1] = A[1];
  for (i = 2; i <= n; i++)
    S[i] = max(S[i - 1], P[i]);
  return S;
}

```

$$P(i) = \max(P(i-1) + a_i, a_i)$$

$$S(i) = \max(S(i-1), P(i))$$

ทำอย่างไร ถ้าต้องการหาช่วงของ A ที่ผลรวมมีค่ามากที่สุด

```

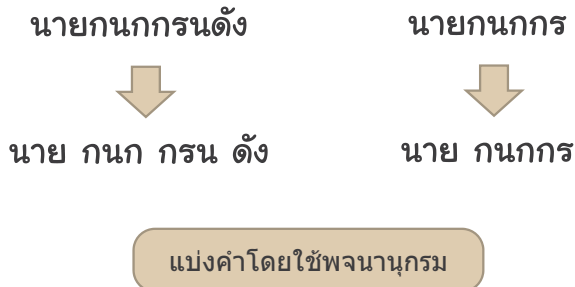
MCS_Value(A[1..n]) {
  P = A[1]; S = A[1];
  for (i = 2; i <= n; i++) {
    P = max(P + A[i], A[i]);
    S = max(S, P);
  }
  return S;
}

```

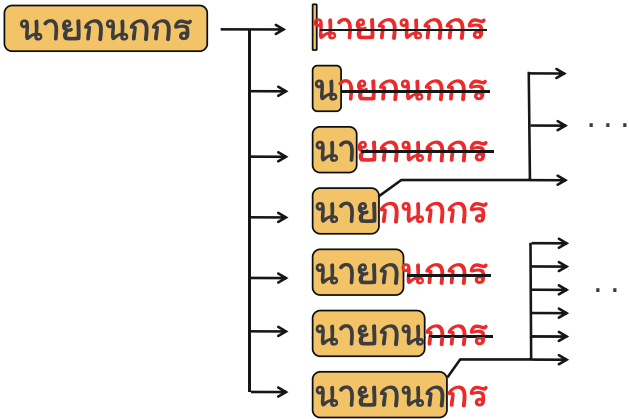
 $\Theta(n)$ 

## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ

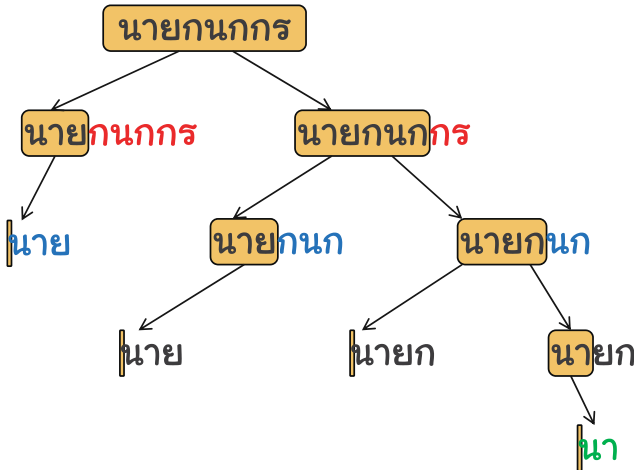
- ❖ **Input** : ข้อความภาษาไทย
- ❖ **Output** : รายการสั้นสุดของคำที่ตัดจากข้อความ



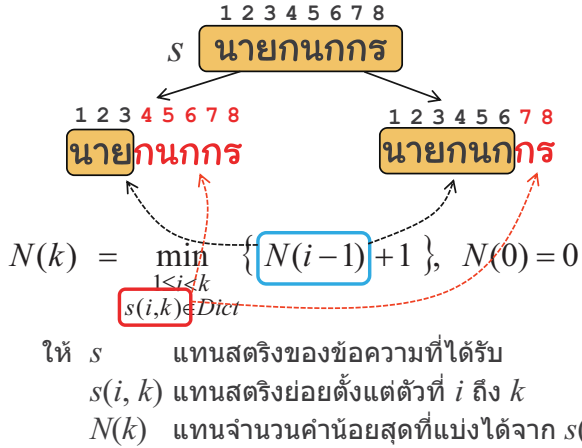
## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Top-Down



## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Top-Down



## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Top-Down



## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Top-Down

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, N(0) = 0$$

```

N( dict, s[1..n], k ) {
  if (k == 0) return 0
  minN = ∞
  for (i = 1; i < k; i++) {
    if ( s[i..k] ∈ dict ) {
      minN = min( minN, 1 + N( dict, s, i-1 ) )
    }
  }
  return minN
}
    
```

จำนวนคำน้อยสุดที่แบ่งจากข้อความ

## ต้องการรายการของคำ

```

WordSep( dict, s[1..n], k ) {
    if (k == 0) return an empty list
    minN = ∞
    minWords = null
    for (i = 1; i < k; i++) {
        if ( s[i..k] ∈ dict ) {
            words = WordSep( dict, s, i-1 )
            if (words ≠ null) {
                words.add( s[i..k] )
                if ( words.size() < minN ) {
                    minN = words.size()
                    minWords = words
                }
            }
        }
    }
    return minWords
}
    
```

Overlapping Subproblems  
(ลองยกตัวอย่าง)

## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

$k = 2$



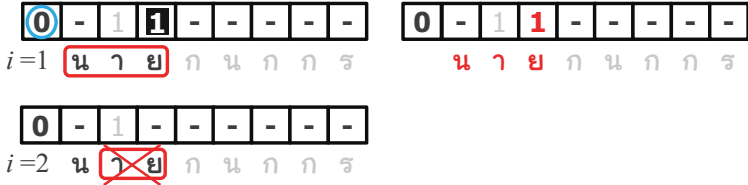
$i=1$     น    า    ย    ก    น    ก    ก    ร

น    า    ย    ก    น    ก    ก    ร

## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

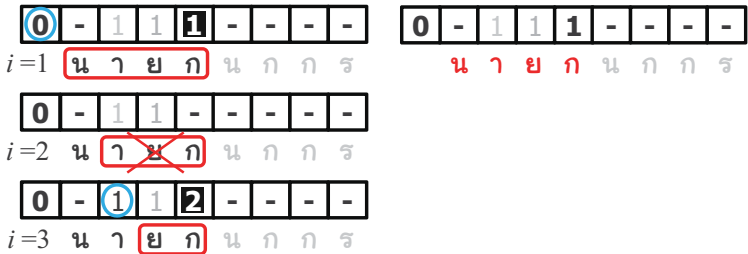
$k = 3$



## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

$k = 4$



## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

$$N(k) = \min_{1 \leq i < k} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

$k = 5$

$s(i,k) \in Dict$

	0	-	1	1	1	-	-	-	-	0	-	1	1	1	2	-	-	-
$i=1$	น	า	<del>ย</del>	ก	น	ก	ก	ร	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร		
	0	-	1	1	1	-	-	-	-									
$i=2$	น	<del>า</del>	<del>ย</del>	<del>ก</del>	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	-	-	-	-									
$i=3$	น	า	<del>ย</del>	<del>ก</del>	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	-	-	-									
$i=4$	น	า	ย	<del>ก</del>	น	ก	ก	ร										

## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

$$N(k) = \min_{1 \leq i < k} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

$k = 6$

$s(i,k) \in Dict$

	0	-	1	1	1	2	-	-	-	0	-	1	1	1	2	2	-	-
$i=1$	น	า	<del>ย</del>	ก	น	ก	ก	ร	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร		
	0	-	1	1	1	2	-	-	-									
$i=2$	น	<del>า</del>	<del>ย</del>	<del>ก</del>	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	-	-	-									
$i=3$	น	า	<del>ย</del>	<del>ก</del>	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	2	-	-									
$i=4$	น	า	ย	<del>ก</del>	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	2	-	-									
$i=5$	น	า	ย	ก	<del>น</del>	ก	ก	ร										



## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

$$N(k) = \min_{1 \leq i < k} \{ N(i-1) + 1 \}, N(0) = 0$$

$s(i,k) \in \text{Dict}$

$k = 7$

<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=1</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=2</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=3</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=4</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=5</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> </table>	0	-	1	1	1	2	2	-	-	$i=1$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	-	-	$i=2$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	-	-	$i=3$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	-	-	$i=4$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	-	-	$i=5$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=6</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=7</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> </table>	0	-	1	1	1	2	2	3	-	$i=6$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	3	-	$i=7$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร								
0	-	1	1	1	2	2	-	-																																																																																																																							
$i=1$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																															
0	-	1	1	1	2	2	-	-																																																																																																																							
$i=2$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																															
0	-	1	1	1	2	2	-	-																																																																																																																							
$i=3$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																															
0	-	1	1	1	2	2	-	-																																																																																																																							
$i=4$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																															
0	-	1	1	1	2	2	-	-																																																																																																																							
$i=5$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																															
0	-	1	1	1	2	2	3	-																																																																																																																							
$i=6$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																															
0	-	1	1	1	2	2	3	-																																																																																																																							
$i=7$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																															

## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

$$N(k) = \min_{1 \leq i < k} \{ N(i-1) + 1 \}, N(0) = 0$$

$s(i,k) \in \text{Dict}$

$k = 8$

<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=1</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=2</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=3</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=4</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=5</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> </table>	0	-	1	1	1	2	2	3	-	$i=1$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	3	-	$i=2$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	3	-	$i=3$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	3	2	$i=4$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	3	-	$i=5$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=6</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=7</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</td> </tr> <tr> <td colspan="9"><math>i=8</math> น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร</td> </tr> </table>	0	-	1	1	1	2	2	3	-	$i=6$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	3	3	$i=7$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร									0	-	1	1	1	2	2	3	2	$i=8$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร								
0	-	1	1	1	2	2	3	-																																																																																																																																									
$i=1$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																																																	
0	-	1	1	1	2	2	3	-																																																																																																																																									
$i=2$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																																																	
0	-	1	1	1	2	2	3	-																																																																																																																																									
$i=3$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																																																	
0	-	1	1	1	2	2	3	2																																																																																																																																									
$i=4$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																																																	
0	-	1	1	1	2	2	3	-																																																																																																																																									
$i=5$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																																																	
0	-	1	1	1	2	2	3	-																																																																																																																																									
$i=6$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																																																	
0	-	1	1	1	2	2	3	3																																																																																																																																									
$i=7$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																																																	
0	-	1	1	1	2	2	3	2																																																																																																																																									
$i=8$ น <del>า</del> <del>ย</del> <del>ก</del> น ก ก ร																																																																																																																																																	

## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

```

N( dict, s[1..n] ) {
  N = new array[0..n]
  N[0] = 0; N[1..n] = ∞
  for( k = 2; k <= n; k++ ) {
    for( i = 1; i < k; i++ ) {
      if ( s[i..k] ∈ dict ) {
        N[k] = min( N[k], N[i-1]+1 )
      }
    }
  }
  return N
}

```

ถ้าการค้นในพจนานุกรม ใช้เวลา  $\Theta(1)$

$\Theta(n^2)$

จำนวนค่าน้อยสุดที่แบ่งจากข้อความ

## ต้องการรายการของคำ

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

ที่แต่ละค่าของ  $k$

ต้องจำว่า  $i$  ใดที่ได้ค่า  $N(i-1) + 1$  น้อยสุด

## จำค่า $i$ ที่ได้ min

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

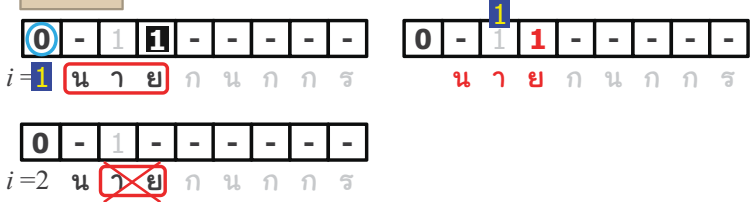
$k = 2$



## จำค่า $i$ ที่ได้ min

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

$k = 3$



## จำนวน $i$ ที่ได้ min

$$N(k) = \min_{1 \leq i < k} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

$k = 4$

$s(i, k) \in \text{Dict}$

**0** - 1 1 **1** - - - -

$i = 1$  น ำ ย ก น ก ก ร

0 - **1** **1** **1** - - - -

น ำ ย ก น ก ก ร

0 - 1 1 - - - -

$i = 2$  น ~~ำ~~ ~~ย~~ ก น ก ก ร

0 - **1** 1 **2** - - - -

$i = 3$  น ำ **ย** ก น ก ก ร

## จำนวน $i$ ที่ได้ min

$$N(k) = \min_{1 \leq i < k} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

$k = 5$

$s(i, k) \in \text{Dict}$

0 - 1 1 1 - - - -

$i = 1$  น ~~ำ~~ ~~ย~~ ~~ก~~ ~~น~~ ก ก ร

0 - **1** **1** **1** **2** - - - -

น ำ ย ก น ก ก ร

0 - 1 1 1 - - - -

$i = 2$  น ~~ำ~~ ~~ย~~ ~~ก~~ ~~น~~ ก ก ร

0 - 1 1 1 - - - -

$i = 3$  น ำ ~~ย~~ ~~ก~~ ~~น~~ ก ก ร

0 - 1 **1** 1 **2** - - - -

$i = 4$  น ำ ย **ก** **น** ก ก ร

## จำค่า $i$ ที่ได้ min

$$N(k) = \min_{1 \leq i < k} \{ N(i-1) + 1 \}, N(0) = 0$$

$k = 6$

$s(i,k) \in Dict$

	0	-	1	1	1	2	-	-	-	0	-	1	1	1	2	2	-	-
$i=1$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร		
	0	-	1	1	1	2	-	-	-									
$i=2$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	-	-	-									
$i=3$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	2	-	-									
$i=4$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	2	-	-									
$i=5$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร										

## จำค่า $i$ ที่ได้ min

$$N(k) = \min_{1 \leq i < k} \{ N(i-1) + 1 \}, N(0) = 0$$

$k = 7$

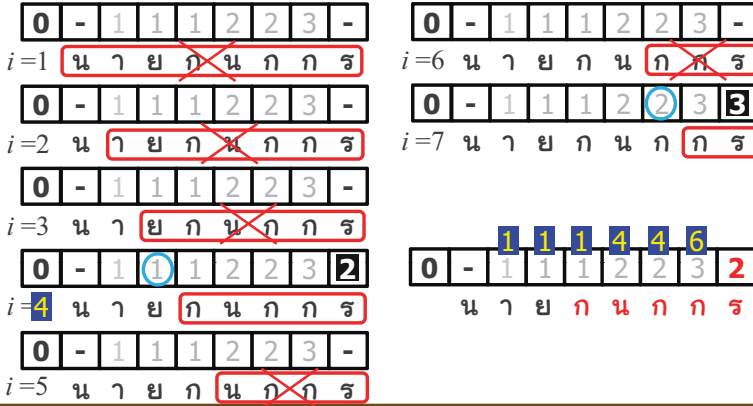
$s(i,k) \in Dict$

	0	-	1	1	1	2	2	-	-	0	-	1	1	1	2	2	3	-
$i=1$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร	$i=6$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร	
	0	-	1	1	1	2	2	-	-									
$i=2$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	2	-	-									
$i=3$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	2	-	-									
$i=4$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร										
	0	-	1	1	1	2	2	-	-									
$i=5$	น	า	ย	ก	น	ก	ก	ร										

## จำค่า $i$ ที่ได้ min

$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

$k = 8$

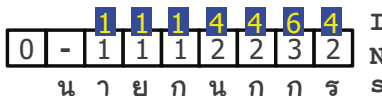


## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up

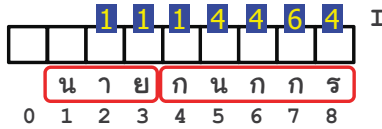
$$N(k) = \min_{\substack{1 \leq i < k \\ s(i,k) \in \text{Dict}}} \{ N(i-1) + 1 \}, \quad N(0) = 0$$

```

WordSep( dict, s[1..n] ) {
    N = new array[0..n]
    N[0] = 0; N[1..n] = ∞
    I = new array[1..n]
    for( k = 2; k <= n; k++ )
        for( i = 1; i < k; i++ )
            if ( s[i..k] ∈ dict )
                if ( N[i-1]+1 < N[k] ) {
                    N[k] = N[i-1]+1
                    I[k] = i
                }
    }
}
    
```



## ตัดข้อความเป็นคำ ๆ : Bottom-Up



```

minWords = an empty list
k = n
while (k > 0) {
    minWords = s[ I[k], k ] + minWords
    k = I[k] - 1
}
return minWords
}

```

## Longest Increasing Subsequence

## ❖ กำหนดให้

❖  $A$  คือลำดับของจำนวน  $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$

## ❖ จงหา

❖ subsequence ที่ยาวที่สุดของ  $A$  ที่มีค่าเรียงจากน้อยไปมาก

## ❖ ตัวอย่าง

❖  $A = \langle 31, -41, 59, 26, -53, 58, 97, -93, -23, 84 \rangle$

❖ คำตอบคือ  $\langle -41, 26, 58, 97 \rangle$

ลองทำดู

## Matrix-Chain Multiplication

$$A_1 A_2 A_3 A_4$$

$$(A_1(A_2(A_3A_4)))$$

$$(A_1((A_2A_3)A_4))$$

$$((A_1A_2)(A_3A_4))$$

$$(((A_1A_2)A_3)A_4)$$

$$((A_1(A_2A_3))A_4)$$

วงเล็บกำหนดลำดับการคูณ

ลำดับการคูณต่างกันใช้เวลาคูณต่างกัน

จงหาวิธีการใส่วงเล็บที่ใช้เวลาการคูณเร็วที่สุด

## Matrix Multiplication

$$C = A \times B \quad \text{ต้องคูณด้วย *}$$

$[p \times r]$      $[p \times q]$      $[q \times r]$     จำนวน  $pqr$  ครั้ง

```

mult(A[1..p][1..q], B[1..q][1..r]) {
  create C[1..p][1..r]
  for (i = 1; i <= p; i++) {
    for (j = 1; j <= r; j++) {
      C[i][j] = 0
      for (k = 1; k <= q; k++) {
        C[i][j] += A[i][k] * B[k][j];
      }
    }
  }
  return C;
}

```

$$c_{i,j} = \sum_{k=1}^q a_{i,k} b_{k,j}$$



## ลำดับการคูณต่างกัน ใช้เวลาต่างกัน

$$\diamond A_1 \quad A_2 \quad A_3$$

$$[10 \times 100], [100 \times 5], [5 \times 50]$$

 $\diamond$  คูณตามลำดับ  $((A_1 A_2) A_3)$ 

$$\diamond (A_1 A_2) \text{ ต้องคูณด้วย } * \text{ จำนวน } 10 \times 100 \times 5 = 5,000 \text{ ครั้ง}$$

$$\diamond \text{ ได้เมทริกซ์ } A_{12} \text{ ขนาด } [10 \times 5]$$

$$\diamond (A_{12} A_3) \text{ ต้องคูณด้วย } * \text{ จำนวน } 10 \times 5 \times 50 = 2,500 \text{ ครั้ง}$$

$$\diamond \text{ รวมเป็น } = \underline{7,500} \text{ ครั้ง}$$

 $\diamond$  คูณตามลำดับ  $(A_1 (A_2 A_3))$ 

$$\diamond (A_2 A_3) \text{ ต้องคูณด้วย } * \text{ จำนวน } 100 \times 5 \times 50 = 25,000 \text{ ครั้ง}$$

$$\diamond \text{ ได้เมทริกซ์ } A_{23} \text{ ขนาด } [100 \times 50]$$

$$\diamond (A_1 A_{23}) \text{ ต้องคูณด้วย } * \text{ จำนวน } 10 \times 100 \times 50 = 50,000 \text{ ครั้ง}$$

$$\diamond \text{ รวมเป็น } = \underline{75,000} \text{ ครั้ง}$$

## ใส่วงเล็บได้กี่รูปแบบ

$$A_1 \quad A_2 \quad A_3 \quad A_4 \quad A_5$$

$$(A_1) (A_2 A_3 A_4 A_5) \rightarrow 1 \times 5$$

$$(A_1 A_2) (A_3 A_4 A_5) \rightarrow 1 \times 2$$

$$(A_1 A_2 A_3) (A_4 A_5) \rightarrow 2 \times 1$$

$$(A_1 A_2 A_3 A_4) (A_5) \rightarrow 5 \times 1$$

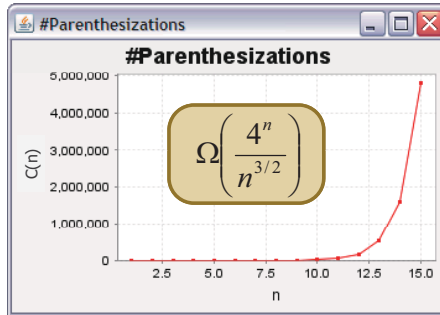
$C(n)$  คือจำนวนการใส่วงเล็บกรณีมี  $n$  ตัว

$$\underbrace{(A_1 \dots A_k)}_{C(k)} \quad \underbrace{(A_{k+1} \dots A_n)}_{C(n-k)}$$

$$C(n) = \sum_{k=1}^{n-1} (C(k) C(n-k))$$

# ใส่วงเล็บได้กี่รูปแบบ

$$C(n) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n-1} (C(k)C(n-k)) & n \geq 3 \\ 1 & n \leq 2 \end{cases}$$



ช้ามาก ๆ ถ้าต้องลองทุกรูปแบบ

## นิยาม

- ❖ ต้องการหาวิธีใส่วงเล็บของ  $A_1 A_2 \dots A_n$
- ❖  $A_1$  มีขนาด  $p_0 \times p_1$
- ❖  $A_2$  มีขนาด  $p_1 \times p_2$
- ...
- ❖  $A_n$  มีขนาด  $p_{n-1} \times p_n$
- ❖  $A_i \dots A_j$  มีขนาด  $p_{i-1} \times p_j$
- ❖ ยังไม่หาวิธีการใส่วงเล็บที่ดีที่สุด
- ❖ ขอหาจำนวนการคูณด้วย \* ของการใส่วงเล็บที่ดีที่สุด
- ❖  $m(i, j) =$  จำนวน \* น้อยสุดเพื่อหาผลคูณ  $A_i \dots A_j$
- ❖  $m(1, n)$  คือคำตอบที่ต้องการ

## จำนวนการคูณ

$m(i, j)$  คือจำนวนการคูณด้วย \* น้อยสุดของการคูณ  $A_i A_{i+1} \dots A_j$

คูณ  $A_i \dots A_k$  ใช้  $m(i, k)$  ได้เมทริกซ์ขนาด  $[p_{i-1} \times p_k]$

คูณ  $A_{k+1} \dots A_j$  ใช้  $m(k+1, j)$  ได้เมทริกซ์ขนาด  $[p_k \times p_j]$

คูณเมทริกซ์ทั้งสองใช้  $p_{i-1} p_k p_j$

$$\underbrace{[p_{i-1} \times p_k]}_{(A_i \dots A_k)} \quad \underbrace{[p_k \times p_j]}_{(A_{k+1} \dots A_j)}$$

$$m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j$$

จำนวนการคูณด้วย \* น้อยสุด เมื่อแบ่งที่  $k$

## จำนวนการคูณน้อยสุด

$m(i, j)$  คือจำนวนการคูณด้วย \* น้อยสุดของการคูณ  $A_i A_{i+1} \dots A_j$

$$\underbrace{(A_i \dots A_k)}_{m(i, k)} \quad \underbrace{(A_{k+1} \dots A_j)}_{m(k+1, j)}$$

$$m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j$$

$$(A_1) (A_2 A_3 A_4 A_5) \quad m(1,1) + m(2,5) + p_0 p_1 p_5$$

$$(A_1 A_2) (A_3 A_4 A_5) \quad m(1,2) + m(3,5) + p_0 p_2 p_5$$

$$(A_1 A_2 A_3) (A_4 A_5) \quad m(1,3) + m(4,5) + p_0 p_3 p_5$$

$$(A_1 A_2 A_3 A_4) (A_5) \quad m(1,4) + m(5,5) + p_0 p_4 p_5$$

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

## MCM : Top-down

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

```

mcm( p[0..n], i, j ) {
    if ( i == j ) return 0;

    minMCM = ∞;
    for( k = i; k <= j-1; k++ ) {
        minMCM = min( minMCM,
                      mcm(p, i, k) +
                      mcm(p, k+1, j) +
                      p[i-1]*p[k]*p[j] );
    }
    return minMCM;
}

```

## Top-down + Memoization

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

```

mcm( p[0..n], i, j, M[1..n][1..n] ) {
    if ( i == j ) return 0;
    if ( M[i][j] > 0 ) return M[i][j];
    M[i][j] = ∞;
    for( k = i; k <= j-1; k++ ) {
        M[i][j] = min( M[i][j],
                      mcm(p, i, k, M) +
                      mcm(p, k+1, j, M) +
                      p[i-1]*p[k]*p[j] );
    }
    return M[i][j];
}

```

## MCM : Bottom-Up

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

i \ j	1	2	3	4	5
1					
2		m(2,2)	m(2,3)	m(2,4)	m(2,5)
3					m(3,5)
4					m(4,5)
5					m(5,5)

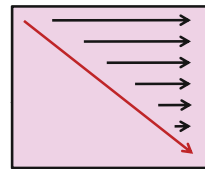
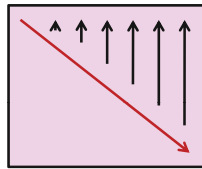
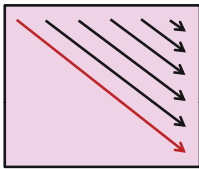
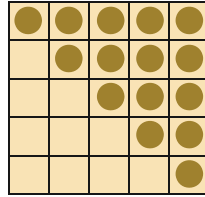
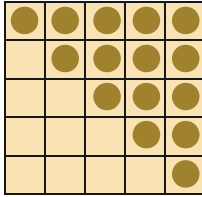
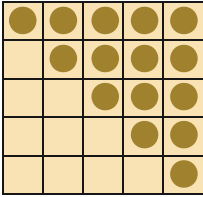
## คำตอบใหญ่ได้จากคำตอบย่อย

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

i \ j	1	2	3	4	5
1	m(1,1)	m(2,2)	m(2,3)	m(2,4)	m(1,5)
2					m(2,5)
3					m(3,5)
4					m(4,5)
5					m(5,5)

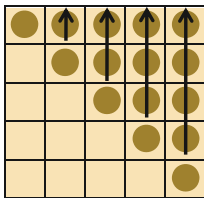
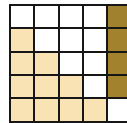
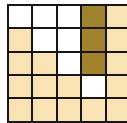
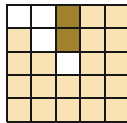
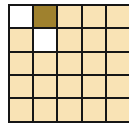
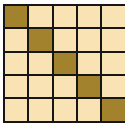
## เติมตารางได้หลายรูปแบบ

เติมค่าตอบเล็กก่อนค่าตอบใหญ่



## รูปแบบการเติมตารางคำตอบ

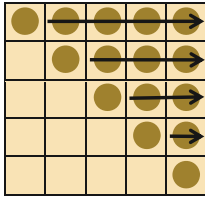
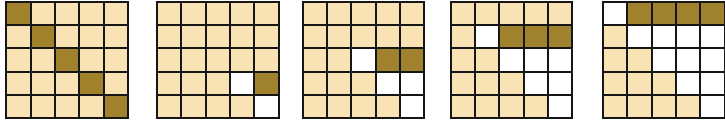
$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$



```
for( i = 1; i <= n; i++ )
    m[i][i] = 0
for( j = 2; j <= n; j++ ) {
    for ( i = j-1; i >= 1; i-- ) {
        m[i][j] = ...
    }
}
```

## รูปแบบการเติมตารางคำตอบ

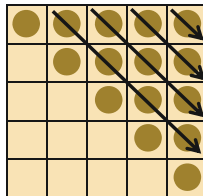
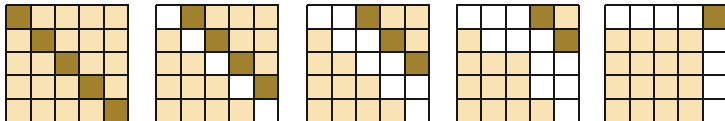
$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$



```
for ( i = 1; i <= n; i++ )
    m[i][i] = 0
for ( i = n-1; i >= 1; i-- ) {
    for ( j = i+1; j <= n; j++ ) {
        m[i][j] = ...
    }
}
```

## รูปแบบการเติมตารางคำตอบ

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$



## ตัวอย่าง

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$A_1 \quad A_2 \quad A_3 \quad A_4 \quad A_5$   
 $10 \times 5 \times 1 \times 5 \times 10 \times 2$

i \ j	1	2	3	4	5
1	0	50			
2		0	25		
3			0	50	
4				0	100
5					0

## ตัวอย่าง

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$A_1 \quad A_2 \quad A_3 \quad A_4 \quad A_5$   
 $10 \times \text{ } \times 5 \times 10 \times 2$

i \ j	1	2	3	4	5
1	0	50	100		
2		0	25		
3			0	50	
4				0	100
5					0

$$0 + 25 + 10 \times 5 \times 5 = 275$$

$$50 + 0 + 10 \times 1 \times 5 = 100$$



## ตัวอย่าง

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$10 \times 5 \times 10 \times 2$

i \ j	1	2	3	4	5
1	0	50	100		
2		0	25	100	
3			0	50	
4				0	100
5					0

$$0 + 50 + 5 \times 10 = 100$$

$$25 + 0 + 5 \times 5 \times 10 = 275$$

## ตัวอย่าง

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$10 \times 5 \times 1 \times 2$

i \ j	1	2	3	4	5
1	0	50	100		
2		0	25	100	
3			0	50	70
4				0	100
5					0

$$0 + 100 + 1 \times 5 \times 2 = 110$$

$$50 + 0 + 1 \times 10 \times 2 = 70$$

## ตัวอย่าง

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$10 \times$   $A_1$   $A_2$   $A_3$   $A_4$   $A_5$   $10 \times 2$

		j				
		1	2	3	4	5
1		0	50	100	200	
2			0	25	100	
3				0	50	70
4					0	100
5						0

$$0 + 100 + 10 \times 5 \times 10 = 600$$

$$50 + 50 + 10 \times 1 \times 10 = \boxed{200}$$

$$100 + 0 + 10 \times 5 \times 10 = 600$$

## ตัวอย่าง

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$10 \times$   $5 \times$   $A_1$   $A_2$   $A_3$   $A_4$   $A_5$   $2$

		j				
		1	2	3	4	5
1		0	50	100	200	
2			0	25	100	80
3				0	50	70
4					0	100
5						0

$$0 + 70 + 5 \times 1 \times 2 = \boxed{80}$$

$$25 + 100 + 5 \times 5 \times 2 = 175$$

$$100 + 0 + 5 \times 10 \times 2 = 200$$

## ตัวอย่าง

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

**A<sub>1</sub> A<sub>2</sub> A<sub>3</sub> A<sub>4</sub> A<sub>5</sub>**

**10 × [ ] 2**

j	1	2	3	4	5
i	1	2	3	4	5
1	0	50	100	200	140
2		0	25	100	80
3			0	50	70
4				0	100
5					0

0 + 80 + 10x5x2 = 180

50 + 70 + 10x1x2 = 140

100 + 100 + 10x5x2 = 300

200 + 0 + 10x10x2 = 400

## วงวนการเติมตารางคำตอบ

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1}p_kp_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

```
for( i = 1; i <= n; i++) M[i][i]=0
for( d = 1; d < n; d++ ) {
    for ( i = 1; i <= n-d; i++ ) {
        j = i + d;
        for ( k = i; k < j; k++ ) {
            M[i][j] = ...
        }
    }
}
```

1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	2,2	2,3	2,4	2,5
		3,3	3,4	3,5
			4,4	4,5
				5,5

d = 1	d = 2	d = 3	d = 4
i, j	i, j	i, j	i, j
1, 2	1, 3	1, 4	1, 5
2, 3	2, 4	2, 5	
3, 4	3, 5		
4, 5			

## MCM : Bottom-up

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

```

mcm_Value( p[0..n] ) {
    M = new array[1..n][1..n]
    for( i = 1; i <= n; i++ ) M[i][i] = 0
    for( d = 1; d < n; d++ ) {
        for ( i = 1; i <= n-d; i++ ) {
            j = i + d;
            M[i][j] = ∞
            for ( k = i; k < j; k++ ) {
                M[i][j] = min( M[i][j],
                    M[i][k] + M[k+1][j] + p[i-1]*p[k]*p[j] );
            }
        }
    }
    return M;
}
    
```

$\Theta(n^3)$

## จำจุดแบ่ง k ที่ได้ค่าน้อยสุด

i \ j	1	2	3	4	5
1	0	<b>1</b> 50	<b>1</b> 100	<b>2</b> 200	<b>2</b> 140
2		0	<b>2</b> 25	<b>2</b> 100	<b>2</b> 80
3			0	<b>3</b> 50	<b>4</b> 70
4				0	<b>4</b> 100
5					0

$(A_i \dots A_k) (A_{k+1} \dots A_j)$

$$m(i, j) = \begin{cases} \min_{i \leq k \leq j-1} \{ m(i, k) + m(k+1, j) + p_{i-1} p_k p_j \} & \text{if } i < j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$

## การใส่วงเล็บที่คูณเร็วสุด

i \ j	1	2	3	4	5
1	0	<b>1</b> 50	<b>1</b> 100	<b>2</b> 200	<b>2</b> 140
2		0	<b>2</b> 25	<b>2</b> 100	<b>2</b> 80
3			0	<b>3</b> 50	<b>4</b> 70
4				0	<b>4</b> 100
5					0

$[1, 5] \rightarrow 2 \quad (A_1 \ A_2) (A_3 \ A_4 \ A_5)$   
 $[1, 2] \rightarrow 1 \quad ((A_1) (A_2)) (A_3 \ A_4 \ A_5)$   
 $[3, 5] \rightarrow 4 \quad ((A_1) (A_2)) ((A_3 \ A_4) (A_5))$   
 $[3, 4] \rightarrow 3 \quad ((A_1) (A_2)) ((A_3) (A_4)) (A_5)$

## จำจุดแบ่ง matrix chain

```

mcm_Order ( p[0..n] ) {
    M = new Array[1..n][1..n]
    K = new Array[1..n][1..n]
    for( d = 1; d < n; d++ ) {
        for ( i = 1; i <= n-d; i++ ) {
            j = i + d;
            M[i][j] = ∞
            for ( k = i; k < j; k++ ) {
                t = M[i][k] + M[k+1][j] + p[i-1]*p[k]*p[j];
                if ( t < M[i][j] ) {
                    M[i][j] = t;
                    K[i][j] = k;
                }
            }
        }
    }
    return K;
}

```

$(A_i \ \dots \ A_k) (A_{k+1} \ \dots \ A_j)$

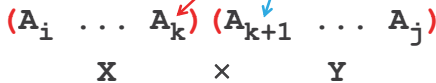
## MCM : คูณเลข

```
mcm_Mult( A[1..n], p[0..n] ) {
    K = mcm_Order( p );
    return mcm_Mult( A, K, 1, n );
}
```

$\Theta(n^3)$

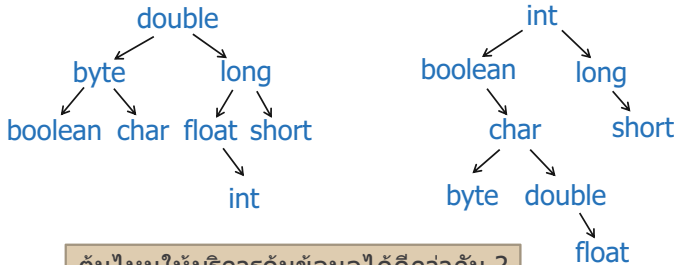
$\Theta(?)$

```
mcm_Mult( A[1..n], K[1..n][1..n], i, j ) {
    if ( i == j ) return A[i];
    X = mcm_Mult( A, K, i, K[i][j] );
    Y = mcm_Mult( A, K, K[i][j]+1, j );
    return mult(X, Y);
}
```



## Binary Search Tree

- ❖ ต้องการสร้าง binary search tree เพื่อเก็บ keywords ที่เป็น primitive data types ของจาวา
- ❖ boolean, byte, char, double, float, int, long, short



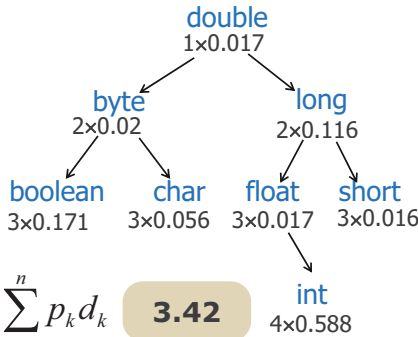
ต้นไม้ให้บริการค้นข้อมูลได้ดีกว่ากัน ?

## Binary Search Tree

- ❖ เตี้ย ≠ ดี เสมอไป : ถ้าพิจารณาความถี่ของค่า
- ❖ ลองนับ primitive data types ที่ใช้ใน source codes ของ java.util.\* (jdk1.6.0\_14) พบว่า
  - ❖ int           ปรากฏ   2,274 ครั้ง   58.76%
  - ❖ boolean       "         661 "       17.08%
  - ❖ long           "         450 "       11.63%
  - ❖ char           "         217 "       5.61%
  - ❖ byte           "         78 "        2.02%
  - ❖ double         "         66 "        1.71%
  - ❖ float          "         64 "        1.65%
  - ❖ short          "         60 "        1.55%

## Binary Search Tree

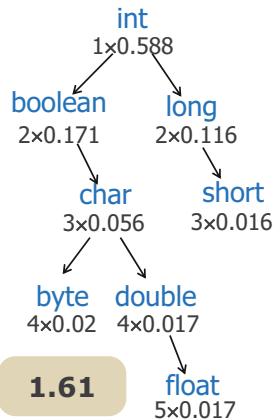
int	boolean	long	char	byte	double	float	short
58.8%	17.1%	11.6%	5.6%	2.0%	1.7%	1.7%	1.6%



$$\sum_{k=1}^n p_k d_k$$

**3.42**

$p_k$  = ความน่าจะเป็นในการค้นค่าที่  $k$   
 $d_k$  = จำนวนปมที่อ่านในการค้นค่าที่  $k$



**1.61**

## Optimal Binary Search Tree

### ❖ input

- ❖ เซตของค่า และความถี่ในการใช้งานของแต่ละค่า

### ❖ output

- ❖ binary search tree ที่มี  $\sum_{k=1}^n p_k d_k$  น้อยสุด

ลองทำเอง  
คล้าย ๆ MCM



# อัลกอริทึมแบบละโมภ

## สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

### หัวข้อ

- ❖ แนวคิด และโครงสร้างของอัลกอริทึม
- ❖ ลักษณะของปัญหา
  - ❖ optimal substructure
  - ❖ greedy choice
- ❖ ตัวอย่างปัญหาที่ได้คำตอบ
  - ❖ ที่ดีที่สุด
  - ❖ ที่ดีเพียงพอ

# ไปทางไหนดี ?



Greedy Choice  
ไปทางที่รถไม่ติด

# ทอนเงิน

- ❖ มีเหรียญอยู่  $n$  แบบ :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละแบบมีค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ต้องการทอนเงินให้ลูกค้ามูลค่า  $V$
- ❖ โดยใช้เหรียญเป็นจำนวนน้อยสุด
  - ❖ (มีเหรียญแต่ละแบบจำนวนไม่จำกัด)



- ❖ ตัวอย่าง : สกุลเงินไทย
  - ❖ มีเหรียญ : 1, 2, 5, 10 บาท (ขอไม่ใช้เหรียญสลึง)
  - ❖ ต้องการทอนเงินมูลค่า 38 บาท
  - ❖ คำตอบ : 10 บาท 3 เหรียญ,  
5 บาท 1 เหรียญ,  
2 บาท 1 เหรียญ,  
1 บาท 1 เหรียญ

Greedy Choice  
ทอนด้วยเหรียญที่มี  
ค่ามากที่สุดก่อน

## ทอนเงิน : greedy อาจใช้ไม่ได้

### ❖ สมมติว่ามีเหรียญ 4 บาท

- ❖ มีเหรียญ : 1, 2, 4, 5, 10 บาท
- ❖ ต้องการทอนเงินมูลค่า 38 บาท
- ❖ ทอนด้วยเหรียญที่มีค่ามากที่สุดก่อน
  - 10 บาท 3 เหรียญ,
  - 5 บาท 1 เหรียญ,
  - 2 บาท 1 เหรียญ,
  - 1 บาท 1 เหรียญ
- ❖ ทอนแบบใช้จำนวนเหรียญน้อยสุด
  - 10 บาท 3 เหรียญ,
  - 4 บาท 2 เหรียญ,

ไม่ได้จำนวน  
เหรียญน้อยสุด

## อัลกอริทึมแบบละโมภ

- ❖ เหมาะกับ optimization problems (คล้าย dynamic programming)
- ❖ เป็นวงวนของการตัดสินใจเลือกเพื่อสร้างคำตอบ
- ❖ พิจารณาทางเลือกที่ดีที่สุด ณ ปัจจุบัน (locally optimal choice, greedy choice)
- ❖ เพื่อสร้างคำตอบเล็ก → ใหญ่ → สมบูรณ์
- ❖ หวังว่าจะได้คำตอบสมบูรณ์ที่ดีที่สุด → ต้องพิสูจน์ (globally optimal solution)

## โครงร่างของอัลกอริทึม

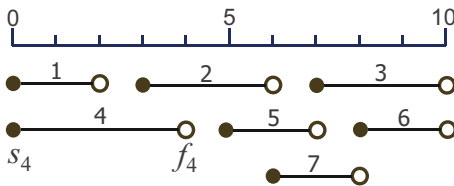
```

Greedy( C ) {
  S = an empty set
  while( C ≠ ∅ ) {
    x = select( C )
    C = C - {x}
    if ( isFeasible( S ∪ {x} ) ) {
      S = S ∪ {x}
      if ( isSolution( S ) ) return S
    }
  }
  return "No Solution"
}

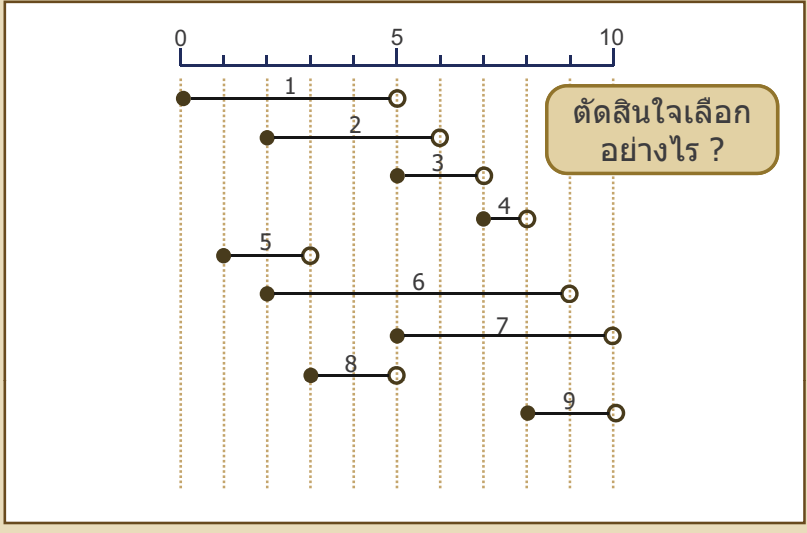
```

## Activity Selection

- ❖ **Input :** มีงาน  $n$  งานที่ต้องใช้ห้องจัดงานห้องหนึ่ง  
 $s_i$  แทนเวลาเริ่มใช้ห้องของงาน  $i$   
 $f_i$  แทนเวลาเลิกใช้ห้องของงาน  $i$
- ❖ **Output:** กลุ่มของงานจำนวนมากสุด  
 ที่ไม่ใช้ห้องในเวลาเดียวกัน



## ตัวอย่าง



## Greedy Strategy

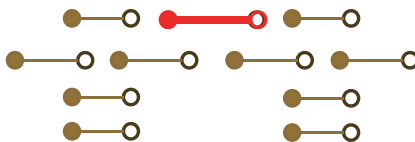
ริบใช้ : เลือก  $s_i$  น้อยสุด



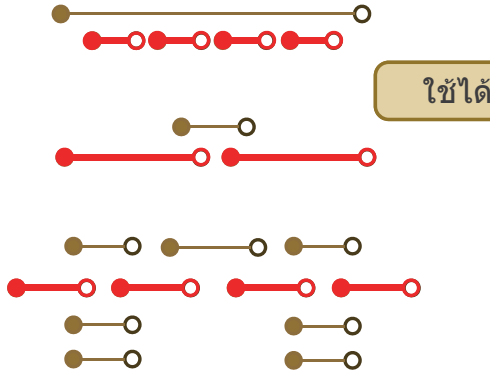
ใช้ช่วงเวลาน้อย ๆ : เลือก  $f_i - s_i$  น้อยสุด



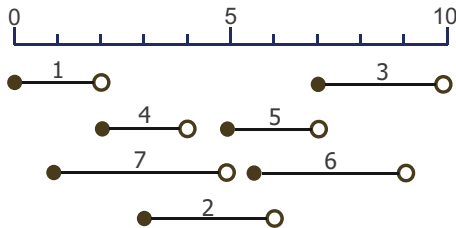
เลือกงานที่แย่งใช้ห้องกับงานอื่นน้อยสุด



## เลือก $f_i$ น้อยสุด : เร็งเร็วสุด



## เลือก $f_i$ น้อยสุด



เรียงลำดับตาม  $f_i$

เลือกงานที่มี  $f_i$  น้อยสุด

แต่ไม่สนใจงานที่มีเวลาใช้ห้องเหลือมากกว่างานที่ได้เลือกไว้

## Greedy Activity Selection

```

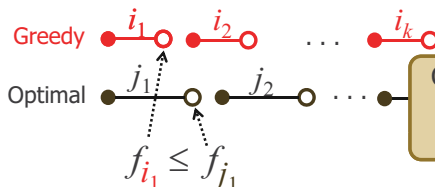
GreedyActivitySelect( A[1..n] ) {
    sort A by finish times
    S = {1}
    j = 1;
    for( i = 2; i <= n; i++) {
        if ( A[i].s >= A[j].f ) {
            S = S ∪ { i }
            j = i
        }
    }
    return S
}
    
```

$O(n \log n)$

$\Theta(n)$

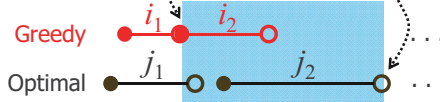
## Greedy Choice ได้ optimal soln.

- ❖ ให้ greedy เลือก  $i_1, i_2, i_3, \dots, i_k$  (เขียนเรียงตาม  $f$ )
- ❖ ให้ optimal soln คือ  $j_1, j_2, j_3, \dots, j_m$  (เขียนเรียงตาม  $f$ )
- ❖ ต้องการแสดงว่า  $k = m$
- ❖ จะแสดงให้เห็นว่า สามารถแปลง  $j_1, j_2, j_3, \dots, j_m$  เป็น  $i_1, i_2, i_3, \dots, i_k$  ได้
- ❖ ถ้า  $i_1 \neq j_1$  สามารถเปลี่ยน  $j_1, j_2, j_3, \dots, j_m$  เป็น  $i_1, j_2, j_3, \dots, j_m$  ได้

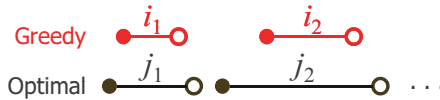


## Greedy Choice ได้ optimal soln.

❖ ถ้า  $i_2 \neq j_2$   $i_2$  ต้องมี  $f_{i_1} \leq s_{i_2} \leq f_{i_2} \leq f_{j_2}$



❖ สามารถเปลี่ยน  $i_1, j_2, j_3, \dots, j_m$  เป็น  $i_1, i_2, j_3, \dots, j_m$  ได้



## Greedy Choice ได้ optimal soln.

❖ สามารถเปลี่ยน  $j_1, j_2, j_3, \dots, j_k$  เป็น  $i_1, i_2, i_3, \dots, i_k$

❖ เป็นไปไม่ได้ที่จะมี  $j_{k+1}$  ใน optimal soln. เพราะถ้ามี greedy ต้องเลือกด้วย

❖ ดังนั้น k ต้องเท่ากับ m

❖ greedy choice จึงได้จำนวนงานที่ใช้ห้องเท่ากับของ optimal solution





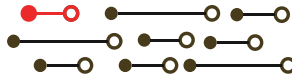
## คุณสมบัติของปัญหาที่ใช้ greedy ได้

### ❖ Optimal Substructures

- ❖ ค่าตอบที่ดีที่สุดของปัญหาใหญ่ประกอบด้วย  
ค่าตอบที่ดีที่สุดของปัญหาย่อย  
(ใช้ dynamic prog. ได้ ก็ต้องมีคุณสมบัติข้อนี้)

### ❖ Greedy choice

- ❖ สิ่งที่ดีที่สุดที่ถูกเลือก ณ ปัจจุบัน เป็นส่วนหนึ่งของ  
คำตอบสมบูรณ์ที่ดีที่สุด
- ❖ dynamic prog. : แก้ทุกปัญหาย่อย แล้วค่อยนำผลมาเลือก
- ❖ greedy : เลือกแบบ greedy แล้ว ทำให้ปัญหาเล็กลง  
จากนั้นแค่หาคำตอบของปัญหาย่อยนั้น (ปัญหาเดียว) ก็พอ

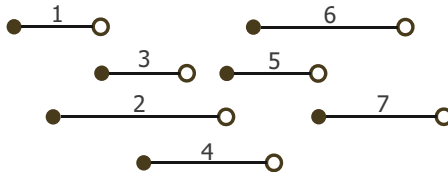


## ถ้ามีห้องจัดงานหลายห้อง

ต้องการจัดให้ได้ทุกงาน

โดยใช้ห้องจัดงานจำนวนน้อยสุด

จงออกแบบอัลกอริทึมสำหรับปัญหานี้



ลองทำดู

## ถ้ากำหนดเฉพาะช่วงเวลา

- งาน  $i$  ใช้ห้องเป็นเวลา  $t_i$
- ถ้ามีห้องเดียว จะจัดลำดับงานอย่างไร เพื่อให้เวลาดำเนินงานเล็กโดยเฉลี่ยน้อยสุด

$$t_i = \bullet \overset{2}{\color{red}2} \circ \quad \bullet \overset{5}{\color{red}5} \circ \quad \bullet \overset{3}{\color{blue}3} \circ \quad \bullet \overset{4}{\color{green}4} \circ$$



$$(\Sigma f) / n = (2 + 7 + 10 + 14) / 4 = 8.25$$



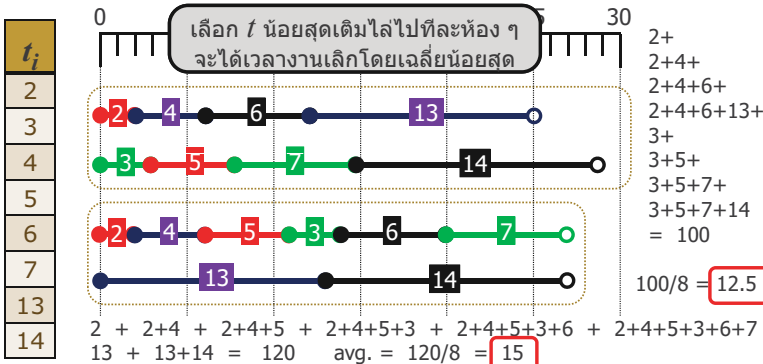
$$(\Sigma f) / n = (2 + 5 + 9 + 14) / 4 = 7.5$$

จงพิสูจน์

เลือก  $t$  น้อยสุดก่อน ได้เวลาเล็กโดยเฉลี่ยน้อยสุด

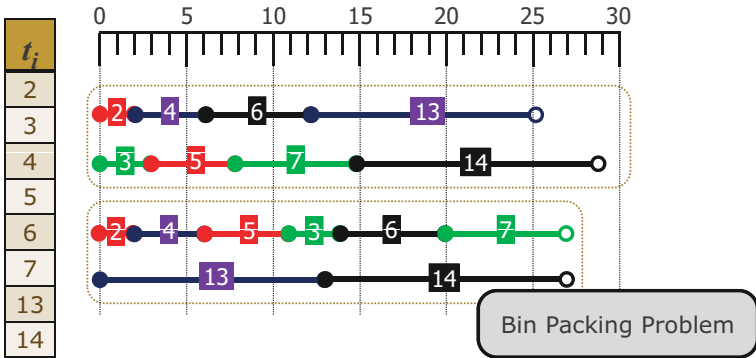
## ถ้ามีหลายห้อง

- งาน  $i$  ใช้ห้องเป็นเวลา  $t_i$
- ถ้ามี  $m$  ห้อง จะจัดลำดับงานอย่างไร ในห้องใด เพื่อให้เวลาดำเนินงานเล็กโดยเฉลี่ยน้อยสุด



## ถ้าต้องการงานทำยเล็กเร็วสุด

- ❖ เวลางานเล็กโดยเฉลี่ยน้อยสุด : ง่าย
  - ❖ ใช้ greedy choice : เลือก  $t$  น้อยสุดเติมไล่ไปที่ละห้อง ๆ
- ❖ เวลาเล็กของงานทำยสุด น้อยสุด : ยาก



## ปัญหา Fractional Knapsack

- ❖ ของ  $n$  ชั้นมีหมายเลข :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละชั้นหนัก :  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$
- ❖ แต่ละชั้นมีมูลค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ถุงเป้หนึ่งใบจุของได้หนักไม่เกิน  $W$
- ❖ ปัญหา : จงเลือกของใส่ถุง เพื่อให้

- ❖ ถุงไม่ขาด
- ❖ ได้มูลค่ารวมมากที่สุด
- ❖ หมายเหตุ : อนุญาตให้เงื่อนไข (แบ่ง) ของบางส่วนได้ ได้มูลค่าแปรตามน้ำหนัก



# Optimization Problem

- ❖ ของ  $n$  ชั้นมีหมายเลข :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละชั้นหนัก :  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$
- ❖ แต่ละชั้นมีมูลค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ถุงเป้หนึ่งใบจุของได้หนักไม่เกิน  $W$
- ❖ หา  $\langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle$ ,  $x_k = 0$  ถึง  $1$

$$\begin{aligned} &\text{maximize } \sum_{k=1}^n x_k v_k \\ &\text{subject to } \sum_{k=1}^n x_k w_k \leq W \\ &0 \leq x_k \leq 1 \end{aligned}$$

maximization  
problems

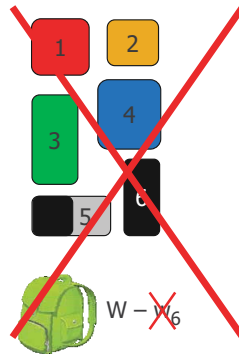
## Knapsack มี Optimal substruct.



$$v_1 + v_3 + v_4 + v_6$$



$$v_1 + v_3 + v_4$$



$$v_1 + v_2 + v_4 + v_5/2 + v_6$$

เป็นไปได้ที่จะมากกว่า

คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาใหญ่  
มีคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาย่อย

## Greedy Choice

เลือกของแพง

$W = 100$

$v_1=66$ $w_1=30$	$v_2=20$ $w_2=10$	$v_3=30$ $w_3=20$	$v_4=60$ $w_4=50$	$v_5=40$ $w_5=40$	$\Sigma v = 146$
					$\Sigma w = 30+50+20$

เลือกของเบา

$v_1=66$ $w_1=30$	$v_2=20$ $w_2=10$	$v_3=30$ $w_3=20$	$v_4=60$ $w_4=50$	$v_5=40$ $w_5=40$	$\Sigma v = 156$
					$\Sigma w = 10+20+30+40$

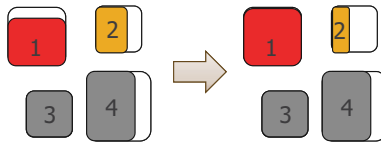
เลือกของคุ้ม (มูลค่าต่อน้ำหนัก)

$v_1=66$ $w_1=30$	$v_2=20$ $w_2=10$	$v_3=30$ $w_3=20$	$v_4=60$ $w_4=50$	$v_5=40$ $w_5=40$	$\Sigma v = 164$
					$\Sigma w = 30+10+20+40$

$v/w$  : 2.2      2.0      1.5      1.2      1.0

## Greedy Choice ได้ Optimal Soln.

$$v_1/w_1 \geq v_2/w_2 \geq \dots \geq v_n/w_n$$



ถ้าเลือกชิ้น 1 ไม่เต็มชิ้น ( $x_1 < 1$ ) และมีการเลือกชิ้น  $k$  อื่น ( $x_k > 0$ )

- ลดชิ้น  $k$  ลง  $\Delta$      $\Delta = \min(x_k, 1 - x_1)$
- เพิ่มชิ้น 1 ขึ้น  $\Delta$
- จะได้มูลค่ารวมมากขึ้น  $\left( \frac{v_1}{w_1} - \frac{v_k}{w_k} \right) \Delta \geq 0$
- การเลือกชิ้นที่มี  $v_1/w_1$  ให้มากที่สุด จึงถูกต้อง

## Greedy Knapsack

```

GreedyKnapsack( A[1..n], W ) {
  sort A by v/w มากไปน้อย ← O( n log n )
  sumW = 0
  for( i = 1; i <= n AND sumW < W; i++ ) {
    A[i].x = min(A[i].w, W - sumW) / A[i].w
    sumW += A[i].x * A[i].w
  }
  return A
}
    
```

$v_1=66$   
 $w_1=30$

$v_2=20$   
 $w_2=10$

$v_3=30$   
 $w_3=20$

$v_4=60$   
 $w_4=50$

$v_5=40$   
 $w_5=40$

$\Sigma v = 164$

$\Sigma w = 30+10+20+40$

$v/w : 2.2$

$2.0$

$1.5$

$1.2$

$1.0$

## เลือกคุ้มค่าที่สุด : ได้มูลค่ารวมสูงสุด

- ❖ ให้  $v_1/w_1 \geq v_2/w_2 \geq \dots \geq v_n/w_n$
- ❖ ให้  $x$  เป็น คำตอบที่ได้จาก greedy choice
- ❖ ให้  $y$  เป็น คำตอบใด ๆ ที่เป็นไปได้ (ถุงไม่ขาด)
- ❖ ต้องแสดงให้เห็นจริงๆว่า

$$\sum_{i=1}^n x_i v_i \geq \sum_{i=1}^n y_i v_i$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - y_i) v_i \geq 0$$

## เลือกคุ่มสุด : ได้มูลรวมสูงสุด

$$x \quad \begin{array}{ccccccccc} & 1 & 2 & & & k & & & n \\ \hline & 1 & 1 & \dots & 1 & x_k & 0 & \dots & 0 \end{array} \quad x_k < 1$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - y_i) v_i = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{k-1} (x_i - y_i) w_i \frac{v_i}{w_i} \\ + (x_k - y_k) w_k \frac{v_k}{w_k} \\ + \sum_{i=k+1}^n (x_i - y_i) w_i \frac{v_i}{w_i} \end{array} \right\} \geq \sum_{i=1}^{k-1} (x_i - y_i) w_i \frac{v_k}{w_k} = (x_k - y_k) w_k \frac{v_k}{w_k} \geq \sum_{i=k+1}^n (x_i - y_i) w_i \frac{v_k}{w_k}$$

## เลือกคุ่มสุด : ได้มูลรวมสูงสุด

$$x \quad \begin{array}{ccccccccc} & 1 & 2 & & & k & & & n \\ \hline & 1 & 1 & \dots & 1 & x_k & 0 & \dots & 0 \end{array} \quad x_k < 1$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - y_i) v_i = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{k-1} (x_i - y_i) w_i \frac{v_i}{w_i} \\ + (x_k - y_k) w_k \frac{v_k}{w_k} \\ + \sum_{i=k+1}^n (x_i - y_i) w_i \frac{v_i}{w_i} \end{array} \right\} \geq \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) w_i \frac{v_k}{w_k} = \frac{v_k}{w_k} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) w_i$$

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i = W \quad \sum_{i=1}^n y_i w_i \leq W$$

# Greedy ใช้กับ 0/1 Knapsack ไม่ได้

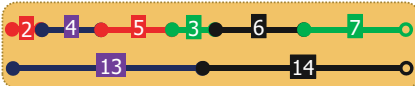
				$W = 25$
Fractional Knapsack	$v_1=30$ $w_1=5$ $v/w : 6.0$	$v_2=50$ $w_2=10$ $5.0$	$v_3=60$ $w_3=15$ $4.0$	$\Sigma v = 120$ $\Sigma w = 5+10+10$
0/1 Knapsack	$v_1=30$ $w_1=5$	$v_2=50$ $w_2=10$	$v_3=60$ $w_3=15$	$\Sigma v = 80$ $\Sigma w = 15$
	$v_1=30$ $w_1=5$	$v_2=50$ $w_2=10$	$v_3=60$ $w_3=15$	$\Sigma v = 90$ $\Sigma w = 20$
	$v_1=30$ $w_1=5$	$v_2=50$ $w_2=10$	$v_3=60$ $w_3=15$	$\Sigma v = 110$ $\Sigma w = 25$

# 0/1 Knapsack ↔ Scheduling

## ❖ Scheduling

- ❖ จัด  $n$  งานที่ใช้เวลา  $t_1, t_2, \dots, t_n$
- ❖ ให้กับห้อง  $m$  ห้อง
- ❖ ต้องการเวลาเลิกของงานท้ายสุด น้อยสุด

$m = 2$



$t_i$
2
3
4
5
6
7
13
14

## ❖ เหมือนกับปัญหา 0/1 knapsack

- ❖ ที่มีของ  $n$  ชิ้น
- ❖ มีน้ำหนัก  $t_1, t_2, \dots, t_n$
- ❖ มีมูลค่าเท่ากันหมด
- ❖ อนุญาตให้น้ำหนักไม่เกิน  $(t_1 + t_2 + \dots + t_n) / 2$   $\{2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

$W = 54 / 2$   
 $= 27$



## รหัสข้อมูล

## ❖ จำนวนเต็ม : two's complement

❖ 23 → 000000000010111

❖ -23 → 111111111101001

## ❖ ข้อความ : รหัส Unicode

❖ A → 0000000001000001

❖ ก → 0000111000000001

❖ 吳 → 0101010000110011

## ❖ รหัสความยาวคงที่

## ❖ รหัสความยาวแปรได้

❖ ข้อมูลความถี่สูง ใช้รหัสสั้น

❖ ข้อมูลความถี่ต่ำ ใช้รหัสยาว

## รหัส Huffman

จิกจิกงักงักมันเป็นจิกจิกงักงัก  
 จิกจิกงักงักมันเป็นจิกจิกงักงัก  
 มันเป็นกะอึกกะอักมันเป็นจิกจิกจักจัก

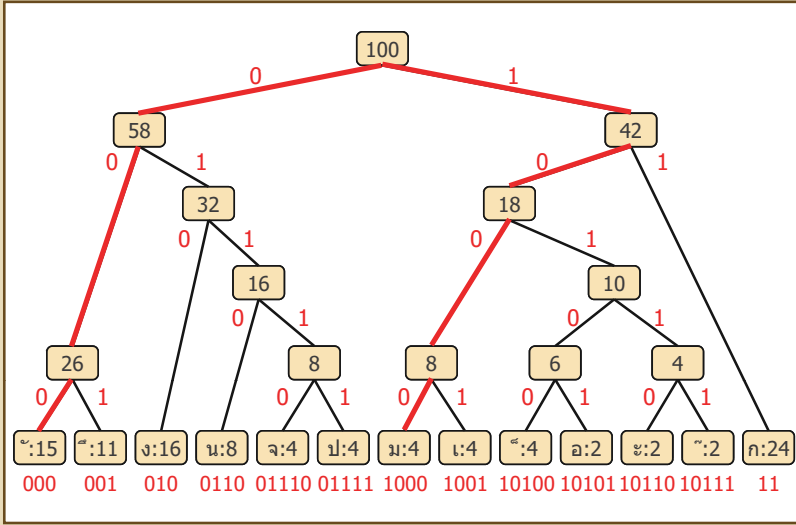
ก	ง	ั	ี	น	จ	ป	ม	เ	ื	อ	ะ	็
24	16	15	11	8	4	4	4	4	4	2	2	2
0000	0001	0010	1010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1011	1100
11	010	000	001	0110	01110	01111	1000	1001	10100	10101	10110	10111

$$4 \times (24 + 16 + 15 + 11 + 8 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 2 + 2 + 2) = 400 \text{ บิต}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{variable-length code} \\ \text{prefix-free code} \end{array} \right\} = 328 \text{ บิต}$$

ไม่มีรหัสใดเป็นส่วนนำหน้าของรหัสอื่น

# การหารหัส Huffman



# Huffman Tree

```

HuffmanTree( C[1..n] )
  minHeap = new min heap
  for ( i = 1; i <= n; i++ ) {
    minHeap.add( new Node(C[i].code, C[i].freq) )
  }
  for ( i = 1; i < n; i++ ) {
    node = new Node( )
    node.left = minHeap.removeMin()
    node.right = minHeap.removeMin()
    node.freq = node.left.freq + node.right.freq
    minHeap.add( node )
  }
  return minHeap.removeMin()
}
    
```

$O(n \log n)$

$O(n \log n)$

# Huffman Tree ดีสุด

Huffman tree มี  $B(T)$  น้อยสุด

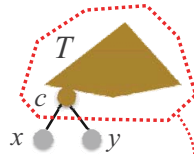
$$B(T) = \sum_{c \in C} f(c)d_T(c)$$

$c$  รหัส  
 $f(c)$  ความถี่ของ  $c$   
 $d_T(c)$  ความลึกของปม  $c$  ในต้นไม้  $T$  (จำนวนบิตของรหัส  $c$ )

# Huffman Tree มี $B(T)$ น้อยสุด

## ❖ Greedy-choice

- ❖ เลือกปมที่มีความถี่น้อยสุดมารวมก่อน จะได้ต้นไม้ที่มี  $B(T)$  น้อยสุด
- ❖ มีต้นไม้ที่  $B(T)$  น้อยสุด ที่มีปมความถี่น้อยสุดอยู่ระดับล่างสุด



## ❖ Optimal-substructure

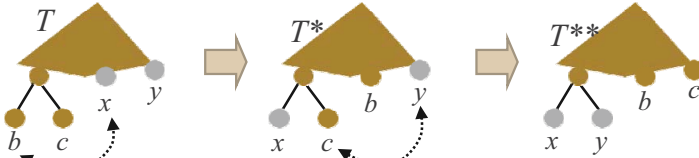
- ❖ ต้นไม้ที่  $B(T)$  น้อยสุด ประกอบด้วย ต้นไม้ย่อยที่มี  $B(T^*)$  น้อยสุดด้วย



$$B(T) = \sum_{c \in C} f(c)d_T(c)$$

# Greedy Choice ได้ Optimal Soln

ให้  $x$  และ  $y$  มี  $f(x)$  และ  $f(y)$  น้อยสุด



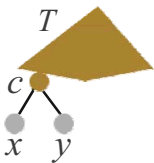
ต้นไม้ที่มี  $x$  และ  $y$  อยู่คู่กัน  
สร้างสุดเป็น optimal soln

$$\begin{aligned} & \sum_{c \in C} f(c)d_T(c) - \sum_{c \in C} f(c)d_{T^*}(c) \\ &= f(x)d_T(x) + f(b)d_T(b) - f(x)d_{T^*}(x) - f(b)d_{T^*}(b) \\ &= f(x)d_T(x) + f(b)d_T(b) - f(x)d_T(b) - f(b)d_T(x) \\ &= (f(x) - f(b))d_T(x) + (f(b) - f(x))d_T(b) \\ &= (f(b) - f(x))(d_T(b) - d_T(x)) \geq 0 \end{aligned}$$

$B(T) \geq B(T^*)$

# มี Optimal Substructure

$$B(T) = \sum_{c \in C} f(c)d_T(c)$$



$$f(c) = f(x) + f(y)$$

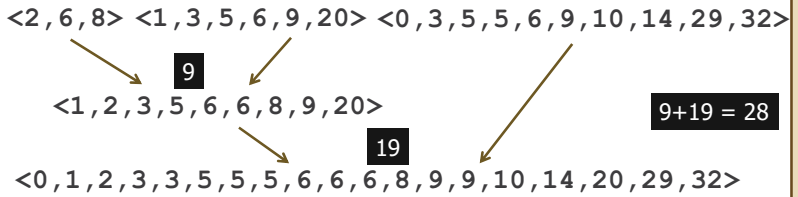
$$B(T) = B(T^*) + (f(x)d_T(x) + f(y)d_T(y)) - f(c)d_{T^*}(c)$$

$B(T) = B(T^*) + f(x) + f(y)$

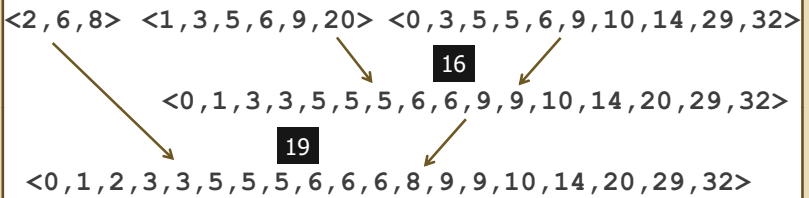
$$\begin{aligned} f(x)d_T(x) + f(y)d_T(y) &= (f(x) + f(y))(d_{T^*}(c) + 1) \\ &= f(c)d_{T^*}(c) + f(x) + f(y) \end{aligned}$$

$B(T)$  จะน้อยสุดได้,  
 $B(T^*)$  ต่อกน้อยสุด

## Optimal 2-Way Merge



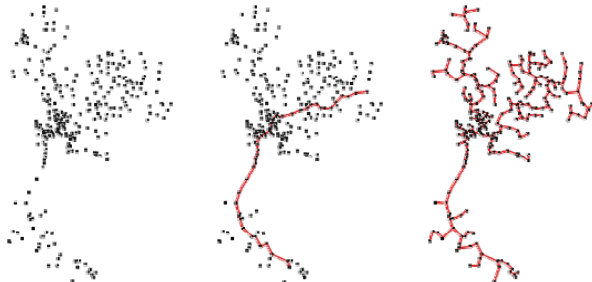
หาลำดับการทำ 2-way merge ให้ได้จำนวนการย้ายข้อมูลน้อยสุด



ลองทำเอง คล้าย ๆ การหา Huffman tree

## อัลกอริทึมแบบละโมบอื่น ๆ

- ❖ การหาวิถีสั้นสุด
  - ❖ อัลกอริทึมของดัจสตรา (Dijkstra)
- ❖ การหาต้นไม้แบบทอดข้ามต่ำสุด
  - ❖ อัลกอริทึมของพริม (Prim)
  - ❖ อัลกอริทึมของครุสคัล (Kruskal)



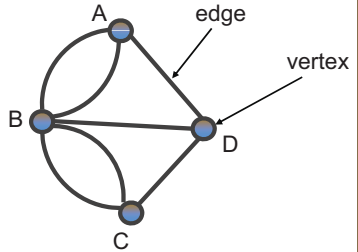
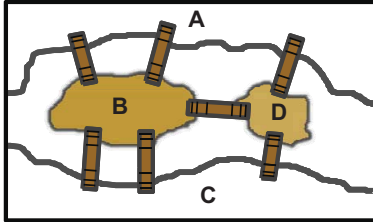
# กราฟเบื้องต้น

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## หัวข้อ

นิยาม  
ตัวอย่างการใช้กราฟ  
กราฟประเภทต่าง ๆ  
วิถีและวง  
การแทนกราฟ  
การแฉะผ่าน  
สภาพการเชื่อมโยงของกราฟ

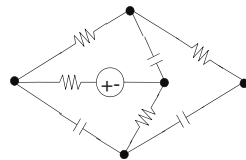
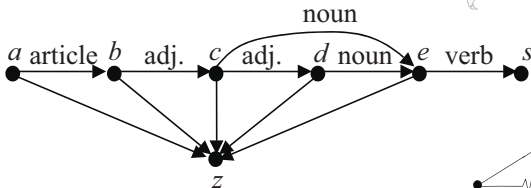
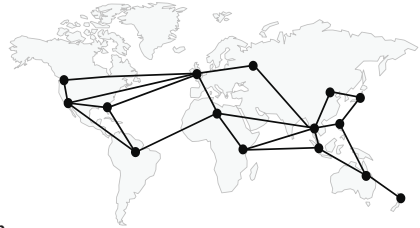
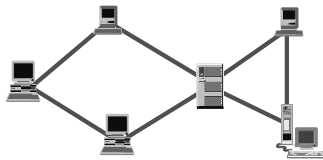
# กราฟ (Graph)



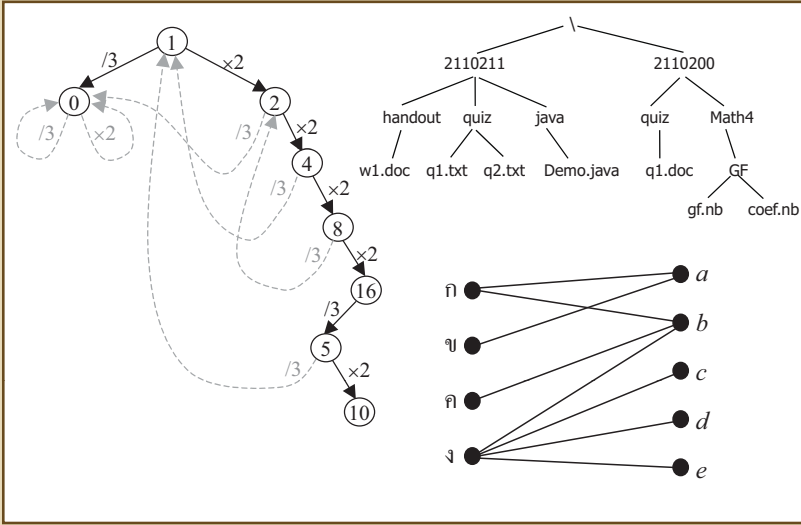
Königsberg Bridge Problem  
1736:  
Leonhard Euler



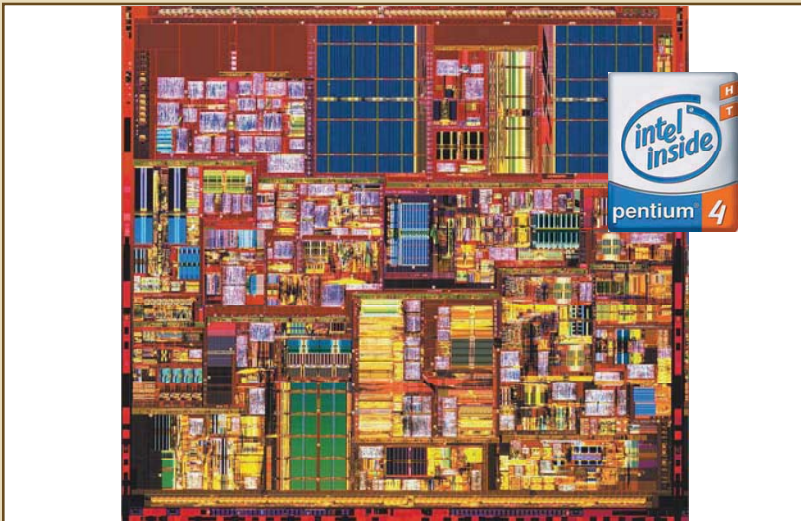
# ใช้กราฟแทน ...



# ใช้กราฟแทน ...

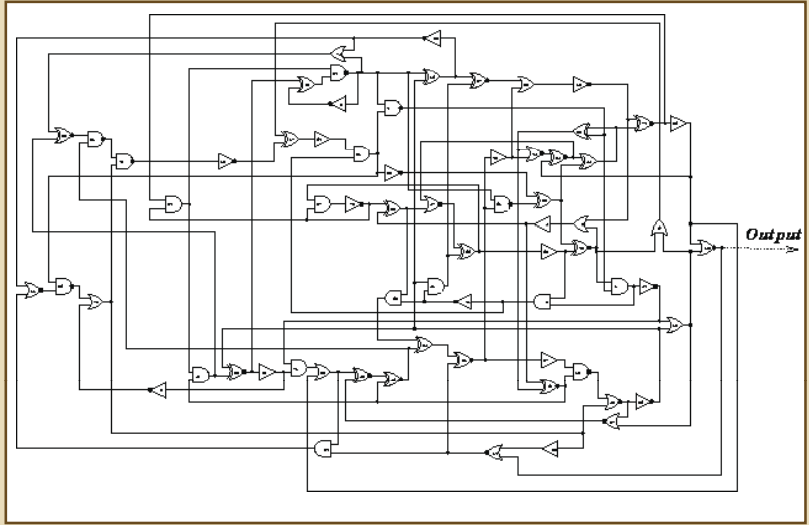


# กราฟกับการออกแบบวงจรรวม

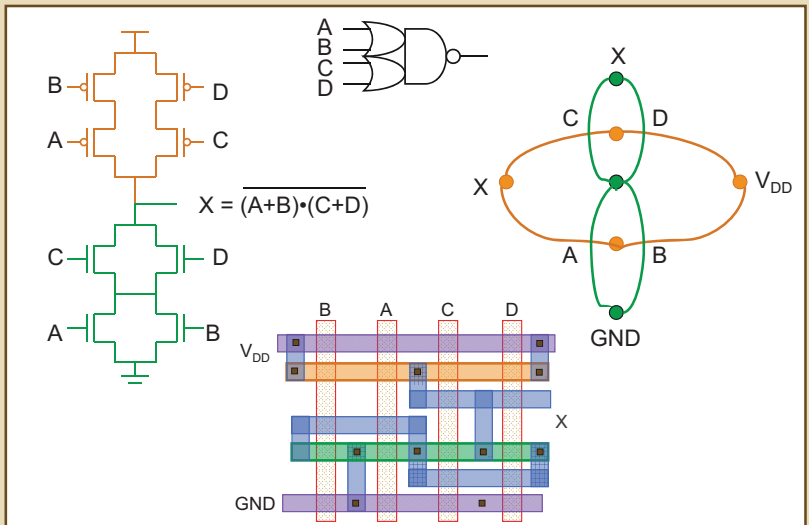




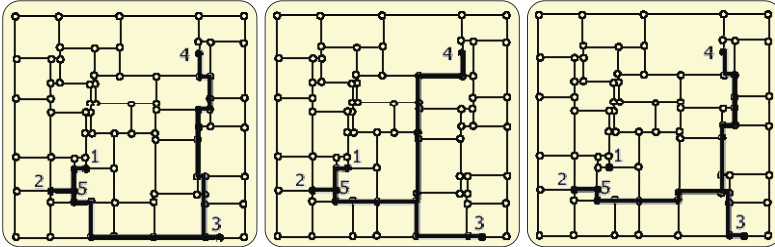
# กราฟกับวงจรดิจิทัล



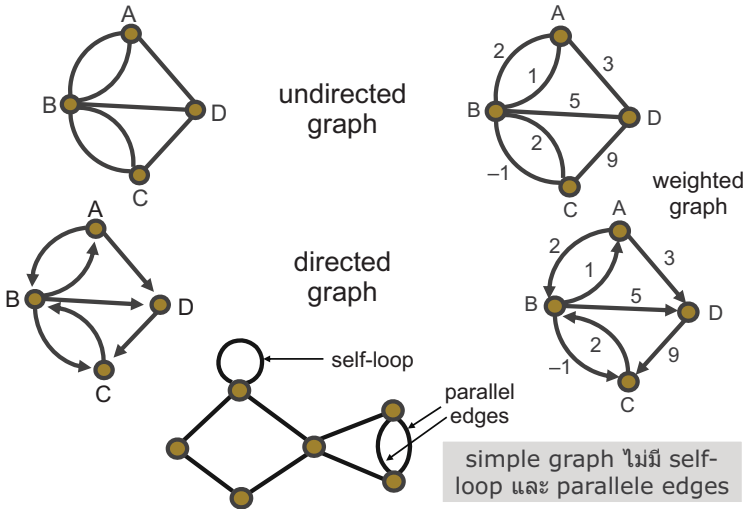
# กราฟกับการออกแบบวงจร



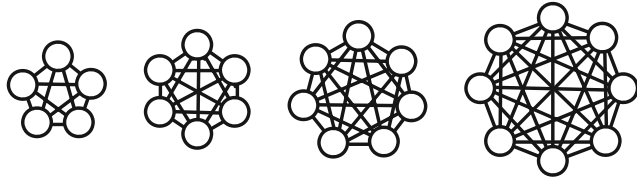
# กราฟกับการเชื่อมต่อสายสัญญาณ



# กราฟประเภทต่าง ๆ



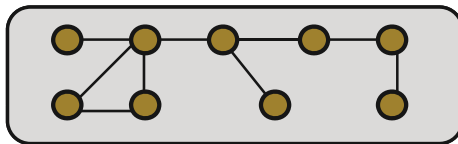
# Complete Graphs



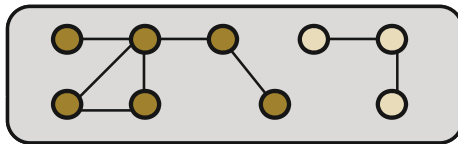
complete graph ที่มี  $v$  vertices มี  $v(v - 1)/2$  edges

simple graph :  $e = O(v^2)$

# Connected Graphs



กราฟต่อถึงกันมี  
1 component



2 components

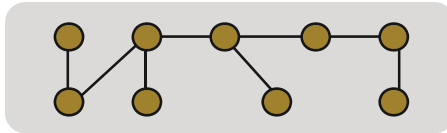
กราฟต่อถึงกันที่มี  $v$  ปม  
มีเส้นเชื่อมอย่างน้อย  $v - 1$  เส้น

connected graph  
 $e = \Omega(v)$



## Trees : ต้นไม้คือ...

- ❖ กราฟต่อถึงกันที่ไม่มีวง
- ❖ กราฟที่มี  $v$  ปม มี  $v-1$  เส้น และไม่มีวง
- ❖ กราฟต่อถึงกันที่มี  $v$  ปม มี  $v-1$  เส้น
- ❖ กราฟที่มี **simple path** เพียงวิธีระหว่างปมทุกคู่



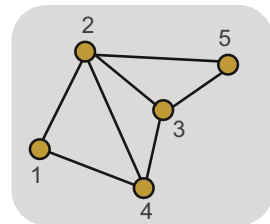
## การแทนกราฟ

- ❖ **adjacency matrix**

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	1	0
2	1	0	1	1	1
3	0	1	0	1	1
4	1	1	1	0	0
5	0	1	1	0	0

- ❖ **adjacency list**

1	→	< 2, 4 >
2	→	< 1, 3, 4, 5 >
3	→	< 2, 4, 5 >
4	→	< 1, 2, 3 >
5	→	< 2, 3 >



## คำถามที่พบบ่อยของกราฟ

### ❖ adjacency matrix

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	1	0
2	1	0	1	1	1
3	0	1	0	1	1
4	1	1	1	0	0
5	0	1	1	0	0

มีเส้นเชื่อมต่อระหว่าง  
ปม a กับ b หรือไม่ ?

$\Theta(1)$

### ❖ adjacency list

1	→ < 2, 4 >
2	→ < 1, 3, 4, 5 >
3	→ < 2, 4, 5 >
4	→ < 1, 2, 3 >
5	→ < 2, 3 >

$O(v)$

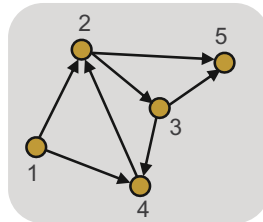
$O(v)$

ปม a มีเส้นเชื่อมต่อกับปมใดบ้าง ?

## กราฟระบุทิศทาง (Directed Graph)

### ❖ adjacency matrix

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	1	0
2	0	0	1	0	1
3	0	0	0	1	1
4	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0



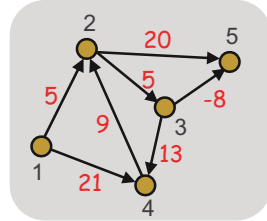
### ❖ adjacency list

1	→ < 2, 4 >
2	→ < 3, 5 >
3	→ < 4, 5 >
4	→ < 2 >
5	→ < >

## กราฟถ่วงน้ำหนัก (Weighted Graph)

### ❖ adjacency matrix

	1	2	3	4	5
1	0	5	0	21	0
2	0	0	5	0	20
3	0	0	0	13	-8
4	0	9	0	0	0
5	0	0	0	0	0



### ❖ adjacency list

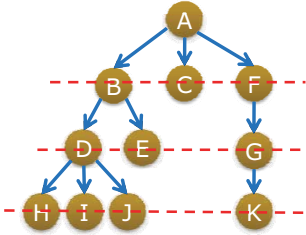
1	→	< (2, 5), (4, 21) >
2	→	< (3, 5), (5, 20) >
3	→	< (4, 13), (5, -8) >
4	→	< (2, 9) >
5	→	< >

## Basic Graph Algorithms

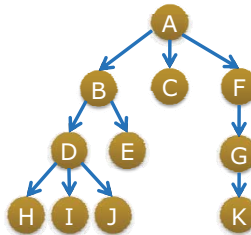
- ❖ Breadth-First Search
- ❖ Depth-First Search
- ❖ Topological Sort
- ❖ Strongly Connected Components

# การค้นต้นไม้

Breadth-first search

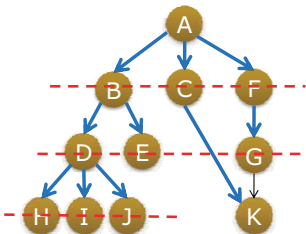


Depth-first search



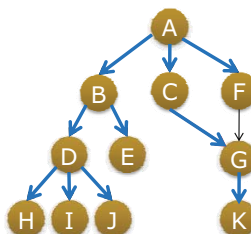
# การค้นกราฟ

Breadth-first search



ใช้ queue จำปมระหว่างการค้นหา

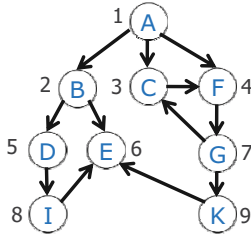
Depth-first search



ใช้ stack จำปมระหว่างการค้นหา



## Breadth-First Search



$$\Theta(|V| + |E|)$$

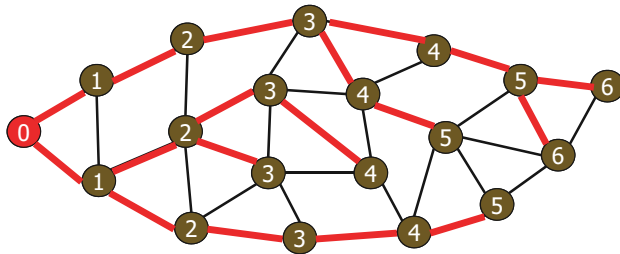
ถ้าใช้ adjacency list

```

bfs(G=(V,E), s) {
  for each v ∈ V
    color[v] ← WHITE;
  Q ← an empty queue;
  Q.enqueue(s);
  color[s] ← GRAY
  while ( Q ≠ ∅ ) {
    u ← Q.dequeue();
    color[u] ← BLACK;
    for each v ∈ adj(u)
      if (color[v]==WHITE){
        Q.enqueue(v);
        color[v] ← GRAY
      }
  }
}
    
```



## BFS Tree : Path Finding



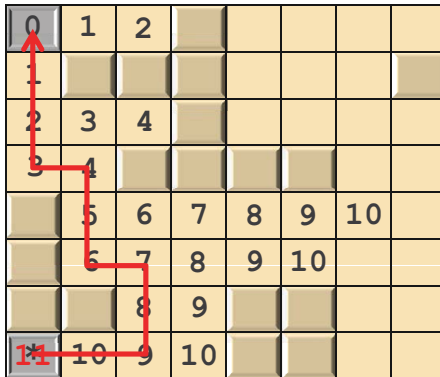
$d[u]$  คือจำนวนเส้นเชื่อมจากจุดเริ่มต้นถึง  $u$

## BFS : Path Finding

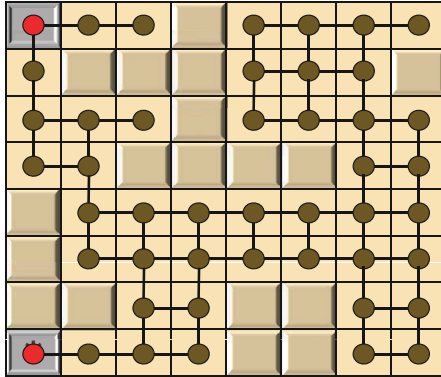
```

bfs(G=(V,E), s, t) {
  for each v ∈ V
    d[v] ← ∞; p[v] ← null;
  Q ← an empty queue;
  Q.enqueue(s);
  d[s] ← 0;
  while ( Q ≠ ∅ ) {
    u ← Q.dequeue();
    for each v ∈ adj(u)
      if ( d[v] == ∞ ){
        d[v] ← d[u] + 1; p[v] ← u;
        Q.enqueue(v);
      }
  }
}
    
```

## BFS : Shortest Path

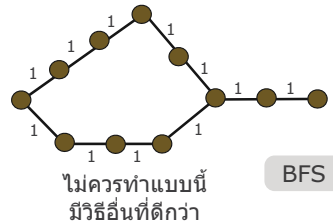
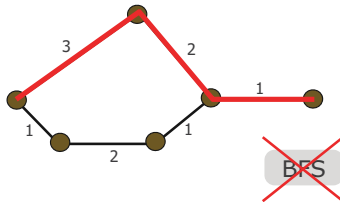
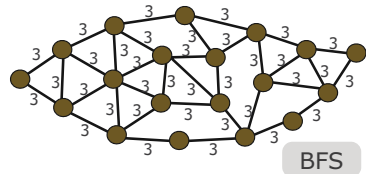
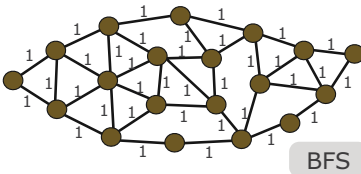


## BFS : Shortest Path



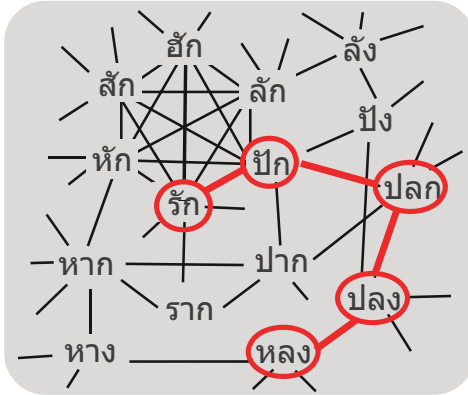
## ใช้ BFS หา Shortest Path

หาวิธีสั้นสุดได้ ถ้าเส้นเชื่อมทุกเส้นยาวเท่ากัน

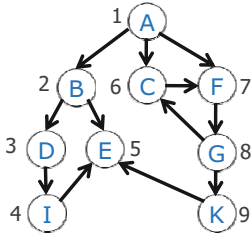


## Word Ladder

รัก → ปัก → ปลก → ปลง → หลง  
 ต้องการการเปลี่ยนทีละขั้น : ใช้ BFS



## Depth-First Search



```
dfs(G=(V,E), s) {
    color[] ← WHITE
    S ← an empty stack
    color[s] ← GRAY
    S.push(s);
    while ( S ≠ ∅ ) {
        u ← S.top()
        choose v ∈ adj(u) AND
            color[v] is WHITE
        if ( v does not exist ) {
            u ← S.pop()
            color[u] ← BLACK
        } else {
            color[v] ← GRAY
            S.push(v)
        }
    }
}
```

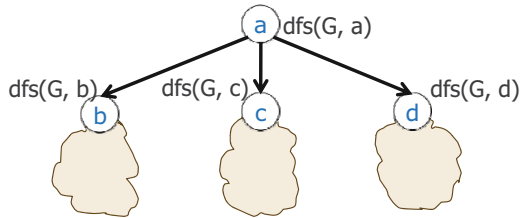
(A)

(A)

(A)

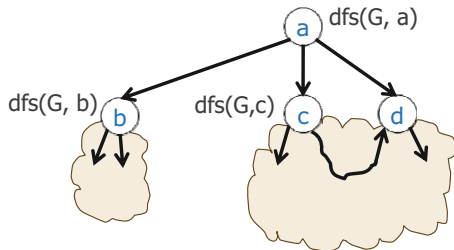
# Depth-First Search

```
dfs(G=(V,E) , u) {
  color[u] ← GRAY
  for each v ∈ adj(u)
    if (color[v] == WHITE)
      dfs(G, v)
  color[u] ← BLACK
}
```



# Depth-First Search

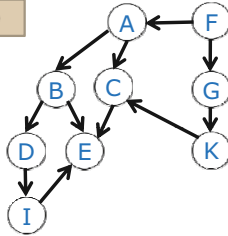
```
dfs(G=(V,E) , u) {
  color[u] ← GRAY
  for each v ∈ adj(u)
    if (color[v] == WHITE)
      dfs(G, v)
  color[u] ← BLACK
}
```



## DFS(G, u) : ไม่จำเป็นต้องผ่านทุกปม

```
dfs(G=(V,E), u) {
  color[u] ← GRAY
  for each v ∈ adj(u)
    if (color[v] == WHITE)
      dfs(G, v)
  color[u] ← BLACK
}
```

dfs(G, A)

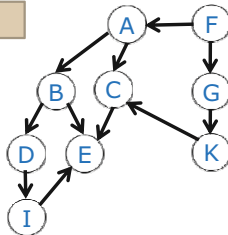


## DFS(G) : ผ่านทุกปม

```
dfs(G=(V,E)) {
  for each v ∈ V
    color[v] ← WHITE
  for each v ∈ V
    if (color[v] == WHITE)
      dfs(G, v)
}
```

```
dfs(G=(V,E), u) {
  color[u] ← GRAY
  for each v ∈ adj(u)
    if (color[v] == WHITE)
      dfs(G, v)
  color[u] ← BLACK
}
```

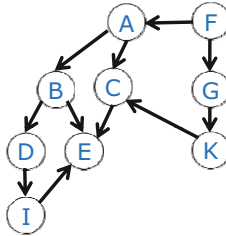
dfs(G)



## DFS Trees

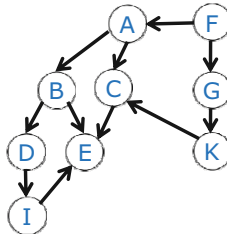
```
dfs ( G=(V,E) )
  for each v ∈ V
    color[v] ← WHITE
    p[v] ← null
  for each v ∈ V
    if (color[v] == WHITE)
      dfs(G, v)
}
```

```
dfs(G=(V,E), u)
  color[u] ← GRAY;
  for each v ∈ adj(u)
    if (color[v] == WHITE)
      p[v] ← u
      dfs(G, v)
  color[u] ← BLACK
}
```



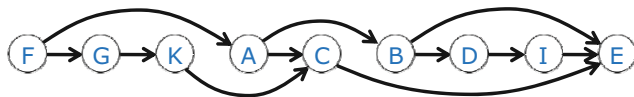
ได้ DFS tree สองต้น

## Topological Sort

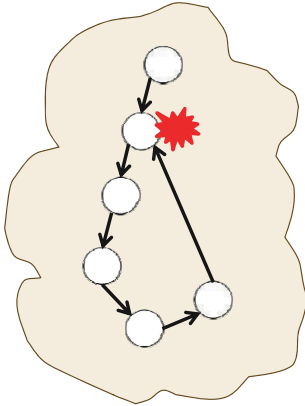


หา topological sort  
ได้เฉพาะกับ  
Directed Acyclic  
Graph (DAG)

ลำดับของปมที่ไม่มีเส้นเชื่อมชี้จากปมหลังมายังปมก่อนหน้า



## DAG : Directed Acyclic Graph



ปมเทา คือปมที่ยังแหวะ  
ผ่านลูกหลานไม่ครบ  
ดังนั้นถ้าพบปมเทา  
แสดงว่า พบปมที่เป็น  
บรรพบุรุษ  
มี cycle ไม่ใช่ DAG

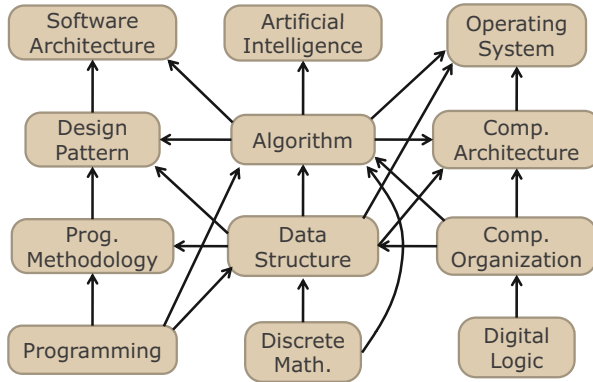
## isDAG : DFS

```

isDAG( G=(V,E) ) {
  for each v ∈ V
    color[v] ← WHITE
  for each v ∈ V
    if (color[v] == WHITE)
      if ( !isDAG(G, v) ) return false
  return true
}
isDAG( G=(V,E), u ) {
  color[u] ← GRAY
  for each v ∈ adj(u)
    if (color[v] == GRAY) return false
    if (color[v] == WHITE)
      if ( !isDAG(G, v) ) return false
  color[u] ← BLACK
  return true
}
    
```



# Applications

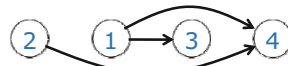
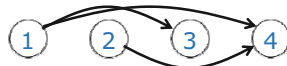
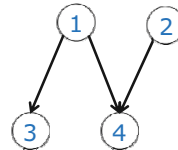


# Applications

## Instruction scheduling

หน้าที่ของ compiler ในการจัดลำดับการทำงานของคำสั่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานใน pipeline

- ①  $r1 \leftarrow r0 + 4$
- ②  $r2 \leftarrow r0 + 2$
- ③  $r3 \leftarrow r1 + 2$
- ④  $r4 \leftarrow r1 + r2$



# Applications

## Spreadsheet

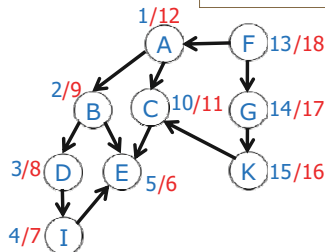
ลำดับการคำนวณสูตรในเซลล์ต่าง ๆ เมื่อข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลง

	A	B	C	D
1	21 (A1) $=A1*2$	(B1)		
2	49 (A2) $=A2*2$	(B2) $=B1*2$	(C2)	(D2) $=B2 + C2$
3	15 (A3) $=A3*2$	(B3) $=B2*2$	(C3)	(D3) $=B3 + C3$
4		(B4) $=SUM(B1:B3)$	(C4) $=SUM(C2:C3)$	(D4) $=B4 + C4$

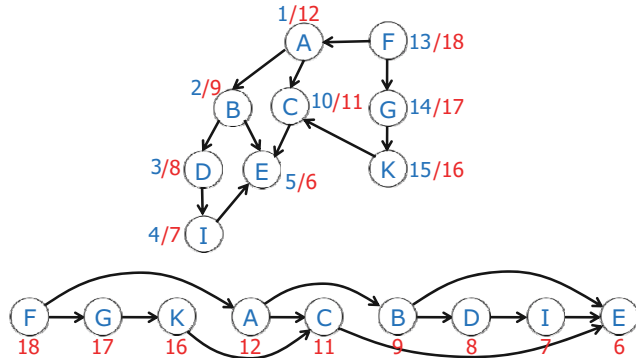
## DFS : เวลาเข้า-เวลาออก

```
dfs ( G=(V,E) ) {
  for each v ∈ V
    color[v] ← WHITE
  time ← 0
  for each v ∈ V
    if (color[v] == WHITE)
      dfs(G, v)
}
```

```
dfs(G=(V,E), u) {
  color[u] ← GRAY
  d[u] ← ++time;
  for each v ∈ adj(u)
    if (color[v] == WHITE)
      dfs(G, v)
  color[u] ← BLACK
  f[u] ← ++time;
}
```



# Topological Sort : DFS

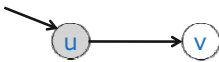


ทำ DFS  
ลำดับปมจากซ้ายไปขวา  
จะเรียงตาม  $f$  จากมากไปน้อย

## $(u, v) : f(u) > f(v)$



ไม่เกิด เพราะเป็น DAG



dfs(G, u) จะเสร็จได้  
 $f[u] \leftarrow ++time$

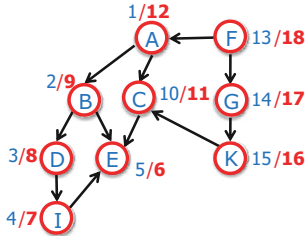
dfs(G, v) ต้องเสร็จก่อน  
 $f[v] \leftarrow ++time$



$f[u] \leftarrow ++time$

$f[v]$  ถูกใส่ค่ามาก่อนแล้ว

## Topological Sort : DFS



- topological sort คือลำดับของปมเรียงตาม  $f$  จากมากไปน้อย
- ใช้ stack จำ ปมที่ไปหาลูก ๆ เสร็จแล้ว
  - เมื่อ finish ก็ push ลง stack
  - DFS เสร็จ : topological sort คือ ลำดับของปมที่ pop ได้จาก stack

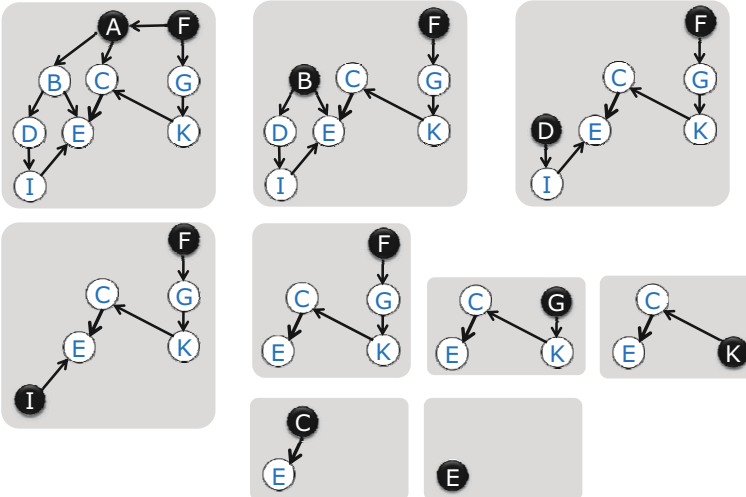
```

tsort( G = (V,E) ) {
  for each v ∈ V(G)
    color[v] ← WHITE
  S ← an empty stack
  for each v ∈ V(G)
    if (color[v] == WHITE)
      tsort( G, v )
  return S
}
    
```

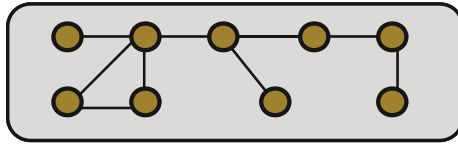
```

tsort( G=(V,E), u ) {
  color[u] ← GRAY
  d[u] ← ++time
  for each v ∈ adj(u)
    if (color[v] == WHITE)
      tsort( G, v )
  color[u] ← BLACK;
  push(S, u)
}
    
```

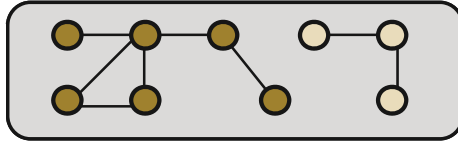
## Topological Sort : Kahn



## Undirected Graph : Connectivity



กราฟต่อถึงกันมี  
1 component



2 components

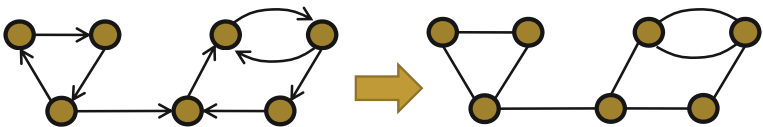
DFS ( G )

จำนวน components เท่ากับจำนวน DFS trees  
ปมในแต่ละ DFS tree ก็คือปมใน component เดียวกัน

## Directed Graph : Connectivity

### Weakly Connected

digraph ที่แปลงเป็นแบบไม่คิดทิศ แล้วเป็นกราฟต่อถึงกัน



## Directed Graph : Connectivity

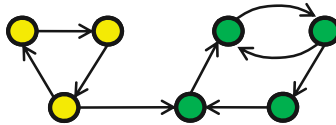
### Strongly Connected

กราฟที่มี path ระหว่างทุก ๆ คู่ปม ทั้งไปและกลับ

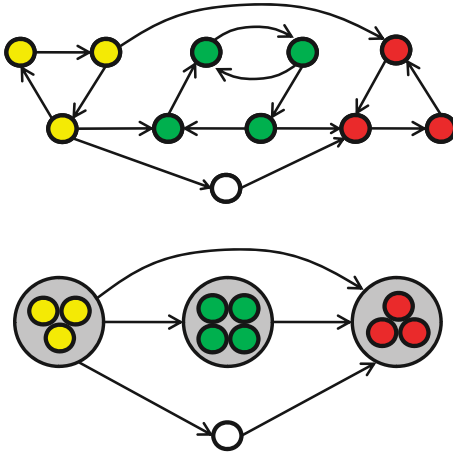


### Strongly Connected Components : SCC

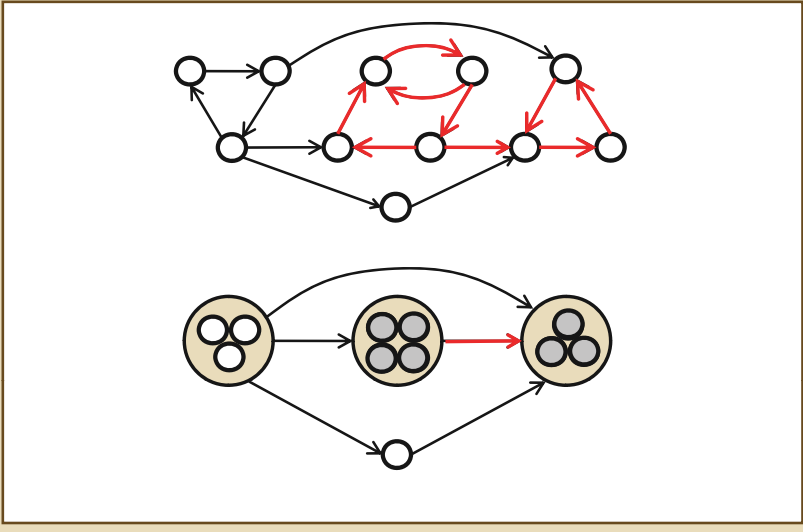
กราฟย่อยใหญ่สุด ๆ ที่ strongly connected



## Digraph = DAG ของ SCC

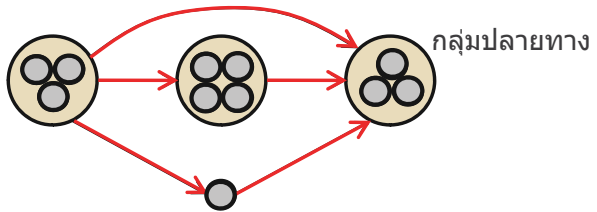


## DFS(G, v) : nodes ที่ไปถึงได้จาก v

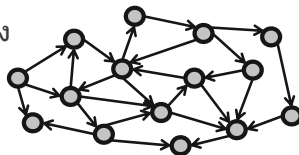


## หา SCC : DFS(G, v)

ทำ DFS เริ่มที่ node ในกลุ่มปลายทางก่อน  
แล้วค่อยถอยมา DFS ที่กลุ่มต้นทาง

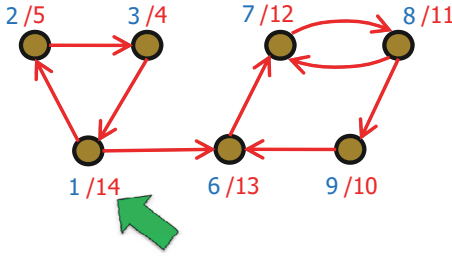


กลุ่มปลายทาง  
อยู่ไหน ?



หา topological sort  
ไม่ได้ เพราะไม่ใช่  
DAG

# กลุ่มค้นหา ง่ายกว่า

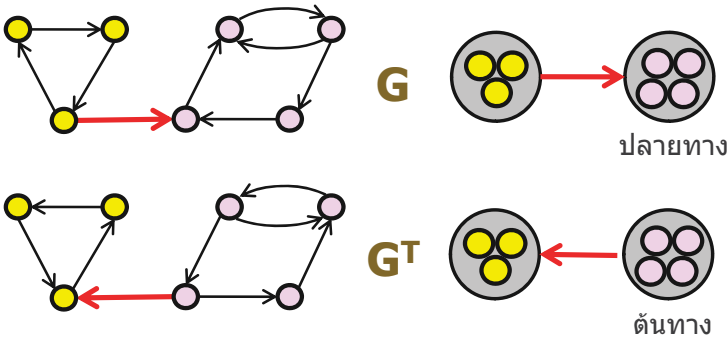


ทำ DFS( G ) ปมที่มี  $f$  มากสุด อยู่ในกลุ่มค้นหา

แต่เราต้องการกลุ่มปลายทาง!

# ปลายทางของ G คือค้นหาของ $G^T$

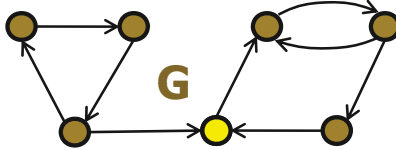
$G^T$  เหมือน G แต่กลับทิศเส้นเชื่อม



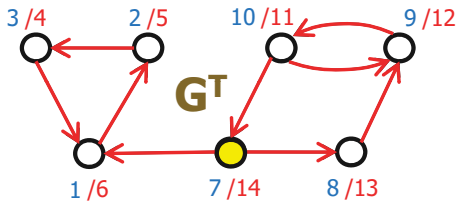


## ปลายทางของ $G$ คือต้นทางของ $G^T$

$G^T$  เหมือน  $G$  แต่กลับทิศเส้นเชื่อม

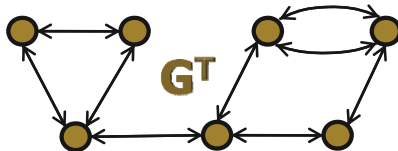


ทำ DFS( $G^T$ ) ปมที่มี  $f$  มากที่สุด อยู่ในกลุ่มต้นทางของ  $G^T$   
คือกลุ่มปลายทางของ  $G$



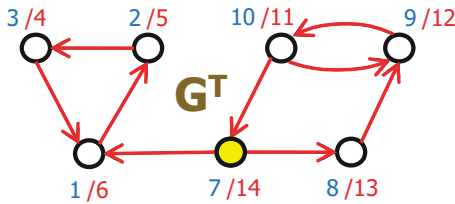
## วิธีหา SCC : Kosaraju's alg.

1. สร้าง  $G^T$  (เหมือน  $G$  แต่กลับทิศเส้นเชื่อม)



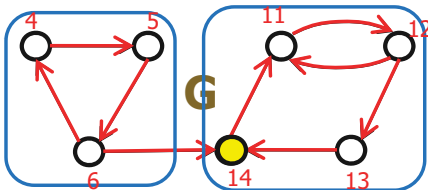
## วิธีหา SCC : Kosaraju's alg.

1. สร้าง  $G^T$  (เหมือน  $G$  แต่กลับทิศเส้นเชื่อม)
2. DFS(  $G^T$  ) แล้วจำค่า  $f$  ระหว่างการผ่านปม



## วิธีหา SCC : Kosaraju's alg.

1. สร้าง  $G^T$  (เหมือน  $G$  แต่กลับทิศเส้นเชื่อม)
2. DFS(  $G^T$  ) แล้วจำค่า  $f$  ระหว่างการผ่านปม
3. DFS(  $G$  ) ตามลำดับ  $f$  จากมากมาน้อย
4. DFS tree ที่ได้แต่ละต้นคือ SCC



$$\Theta( |V| + |E| )$$

# อัลกอริทึมบนกราฟ

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## Graph Algorithms

### ❖ Minimum Spanning Trees

- ❖ Kruskal's algorithm
- ❖ Prim's algorithm

### ❖ Single-Source Shortest Paths

- ❖ Dijkstra's algorithm
- ❖ Bellman-Ford 's algorithm

### ❖ All-Pair Shortest Paths

- ❖ Floyd-Warshall's algorithm
- ❖ Johnson's algorithm

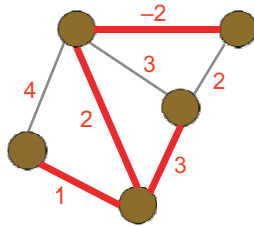
# Minimum Spanning Trees

## ❖ Input

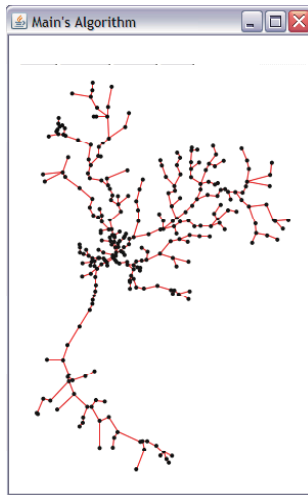
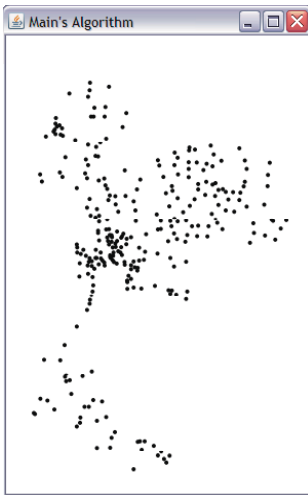
- ❖ กราฟ  $G = (V, E)$
- ❖ เส้นเชื่อมมีน้ำหนัก ไม่ต้องมีทิศทาง

## ❖ Output

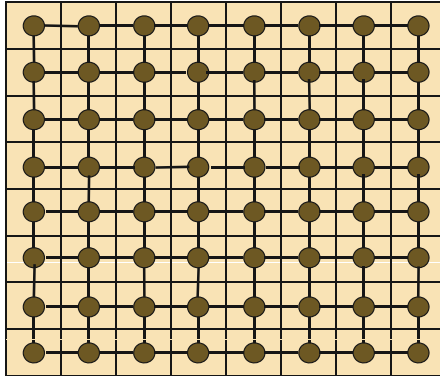
- ❖ เส้นเชื่อมต่าง ๆ (เป็นต้นไม้) ที่ต่อถึงทุกปม
- ❖ มีผลรวมของน้ำหนักเส้นเชื่อมต่ำสุด



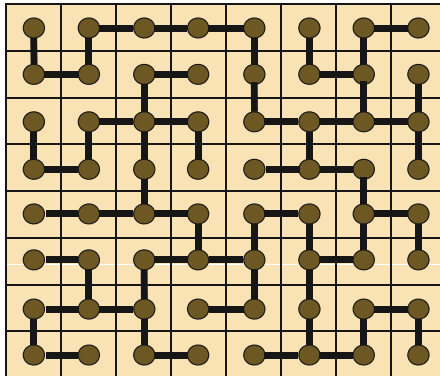
## ตัวอย่าง



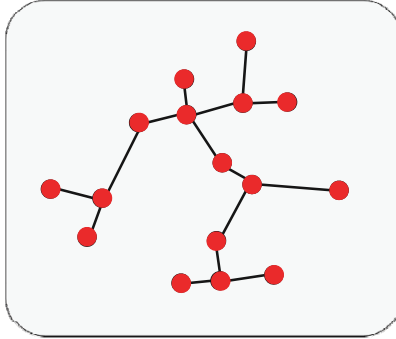
## สร้างเขาวงกตด้วย MST



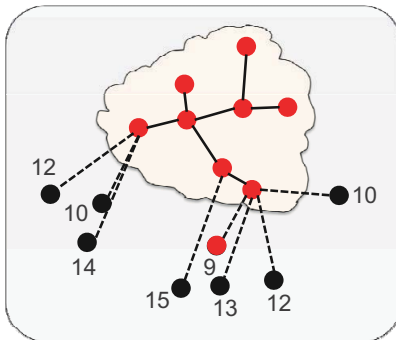
## สร้างเขาวงกตด้วย MST



# Prim's Algorithm



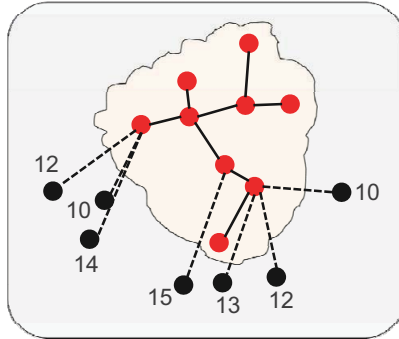
# Prim's Algorithm : Min-Heap



Prim is "greedy"

เลือกเส้นสั้นสุดที่ต่อกับต้นไม้ที่กำลังโต

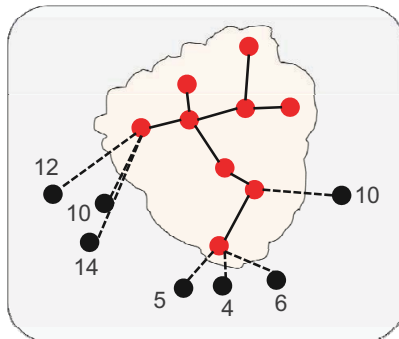
## Prim's Algorithm : Min-Heap



Prim is "greedy"

เลือกเส้นสั้นสุดที่ต่อกับต้นไม้ที่กำลังโต

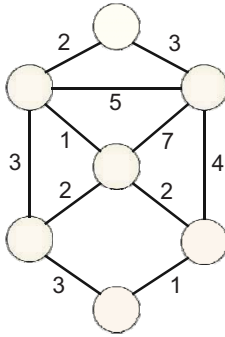
## Prim's Algorithm : Min-Heap



Prim is "greedy"

เลือกเส้นสั้นสุดที่ต่อกับต้นไม้ที่กำลังโต

## ตัวอย่าง : Prim



## Prim's Algorithm

```

Prim( G=(V,E) ) {
  for each vertex v in V {
    d[v] = ∞; p[v] = null
    inMST[v] = false
  }
  select an arbitrary vertex v and let's d[v] = 0
  H = a min heap of all vertices ordered by d[]
  while( H ≠ ∅ ) {
    u = H.removeMin()
    inMST[u] = true
    for each v ∈ adj(u) {
      if( !inMST[v] AND w(u,v) < d[v] ) {
        d[v] = w(u,v); H.decreaseKey(v)
        p[v] = u
      }
    }
  }
  return p;
}
    
```

ใช้ binary heap

dense graph  $\rightarrow e = \Theta(v^2)$

$O(e \log v)$

$O(v^2 \log v)$



## Prim's Algorithm

```

Prim( G[1..n][1..n] ) {
  for ( v = 1; v <= n; v++ ) {
    d[v] = ∞; p[v] = null
    inMST[v] = false
  }
  select an arbitrary vertex v and let's d[v] = 0
  for ( i = 1; i <= n; i++ ) {
    u = minIndex( d ); d[u] = ∞ ← Θ(n)
    inMST[u] = true
    for ( v = 1; v <= n; v++ ) {
      if( !inMST[v] AND G[u][v] < d[v] ) {
        d[v] = G[u][v];
        p[v] = u
      }
    }
  }
  return p;
}

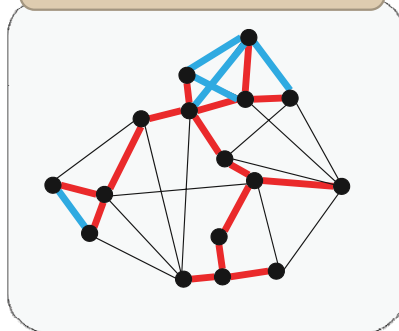
```

ใช้ adjacency matrix

$\Theta(n^2)$        $\Theta(v^2)$

## Kruskal's Algorithm

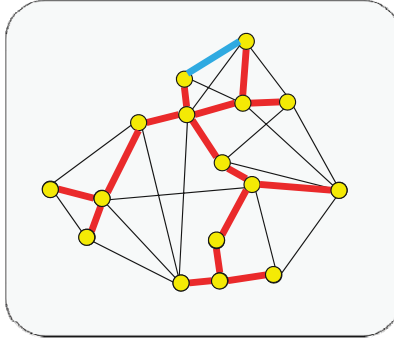
ตรวจว่าเกิดวงอย่างไร (เร็ว ๆ)



Kruskal is "greedy"

เลือกเส้นสั้นสุดที่เชื่อมต้นไม้  
สองต้นที่ต่างกันในปี

## Kruskal's Algorithm



Kruskal is "greedy"

เลือกเส้นสั้นสุดที่เชื่อมต้นไม้  
สองต้นที่ต่างกันในปีา

## Kruskal's Algorithm

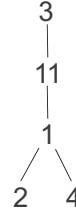
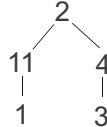
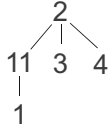
```

Kruskal( G=(V,E) ) {
  for each v in V create a set {v}

  H = a min heap of all edges ordered by weights
  T = an empty list
  while ( T.size() < |V|-1 ) {
    (u,v) = H.removeMin()
    if ( findSet(u) ≠ findSet(v) ) {
      T.add( (u,v) )
      unionSet( findSet(u), findSet(v) )
    }
  }
  return T
}

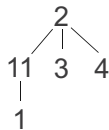
```

## แทนเซตด้วยต้นไม้

 $\{1, 2, 3, 4, 11\}$ 

แบบใดก็ได้ อยู่ในต้นไม้เดียวกัน เป็นเซตเดียวกัน

## แทนกลุ่มเซตด้วยป่าไม้

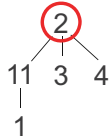
 $\{11, 1, 2, 3, 4\}, \{5, 7\}, \{6, 8, 9\}, \{10\}$ 

กลุ่มเซตไม่มีส่วนร่วม  
(Disjoint Sets)

ขอใช้กลุ่มเซตที่สมาชิกเป็นจำนวนเต็ม  
 $1, 2, \dots, n$

## findSet และ unionSet

ให้รากแทนหมายเลขเซต



findSet(1) ได้ 2

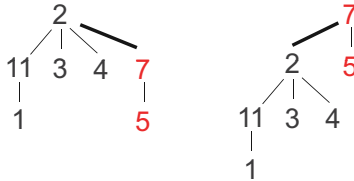
findSet(3) ได้ 2

...

findSet(5) ได้ 7

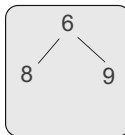
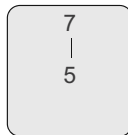
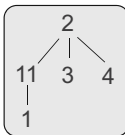
findSet(7) ได้ 7

unionSet(2, 7)



## การแทน Disjoint Sets

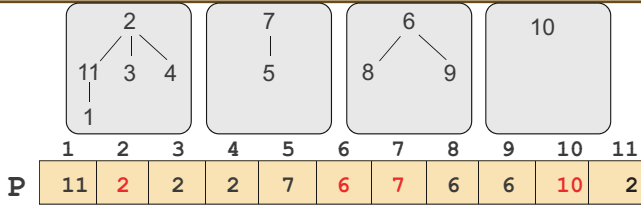
{11, 1, 2, 3, 4}, {5, 7}, {6, 8, 9}, {10}



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P	11	2	2	2	7	6	7	6	6	10	2

$P[k]$  คือหมายเลขพ่อของ  $k$

## Disjoint Sets : findSet

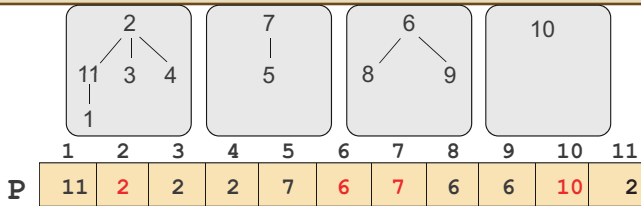


```
findSet( e ) {
  while( P[e] ≠ e ) {
    e = P[e]
  }
  return e
}
```

```
findSet( e ) {
  if ( P[e] == e )
    return e
  else
    return findSet(P[e])
}
```

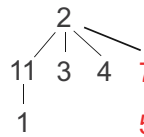
ใช้เวลาแปรตามความสูงของต้นไม้

## Disjoint Sets : unionSet

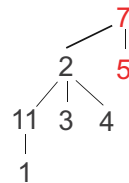


```
unionSet( s, t ) {
  P[t] = s;
}
```

unionSet(2, 7)

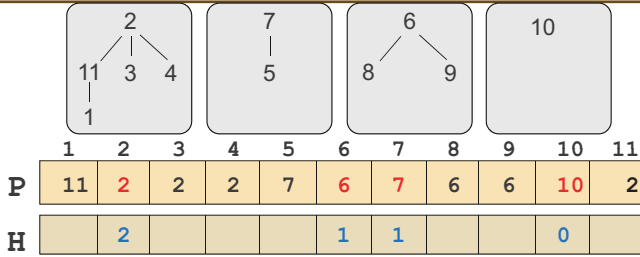


unionSet(7, 2)



ต้องการต้นไม้เตี้ย  
ทำให้ findSet เร็ว

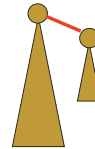
## Disjoint Sets : unionSet



```

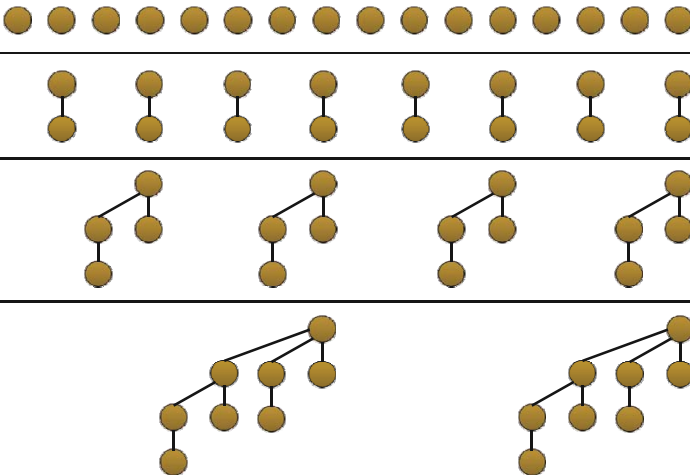
unionSet( s, t ) {
    if ( H[s] > H[t] ) {
        P[t] = s;
    } else {
        P[s] = t;
        if ( H[s] == H[t] ) H[t]++;
    }
}
    
```

$O(1)$



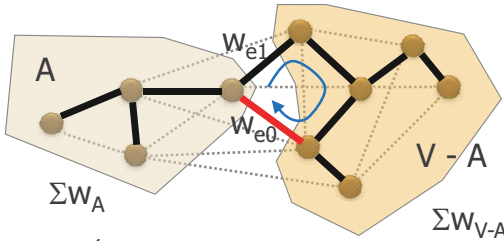
ต้นไม้เป็นลูกของ  
รากของต้นไม้สูง

## unionSet ให้ต้นไม้สูงสุด ๆ





## เลือกเส้นนำไปสู่ MST



ให้ต้นด้าเป็น MST

ดังนั้น  $\Sigma W_A + w_{e1} + \Sigma W_{V-A}$  ต่ำสุด

ให้  $w_{e0} \leq w_{e1}$

ลบ  $e1$ , เพิ่ม  $e0$

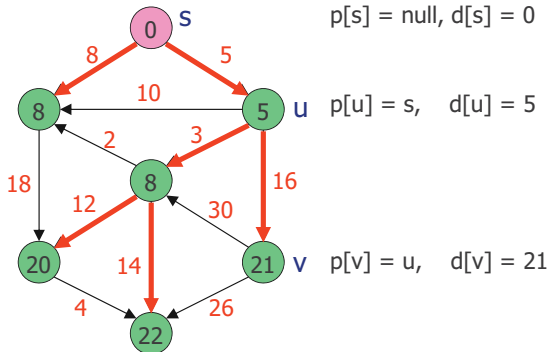
ได้ spanning tree ใหม่ที่มี  $\Sigma w \leq \Sigma w$  ของ MST

แสดงว่า  $e0$  อยู่ใน MST

## วิธีสั้นสุดจากแหล่งต้นทางเดียว

- ❖ ให้  $G$  เป็นกราฟระบุทิศทาง เส้นเชื่อมมีความยาว
- ❖ ต้องการหาวิธีสั้นสุดจากปม  $s$  ใน  $G$  ไปยังปมอื่น ๆ
- ❖ สิ่งที่ได้ : Shortest-path tree

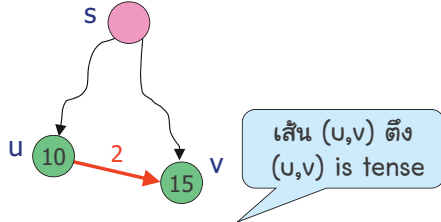
ค่าเดือน  
Shortest Path Tree  
ไม่ใช่ Minimum  
Spanning Tree





## เส้นตึง + คลายเส้น

$d[u]$  เก็บความยาวของวิถีสั้นสุดเท่าที่รู้จักจาก  $s$  ไป  $u$



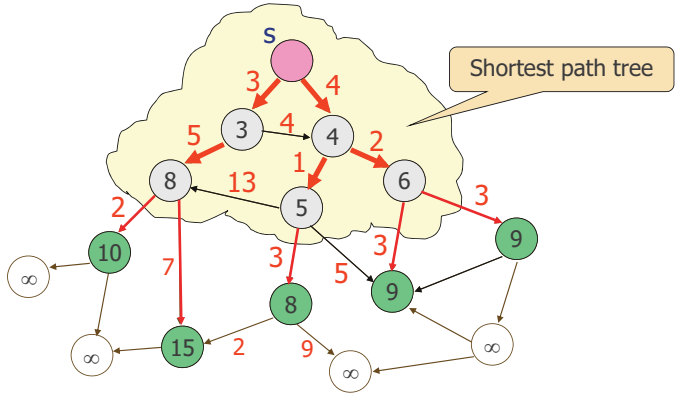
พิจารณาเส้นเชื่อม  $(u,v)$  พบว่า  $d[u] + w(u,v) < d[v]$

แสดงว่า พบวิถีใหม่ผ่าน  $(u,v)$  ไป  $v$  ที่สั้นกว่าของเดิมที่เป็น  $d[v]$

ดังนั้นเปลี่ยน  $d[v] = d[u] + w(u,v)$  และเปลี่ยน  $p[v] = u$

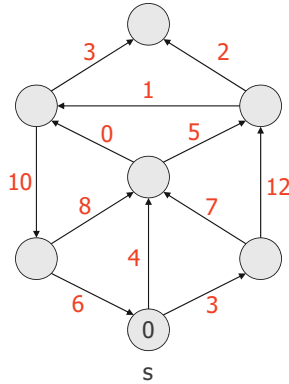
คลายเส้น  $(u,v)$   
relax  $(u,v)$

## แนวคิดของ Dijkstra's Algorithm



ขยาย Shortest path tree  
โดยเลือกปมที่มี  $d[]$  ต่ำสุด

## Dijkstra Algorithm : ตัวอย่าง



## อัลกอริทึมของ Dijkstra

```

Dijkstra( G=(V,E), s ) {
  for each v ∈ V {
    d[v] = ∞; p[v] = null;
  }
  d[s] = 0
  H = a min heap of all vertices ordered by d[]
  while (H ≠ ∅) {
    u = H.removeMin()
    for each v ∈ Adj(u) {
      if ( d[u]+w(u,v) < d[v] ) {
        d[v] = d[u] + w(u,v); H.decreaseKey(v)
        p[v] = u
      }
    }
  }
  return d
}
    
```

$O(e \log v)$

ถ้า เส้น (u,v) ตีง

relax (u,v)

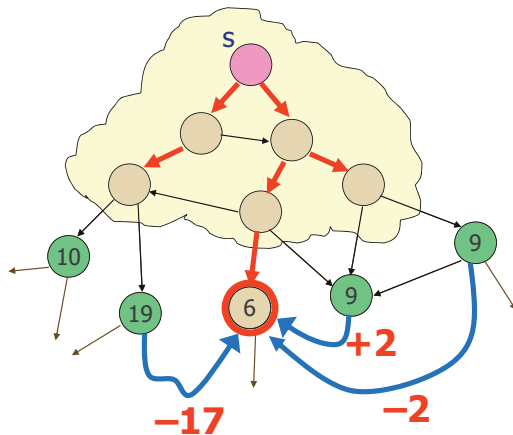
แต่ละปมถูกนำออกจากฮิปหนึ่งครั้ง  
เส้นเชื่อมแต่ละเส้นถูกคลายอย่างมากหนึ่งครั้ง

## Dijkstra คล้าย Prim

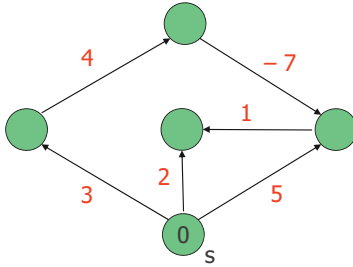
```

Dijkstra( G=(V,E), s ) {
  for each v in V {
    d[v] = ∞; p[v] = null
    inMST[v] = false
  }
  select an arbitrary vertex v and let's d[v] = 0
  H = a min heap of all vertices ordered by d[]
  while( H ≠ ∅ ) {
    u = H.removeMin()
    inMST[u] = true
    for each v ∈ adj(u) { d[u]+
      if( !inMST[v] AND w(u,v) < d[v] ) {
        d[v] = w(u,v); H.decreaseKey(v)
        p[v] = u
      }
    }
  }
  return p;
}
    
```

## ถ้ามี negative-weight edges

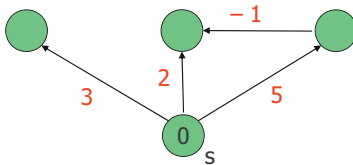


## ถ้ามี negative-weight edges



Dijkstra's algorithm  
อาจให้คำตอบผิด

## ถ้ามี negative-weight edges



Dijkstra's algorithm  
อาจให้คำตอบถูก

## ลองคิดดู

```

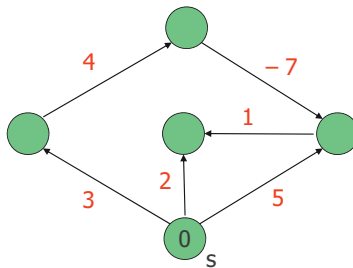
ModifiedDijkstra( G=(V,E), s ) {
  for each v ∈ V {
    d[v] = ∞; p[v] = null;
  }
  d[s] = 0
  H = an empty min heap;
  H.add(s)
  while (H ≠ ∅) {
    u = H.removeMin()
    for each v ∈ Adj(u) {
      if ( d[u]+w(u,v) < d[v] ) {
        d[v] = d[u] + w(u,v); H.decreaseKey(v)
        p[v] = u
        H.add(v)
      }
    }
  }
  return d
}
    
```

อัลกอริทึมนี้รองรับเส้นเชื่อม  
ความยาวลบได้หรือไม่ ?

มีข้อเสียอะไร ?

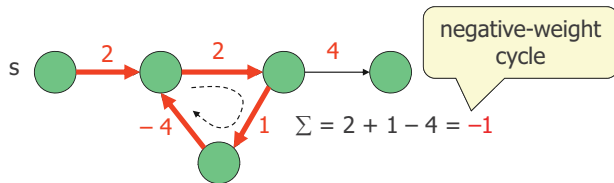
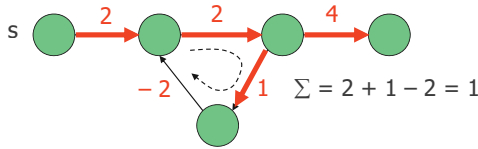
เพิ่มปมปลายเส้นเชื่อม  
ที่เคยตั้ง ให้กับ heap

## ModifiedDijkstra



มีข้อเสียอะไร ?

## Negative-Weight Cycles



หาวิถีสั้นสุดไม่ได้  
เพราะมันสั้นลงเรื่อย ๆ เมื่อหมุนในวง

## อัลกอริทึมของ Bellman-Ford

- ❖ ใช้ได้กับ negative-weight edge
- ❖ จะแจ้งให้ทราบ ถ้ามี negative-weight cycle
- ❖ ใช้ dynamic programming
- ❖ วิถีสั้นสุดจาก  $s$  ไป  $t$ 
  - ❖ ต้องไม่ผ่านปมซ้ำ
  - ❖ มีเส้นเชื่อมในวิถีอย่างมาก  $|\mathcal{V}| - 1$  เส้น
- ❖ ให้  $d(i, v)$  แทนความยาวของวิถีสั้นสุดจาก  $s$  ไป  $v$  ที่มีเส้นเชื่อมอย่างมาก  $i$  เส้น

$$d(i, v) = \min \begin{cases} d(i-1, v) \\ \min_{u \in \text{Adj}(v)} \{ d(i-1, u) + w(u, v) \} \end{cases}$$

$d(?, s) = 0, d(0, v) = \infty$  ต้องการ  $d(|\mathcal{V}| - 1, v)$

## อัลกอริทึมของ Bellman-Ford

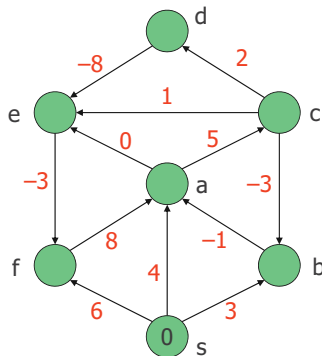
$$d_i(v) = \min \begin{cases} d_{i-1}(v) \\ \min_{u \in \text{Adj}(v)} \{ d_{i-1}(u) + w(u, v) \} \end{cases}$$

```

BellmanFord(G=(V,E), s) {
  for each v ∈ V {
    d[v] = ∞; p[v] = null;
  }
  d[s] = 0
  for (i=1; i<|V|; i++) {
    for each edge (u,v) in E
      if ( d[u]+w(u,v) < d[v] ) {
        d[v] = d[u] + w(u,v)
        p[v] = u;
      }
  }
  return d
}
    
```

$\Theta(|V|)$   
 $\Theta(|E|)$   
 $\Theta(|V||E|)$

## Bellman-Ford : ตัวอย่าง



s, a, b, c, d, e, f

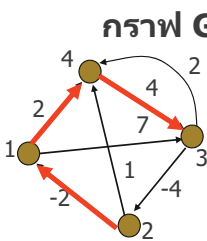
## มี negative-weight cycle ?

- ❖ relax เส้นตั้งทุกเส้นเป็นจำนวน  $|V|-1$  รอบ
- ❖ ตรวจสอบเส้นเชื่อมทุกเส้นอีกรอบ
- ❖ ถ้ายังมีเส้นตั้ง  $\rightarrow$  มี negative-weight cycle

```

BellmanFord( G=(V,E), s ) {
  for each v  $\in$  V {
    d[v] =  $\infty$ ; p[v] = null;
  }
  d[s] = 0
  for (i=1; i<|V|; i++)
    for each edge (u,v)  $\in$  E
      if ( d[u]+w(u,v) < d[v] ) {
        d[v] = d[u] + w(u,v); p[v] = u;
      }
  for each edge (u,v)  $\in$  E
    if ( d[u]+w(u,v) < d[v] ) return null
  return d;
}
    
```

## วิธีสั้นสุดของทุกคู่ปมในกราฟ



shortest path tree ของวิธีสั้น  
สุดจากปม 2 ถึงปมอื่น ๆ

$W$	1	2	3	4
1	0	-	7	2
2	-2	0	-	1
3	-	-4	0	2
4	-	-	4	0

$D$	1	2	3	4
1	0	2	6	2
2	-2	0	4	0
3	-6	-4	0	-4
4	-2	0	4	0

$P$	1	2	3	4
1	-	3	4	1
2	2	-	4	1
3	2	3	-	1
4	2	3	4	-



## การหาวิถีที่สั้นที่สุดของทุกคู่ปม

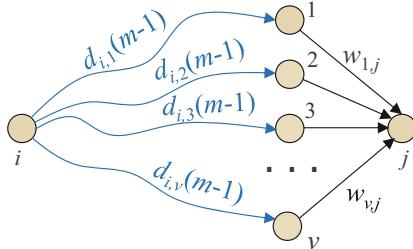
- ❖ หา **single-source shortest paths** ของทุกปม
  - ❖ เรียก Dijkstra  $v$  ครั้ง (ความยาวเส้นเชื่อมห้ามเป็นลบ)
    - ❖ binary heap + adj. list :  $O(v \cdot e \log v)$
    - ❖ linear array + adj. matrix :  $O(v \cdot v^2) = O(v^3)$
  - ❖ เรียก Bellman-Ford  $v$  ครั้ง (เส้นเชื่อมยาวเป็นลบได้)
    - ❖  $O(v^2e)$  ซึ่งเป็น  $O(v^4)$  สำหรับ dense graph
- ❖ ใช้กำหนดการพลวัต
  - ❖ ตรงไปตรงมา :  $\Theta(v^4)$
  - ❖ repeated squaring :  $\Theta(v^3 \log v)$
  - ❖ Floyd-Warshall :  $\Theta(v^3)$

## นิยามความยาวของวิถีที่สั้นที่สุด

- ❖ **Single-source**
  - ❖ ให้  $d_m(j)$  แทนความยาวของวิถีที่สั้นที่สุดจาก  $s$  ไป  $j$  ที่มีเส้นเชื่อมอย่างมาก  $m$  เส้น
- ❖ **All-pair**
  - ❖ ให้  $d_m(i, j)$  แทนความยาวของวิถีที่สั้นที่สุดจาก  $i$  ไป  $j$  ที่มีเส้นเชื่อมอย่างมาก  $m$  เส้น
  - ❖ ขอเปลี่ยนเป็น  $d_m(i, j)$  เป็น  $d_{i,j}(m)$

## คำตอบใหญ่ได้จากคำตอบย่อย

- ❖ ให้  $d_{ij}(m)$  แทนความยาวของวิถีสั้นสุดจาก  $i$  ไป  $j$  ที่ใช้เส้นเชื่อมไม่เกิน  $m$  เส้น



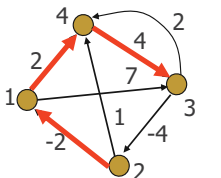
$$d_{ij}(m) = \min \{ d_{i,k}(m-1) + w_{k,j} \}$$

$$1 \leq k \leq v$$

$$d_{i,i}(0) = 0, d_{i,j}(0) = \infty, d_{i,j}(1) = w_{i,j}, w_{i,i} = 0$$

## การคำนวณความยาวของวิถีสั้นสุด

- ❖ วิถีสั้นสุดยอมไม่ผ่านปมซ้ำ
- ❖ ถ้า  $G$  มี  $v$  ปม, วิถีสั้นสุดของปมคู่ใด ๆ ต้องใช้เส้นเชื่อมไม่เกิน  $v - 1$  เส้น



ความยาวของวิถีสั้นสุด  
จาก  $i$  ไป  $j$  ที่ใช้เส้น  
เชื่อมไม่เกิน  $m$  เส้น

- ❖ ให้  $D(m)$  คือเมตริกซ์ที่เก็บ  $d_{ij}(m)$ 
  - ❖  $D(1) = W$  ( $W$  คือ adjacency matrix ของ  $G$ )
- ❖ เริ่มที่  $D(1)$  คำนวณหา  $D(2), D(3), \dots, D(v - 1)$

$$d_{ij}(m) = \min \{ d_{i,k}(m-1) + w_{k,j} \}$$

$$1 \leq k \leq v$$

## แบบช้า

```

APSP_Slow( W[1..v][1..v] ) {
    D[1] = W
    for(m = 2; m < v; m++)
        D[m] = ExtendShortestPath( D[m-1], W );
    return D[v-1];
}
    
```

$\Theta(v^4)$

หา  $D(2), D(3), \dots, D(v-1)$

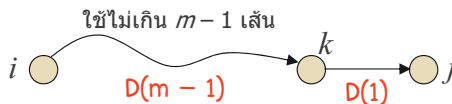
```

ExtendShortestPath( d[1..v][1..v], W[1..v][1..v] ) {
    for (i = 1; i <= v; i++) {
        for (j = 1; j <= v; j++) {
            dm[i][j] = ∞;
            for (k = 1 to v) {
                dm[i][j] = min( dm[i][j], d[i][k] + W[k][j] );
            }
        }
    }
    return dm;
}
    
```

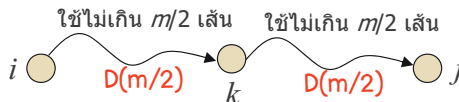
$$d_{i,j}(m) = \min_{1 \leq k \leq v} \{ d_{i,k}(m-1) + w_{k,j} \}$$

## ปรับปรุงให้เร็วขึ้น

❖ แบบช้า :  $D(m)$  หาจาก  $D(m-1)$  กับ  $D(1)$



❖ แบบเร็ว :  $D(m)$  หาจาก  $D(m/2)$  กับ  $D(m/2)$



❖ เริ่ม  $D(1)$  หา  $D(2), D(4), D(8), \dots$  (เรียกว่า)

❖ กราฟไม่มีวงลบ,  $D(v-1)=D(v)=D(v+1)=\dots$

❖ ต้องการ  $D(v-1)$  ก็หา  $D(2^k)$   $2^k \geq v-1$

❖ เช่น ต้องการ  $D(13)$  ก็หา  $D(16)$ , ต้องการ  $D(57)$  ก็หา  $D(64)$

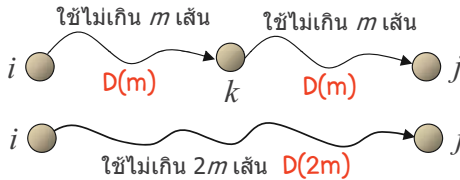
## แบบกำลังสองซ้ำ

```

APSP_RepeatedSquare( W[1..v][1..v] ) {
    D = W;
    m = 1;
    while ( m < v-1 ) {
        D = ExtendShortestPath( D, D );
        m = 2*m;
    }
    return D ;
}
    
```

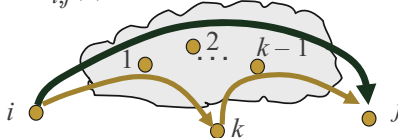
$\Theta(v^3 \log v)$

$2^c \geq v-1$   
 $c \geq \log_2(v-1)$   
 $c = \lceil \log_2(v-1) \rceil$



## อัลกอริทึมของ Floyd-Warshall

- ❖ เปลี่ยนแนวคิดการเขียน recurrence
- ❖ ให้  $d_{i,j}(k)$  แทนความยาวของวิถีสั้นสุดจากปม  $i$  ไป  $j$  ที่สามารถใช้จุดใน  $\{1,2,3,\dots,k\}$  เป็นปมระหว่างทาง
  - ❖  $d_{i,j}(0)$  คือ  $w_{i,j}$  (ไม่มีปมระหว่างทาง)
  - ❖ ต้องการ  $d_{i,j}(v)$ ,  $v =$  จำนวนปม (สามารถใช้ได้ทุกปม)



$$d_{i,j}(k) = \min( d_{i,j}(k-1), d_{i,k}(k-1) + d_{k,j}(k-1) )$$

$$d_{i,j}(0) = w_{i,j}$$

## อัลกอริทึมของ Floyd-Warshall

```

FloydWarshall( W[1..v][1..v] ) {
  D = W
  for (k = 1; k <= v; k++) {
    for (i = 1; i <= v; i++) {
      for (j = 1; j <= v; j++) {
        D[i][j] = min( D[i][j],
                      D[i][k] + D[k][j] );
      }
    }
  }
  return D;
}

```

ให้ใช้ปม {1,2,...,k} เป็นปมระหว่างทาง

$\Theta(v^3)$

$$d_{i,j}(k) = \min( d_{i,j}(k-1), d_{i,k}(k-1) + d_{k,j}(k-1) )$$

$$d_{i,j}(0) = w_{i,j}$$

## การหาวิถีสั้นที่สุดของทุกคู่ปม

- ❖ ใช้กำหนดการพลวัต
  - ❖ ตรงไปตรงมา :  $\Theta(v^4)$
  - ❖ repeated squaring :  $\Theta(v^3 \log v)$
  - ❖ Floyd-Warshall :  $\Theta(v^3)$
- ❖ อัลกอริทึมของ Johnson
  - ❖  $O(v \cdot e \log v)$  ดีสำหรับ sparse graph

## อัลกอริทึมของ Johnson

- ❖ ใช้ Dijkstra หา single-source shortest path ของทุกปม
  - ❖ linear array :  $O(v \cdot v^2) = O(v^3)$
  - ❖ binary heap :  $O(v \cdot e \log v)$
- ❖ แต่ Dijkstra ไม่รับ negative-weight edges
- ❖ ดังนั้น
  - ❖ เปลี่ยน G ให้เป็นกราฟใหม่ K ที่ไม่มีเส้นเชื่อมติดลบ (โดยวิธีสั้นสุดของ G ต้องเหมือนวิธีสั้นสุดของ K)
  - ❖ แล้วใช้ Dijkstra จำนวน  $v$  ครั้งเพื่อหาวิธีสั้นสุดของทุกคู่ปม

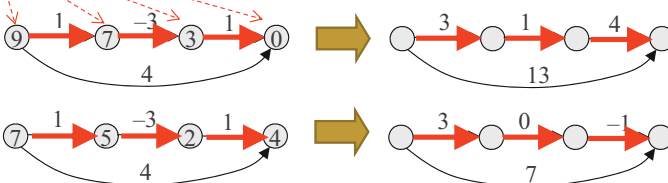
## การปรับความยาวเส้นเชื่อม



$$w^*_{i,j} = w_{i,j} + h(i) - h(j)$$

$h(\cdot)$

$$1 + 9 - 7 = 3$$



## ความยาวใหม่ของวิถี



$$w^*_{i,a} = w_{i,a} + h(i) - h(a)$$

$$w^*_{a,b} = w_{a,b} + h(a) - h(b)$$

$$w^*_{b,j} = w_{b,j} + h(b) - h(j)$$

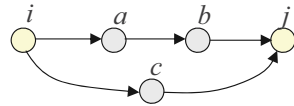
$$\begin{aligned} w^*_{i,a} + w^*_{a,b} + w^*_{b,j} &= w_{i,a} + w_{b,j} + w_{a,b} + \\ &\quad h(i) - h(a) + h(a) - h(b) + h(b) - h(j) \\ &= w_{i,a} + w_{b,j} + w_{a,b} + h(i) - h(j) \end{aligned}$$

$$w^*(i \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow j) = w(i \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow j) + h(i) - h(j)$$

## $h(i)$ มีค่าเท่าไรก็ได้ วิถีสั้นสุดไม่เปลี่ยน

### ❖ พิจารณาปม $i$ กับ $j$

- ❖ วิถีใด ๆ ของปมคู่นี้ ถึงแม้ผ่านปมต่างกัน แต่มีปมปลายเหมือนกัน



- ❖ ความยาวใหม่ของวิถีใด ๆ ของปมคู่นี้ เพิ่มขึ้นปริมาณเท่ากัน

$$w^*(i \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow j) = w(i \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow j) + h(i) - h(j)$$

$$w^*(i \rightarrow c \rightarrow j) = w(i \rightarrow c \rightarrow j) + h(i) - h(j)$$

- ❖ ดังนั้นวิถีสั้นสุด (หลังปรับความยาว) ไม่เปลี่ยน

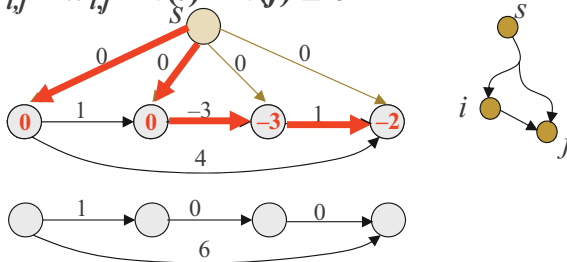
- ❖ ความยาวของวงในกราฟก็ไม่เปลี่ยน

$$w^*(d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow d) = w(d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow d) + h(d) - h(d)$$



## วิธีหา $h(i)$ ที่ทำให้ไม่มีเส้นเชื่อมติดลบ

- ❖ เติมปม  $s$  และเส้นเชื่อมยาว  $0$  จาก  $s$  ถึงทุกปม
- ❖ หาวิถีสั้นสุดจาก  $s$  ถึงทุกปม (ใช้ Bellman-Ford)
- ❖ ให้  $h(i)$  = ความยาวของวิถีสั้นสุดจาก  $s$  ไป  $i$
- ❖ ดูเส้นเชื่อม  $(i, j)$  จะได้ว่า  $h(i) + w_{ij} \geq h(j)$
- ❖ ดังนั้น  $w^*_{ij} = w_{ij} + h(i) - h(j) \geq 0$



## อัลกอริทึมของ Johnson

```

Johnson( G ) {
    create K : K.V = G.V ∪ {s}
           : K.E = G.E ∪ {(s,i) | i ∈ G.V}
           : K.w = G.w, K.w(s,i) = 0, i ∈ K.V
    h = BellmanFord(K, s)
    if (h == null) return "Negative Cycle"
    else {
        for each edge (i,j) ∈ G.E
            G.w(i,j) += h[i] - h[j]
        for each vertex i ∈ G.V {
            d = Dijkstra(G, i)
            for each vertex j ∈ G.V
                D[i][j] = d[j] - (h[i] - h[j])
        }
    }
    return D
}
    
```

←  $\Theta(v^2)$

←  $O(e \log v)$

ถ้า Dijkstra ใช้ binary heap จะทำให้ Johnson ใช้เวลา  $O(ve \log v)$  ซึ่งดีกว่า FloydWarshall เมื่อใช้กับ sparse graph



## ลองคิดดู

- ❖ ถ้า  $G$  มีวง  $c$  ที่มีความยาวรวมของวงใน  $c$  เป็น  $0$ 
  - ❖ อยากทราบว่า ความยาวใหม่ของเส้นเชื่อม  $w^*$  แต่ละเส้นใน  $c$  หลังการปรับความยาว จะเป็นเท่าใด
- ❖ จริงหรือไม่ ถ้า  $G$  เป็น **strongly connected graph**
  - ❖ เราไม่จำเป็นต้องเพิ่ม  $p_m$   $s$  ตาม Johnson
  - ❖ แต่ใช้  $p_m$  ใดก็ได้ใน  $G$  เป็น  $p_m$  เริ่ม เพื่อใช้ Bellman-Ford หา  $h(i)$  ก็ได้

# การค้นปริภูมิสถานะ

## สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

### หัวข้อ

การแจกแจงผลเฉลยทุกรูปแบบ

การค้นในแนวลึก

การค้นในแนวกว้าง

การย่อหน่วย

การค้นตามต้นทุนน้อยสุด

การขยายและจำกัดเขต

## ลำดับการตัดสินใจ

- ❖ คำตอบได้มาจากการลำดับของการตัดสินใจ
  - ❖ Sorting : สลับคู่ใดก่อน ?
  - ❖ Activity Selection : ทำกิจกรรมใดก่อน ?
  - ❖ MST : เลือกเส้นเชื่อมใดมาเป็นของ MST ?
  - ❖ Knapsack : หยิบของชิ้นใดใส่ถุงเป้ ?
- ❖ **Greedy :**
  - ❖ วิธีเลือกแบบ greedy ที่ใช้เข้าไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด (เจอกรณีแบบนี้ไม่มาก)
- ❖ **Dynamic Programming**
  - ❖ หาคำตอบย่อยทุกแบบ เพื่อใช้ตัดสินใจสร้างคำตอบของปัญหาใหญ่
  - ❖ เร็วเมื่อจำนวนปัญหาย่อยทั้งหมดมีไม่มาก
- ❖ **แต่มีปัญหามากมาย**
  - ❖ ไม่รู้วิธีเลือกแบบ greedy ที่ดีที่สุด
  - ❖ จำนวนปัญหาย่อยมีมาก

ลunyaทุกรูปแบบ  
แต่จะลunyaแบบฉลาด ๆ

## Sum of Subset (ที่เคยนำเสนอ)

- ❖ **input** :  $k$  และ  $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$   
 $k$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง
- ❖ **output** : true ถ้า  $D$  มีเซตย่อยที่ผลรวมเท่ากับ  $k$   
ถ้าไม่มี คืน false

$D = \{1, 4, 1, 9, 7\}, k = 11$  true

$D = \{1, 4, 1, 9, 7\}, k = 19$  false

## Sum of Subset (อีกแบบ)

- ❖ **input** :  $k$  และ  $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$   
 $k$  และ  $d_i$  เป็นจำนวนจริง
- ❖ **output** : หา  $S \subseteq D$  ที่ผลรวมของ  $S$  มีค่าเป็น  $k$

$$D = \{ 1, 4, 1, 9, 7 \}, \quad k = 11$$

$$S = \{ 1, 1, 9 \}, \quad \{ 4, 7 \}$$

## รูปแบบของผลเฉลย

- ❖ **Sum of subset**
  - ❖ output : หา  $S \subseteq D$  ที่ผลรวมของ  $S$  มีค่าเป็น  $k$
- ❖ **คำตอบเป็นเซต**
  - ❖ ใช้ bit vector (อาเรย์ 1 มิติ)  $X = \langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle$
  - ❖  $x_m = 1 \rightarrow d_m \in S$
  - ❖  $x_m = 0 \rightarrow d_m \notin S$
- ❖ **ตัวอย่าง**
  - ❖ input :  $D = \{2, 10, 3, 5, 7\}, k = 14$
  - ❖ output :  $X = \langle 1, 0, 0, 1, 1 \rangle$
- ❖ **กำหนดรูปแบบของคำตอบให้แจ่มแจ้งได้ง่าย**

## ลุยทุกเซตย่อย

- ❖ input :  $D = \{2, 10, 3, 5, 7\}$ ,  $k = 14$
- ❖ แจกแจงเซตย่อยของ  $D$  ทั้งหมดมาตรวจสอบ
- ❖ คิดถึง binary counter
- ❖ ขำ : ต้องแจกแจงเซตย่อย  $2^n$  เซต

```

bcounter( n ) {
    x = new array[1..n] with all 0's
    for ( i = 1; i <= 2^n; i++) inc( x )
}
inc( x[1..n] ) {
    for ( i=n; i>=1 AND x[i]==1; i-- )
        x[i] = 0
    if ( i >= 1 ) x[i] = 1
}

```

```

<0,0,0,0,0>
<0,0,0,0,1>
<0,0,0,1,0>
<0,0,0,1,1>
<0,0,1,0,0>
<0,0,1,0,1>
<0,0,1,1,0>
<0,0,1,1,1>
<0,1,0,0,0>
.
.
<1,1,1,0,1>
<1,1,1,1,0>
<1,1,1,1,1>

```

```

<0,0,1,1,1>
  ↓ ↓ ↓ ↓
<0,1,0,0,0>

```

## Sum of Subset

```

subsetSum( d[1..n], k ) {
    x = new array[1..n] with all 0's
    for ( i = 1; i <= 2^n; i++) {
        if ( sum(d, x) == k ) print( x )
        inc( x )
    }
}
inc( x[1..n] ) {
    for ( i=n; i>=1 AND x[i]==1; i-- )
        x[i] = 0
    if ( i >= 1 ) x[i] = 1
}

```

$$\text{sum}(d, x) = \sum_{j=1}^n x[j]d[j]$$

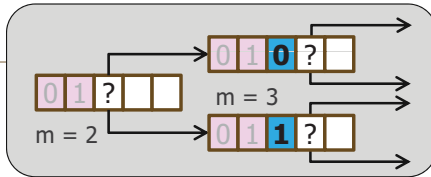
# Binary Counter : Recursive

```

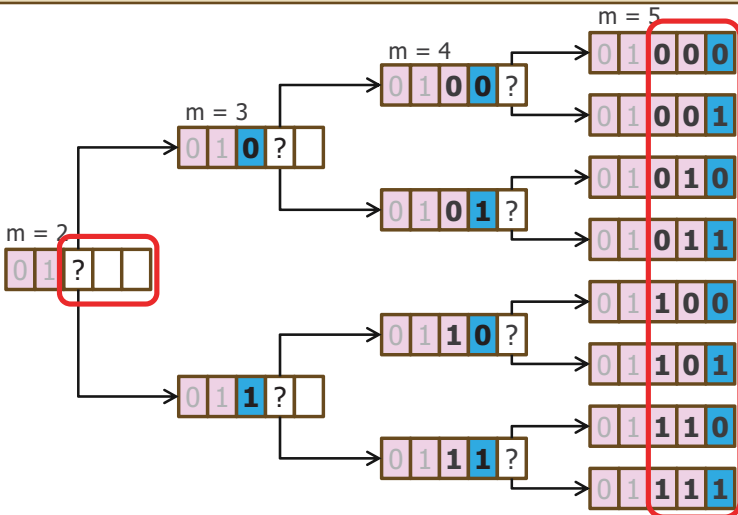
bcounter( n ) {
  x = new array[1..n] with all 0's
  count( x, 0 )
}
count( x[1..n], m ) {
  if ( m == n ) print( x )
  else {
    x[m+1] = 0; count( x, m+1 )
    x[m+1] = 1; count( x, m+1 )
  }
}
    
```

เติม x[1..m] แล้ว  
จึงเติมที่เหลือ

เติมครบแล้ว



## ขั้นตอนการเติม x[1..n]

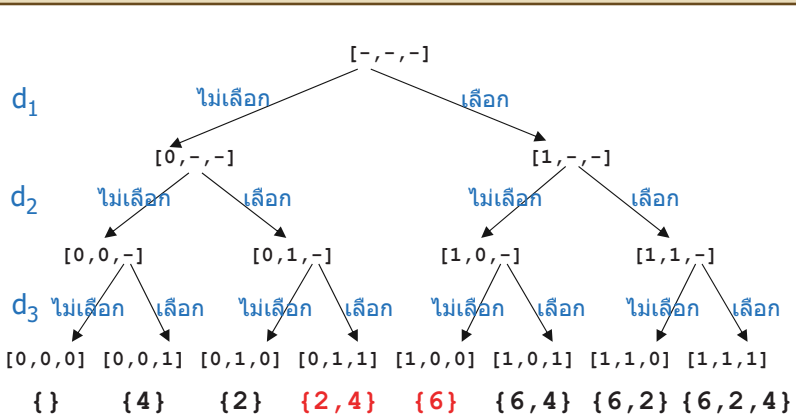


# Sum of Subset : ลุยทุกเซตย่อย (#1)

```
subsetSum( d[1..n], k ) {
    x = new array[1..n] with all 0's
    subsetSum( d, k, x, 0 )
}
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
    if (m == n) {
        if (sum(d, x) == k) print( x )
    } else {
        x[m+1] = 0; subsetSum( d, k, x, m+1 )
        x[m+1] = 1; subsetSum( d, k, x, m+1 )
    }
}
```

$$\Theta( n2^n )$$

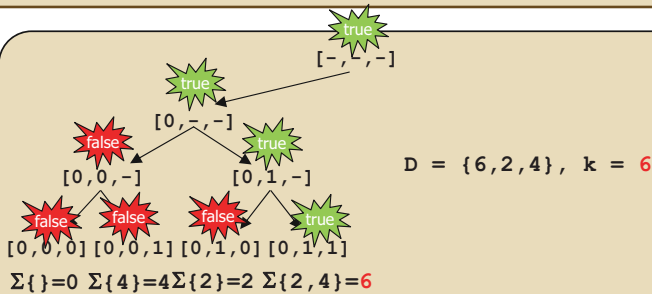
## D = {6, 2, 4}, k = 6



## ถ้าต้องการคำตอบเดียว

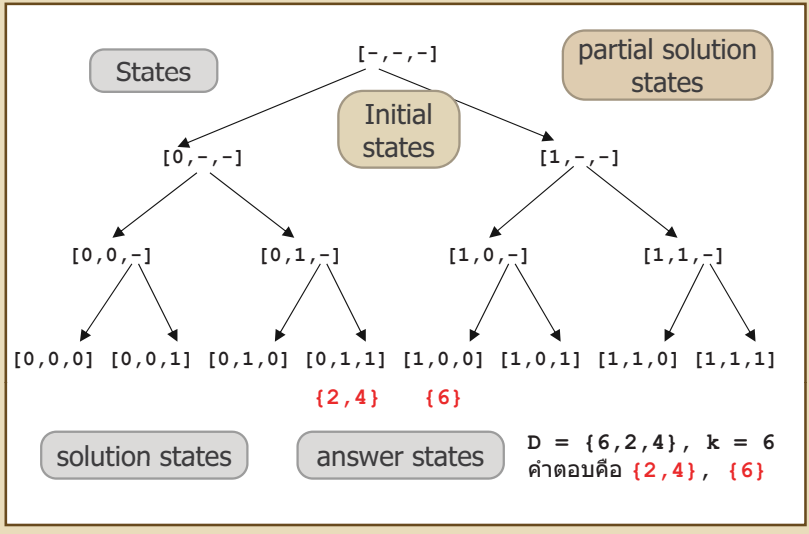
```
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
    found = false
    if (m == n) {
        if (sum(d, x) == k) {
            print( x ); found = true
        }
    } else {
        x[m+1] = 0;
        found = subsetSum( d, k, x, m+1 )
        if (! found) {
            x[m+1] = 1;
            found = subsetSum( d, k, x, m+1 )
        }
    }
    return found
}
```

## ถ้าต้องการคำตอบเดียว



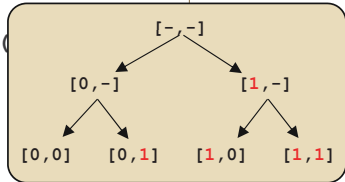


## ปริภูมิสถานะ (State Space)

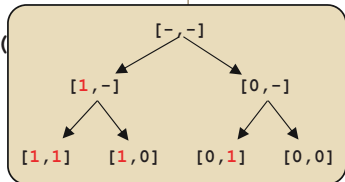


## ปริภูมิสถานะมีได้หลายแบบ

```
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
    if ( m == n ) {
        if ( sum(d, x) == k ) print( ... )
    } else {
        x[m+1] = 0; subsetSum( d, x, m+1 );
        x[m+1] = 1; subsetSum( d, x, m+1 );
    }
}
```

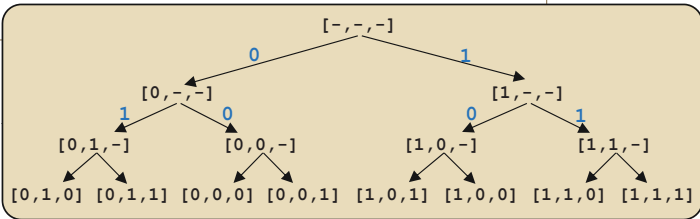


```
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
    if ( m == n ) {
        if ( sum(d, x) == k ) print( ... )
    } else {
        x[m+1] = 1; subsetSum( d, x, m+1 );
        x[m+1] = 0; subsetSum( d, x, m+1 );
    }
}
```



## ปริภูมิสถานะมีได้หลายแบบ

```
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
  if ( m == n ) {
    if ( sum(d, x) == k ) print( x )
  } else {
    x[m+1] = random( {0,1} ) // 0 or 1
    subsetSum( d, k, x, m+1 )
    x[m+1] = 1 - x[m+1]
    subsetSum( d, k, x, m+1 )
  }
}
```

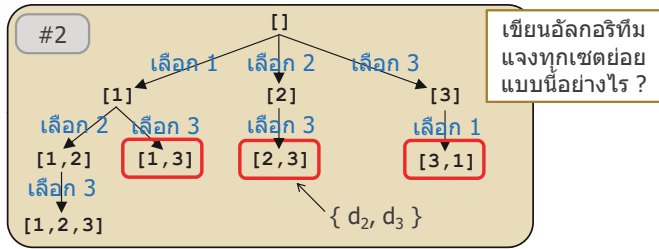
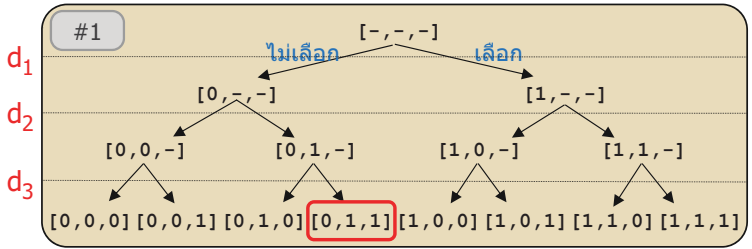


## ปริภูมิสถานะมีได้หลายแบบ

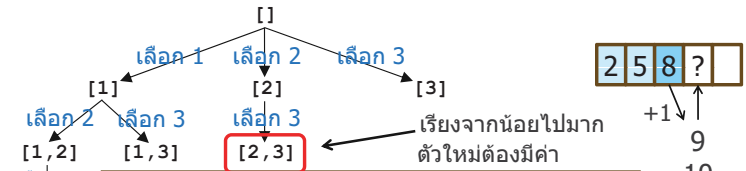
```
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
  if ( m == n ) {
    if ( sum(d, x) == k ) print( x )
  } else {
    x[m+1] = 0; subsetSum( d, k, x, m+1 )
    x[m+1] = 1; subsetSum( d, k, x, m+1 )
  }
}
m = 2
```

```
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
  if ( m == n ) {
    if ( sum(d, x) == k ) print( x )
  } else {
    x[n-m] = 0; subsetSum( d, k, x, m+1 )
    x[n-m] = 1; subsetSum( d, k, x, m+1 )
  }
}
m = 2
```

# ปริภูมิสถานะมีได้หลายแบบ



# การแจงทุกเซตย่อย (#2)



```
enumSubSet ( n ) {
    x = a new array[0..n]
    x[0] = 0;
    enumSubSet ( x, 0 )
}

enumSubSet ( x[1..n], m ) {
    print ( x, m )
    if ( x[m] == n ) return
    for ( i = x[m]+1; i <= n; i++ ) {
        x[m+1] = i; enumSubSet ( x, m+1 )
    }
}
```

## Sum of Subset : ลุยทุกเซตย่อย (#2)






```
subsetSum( d[1..n], k ) {
    x = a new array[0..n]
    x[0] = 0
    subsetSum( d, k, x, 0 )
}
subsetSum( d[1..n], k, x[0..n], m ) {
    if (sum(d, x, m) == k) print( x )
    for (i = x[m]+1; i <= n; i++) {
        x[m+1] = i;
        subsetSum( d, k, x, m+1 )
    }
}
```

$$\text{sum}(d, x, m) = \sum_{j=1}^m d[x[j]]$$

x = [1, 2, 5, ...]  
d[1] + d[2] + d[5]

## 0/1 Knapsack

- ❖ ของ  $n$  ชั้นมีหมายเลข : 1, 2, 3, ...,  $n$
- ❖ แต่ละชั้นหนัก :  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$
- ❖ แต่ละชั้นมีมูลค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ กุญเป็หนึ่งใบจุของได้นักไม่เกิน  $W$
- ❖ ปัญหา : จงเลือกของใส่ถุง เพื่อให้
  - ❖ ถุงไม่ขาด
  - ❖ ได้มูลค่ารวมมากที่สุด

- |          |   |                 |
|----------|---|-----------------|
| <b>1</b> |    | 2.5Kg.<br>\$400 |
| <b>2</b> |  | 1.4Kg.<br>\$50  |
| <b>3</b> |  | 2.8Kg.<br>\$350 |
| <b>4</b> |  | 0.7Kg.<br>\$150 |
|          |  | 4Kg.            |

เขียน state space ของ  
ปัญหานี้ (มีของ 4 ชั้น)

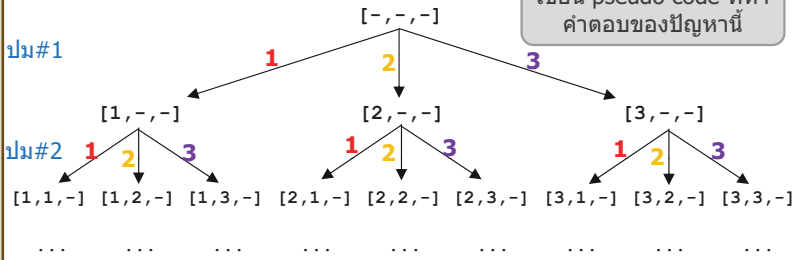
เขียน pseudo code ที่หา  
คำตอบของปัญหานี้

# K - Coloring

- ❖ **Input** : กราฟ  $G = (V, E)$ , จำนวนเต็ม  $k$
- ❖ **Output** : วิธีให้สีกับปมต่าง ๆ ใน  $G$  ที่
  - ❖ ใช้ไม่เกิน  $k$  สี
  - ❖ ปมปลายของเส้นเชื่อมเดียวกันห้ามมีสีเดียวกัน

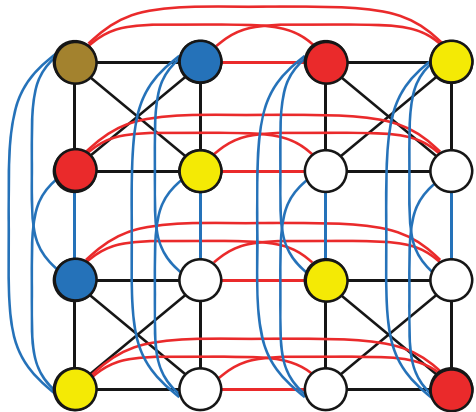
เขียน state space ของปัญหานี้ (กราฟมี 4 ปม,  $k=3$ )

เขียน pseudo code ที่หาคำตอบของปัญหานี้



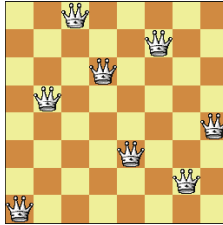
# Sudoku → K-Coloring

1	2	3	4
3	4		
2		4	
4			3



## n-Queen

- ❖ ปัญหา : วางควีน  $n$  ตัวบนตาราง  $n \times n$
- ❖ ไม่มีตัวใดเห็นตัวใดเลยในแนวดิ่ง แนวนอน และแนวทแยง



เขียน state space ของ  
4-queen

# Depth - First Search

# Breadth - First Search

## DFS กับ BFS

- ❖ คล้ายกับ DFS และ BFS ของการค้นปมในกราฟ
- ❖ แต่ในที่นี้ เราค้นในปริภูมิสถานะ
  - ❖ ไม่มีใครส่งกราฟมาให้ค้น
  - ❖ ปมสถานะถูกสร้างขึ้นระหว่างการค้น
  - ❖ เส้นเชื่อมระหว่างปม คือการผลิตปมใหม่จากปมเดิม
- ❖ ถ้าเขียนแบบเรียกซ้ำ
  - ❖ stack frame ที่เก็บพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการเรียกซ้ำ แทนสถานะของการค้น
- ❖ ถ้าเขียนแบบวงวนทำซ้ำ
  - ❖ ต้องสร้างที่เก็บข้อมูล ไว้แทนสถานะของการค้น

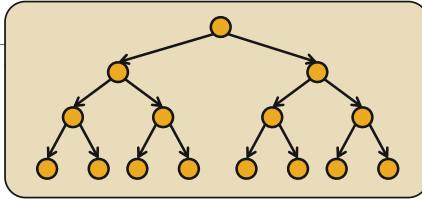
## Depth-First Search : Recursive

```

subsetSum( d[1..n], k ) {
  x = new array[1..n] with all 0's
  subsetSum( d, k, x, 0 )
}
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
  if ( m == n ) {
    if ( sum(d, x) == k ) print( x )
  } else {
    x[m+1] = 0; subsetSum( d, k, x, m+1 )
    x[m+1] = 1; subsetSum( d, k, x, m+1 )
  }
}

```

พารามิเตอร์คือ  
สถานะของการค้น



## Depth-First Search : Iterative

```

subsetSum( d[1..n], k )
  S ← an empty stack;
  S.push( a zero-length array )
  while ( S ≠ ∅ ) {
    x[1..m] ← S.pop()
    if ( m == n ) {
      if ( sum(d, x) == k ) {
        print(x); break
      }
    } else {
      x0 = copyOf(x, m+1); x0[m+1] = 0
      x1 = copyOf(x, m+1); x1[m+1] = 1
      S.push(x1);
      S.push(x0);
    }
  }
}

```

สร้างอาร์เรย์ขนาด m+1 มี  
ข้อมูลเหมือนกับของ x

แทนสถานะด้วย array ที่เก็บใน stack



## Breadth-First Search

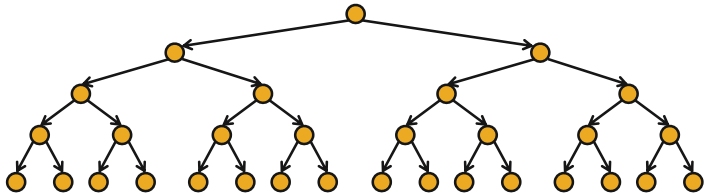
```

subsetSum( d[1..n], k )
  Q ← an empty queue;
  Q.enqueue( a zero-length array )
  while ( Q ≠ ∅ ) {
    x[1..m] ← Q.dequeue()
    if ( m == n ) {
      if ( sum(d, x) == k ) {
        print(x); break
      }
    } else {
      x0 = copyOf(x, m+1); x0[m+1] = 0
      x1 = copyOf(x, m+1); x1[m+1] = 1
      Q.enqueue(x0);
      Q.enqueue(x1);
    }
  }
}

```

แทนสถานะด้วย array ที่เก็บใน queue

## ปริมาณหน่วยความจำ DFS - BFS

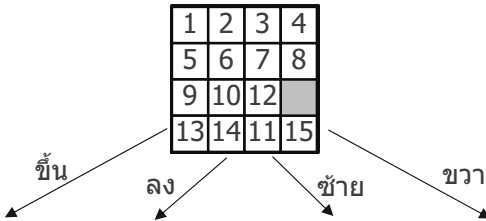


- ❖ 1 ปมแตก  $b$  กิ่ง ต้นไม้สูง  $h$
- ❖ **depth-first search**
  - ❖ ใช้ stack เนื้อที่  $O(bh)$
- ❖ **breadth-first search**
  - ❖ ใช้ queue เนื้อที่  $O(b^h)$

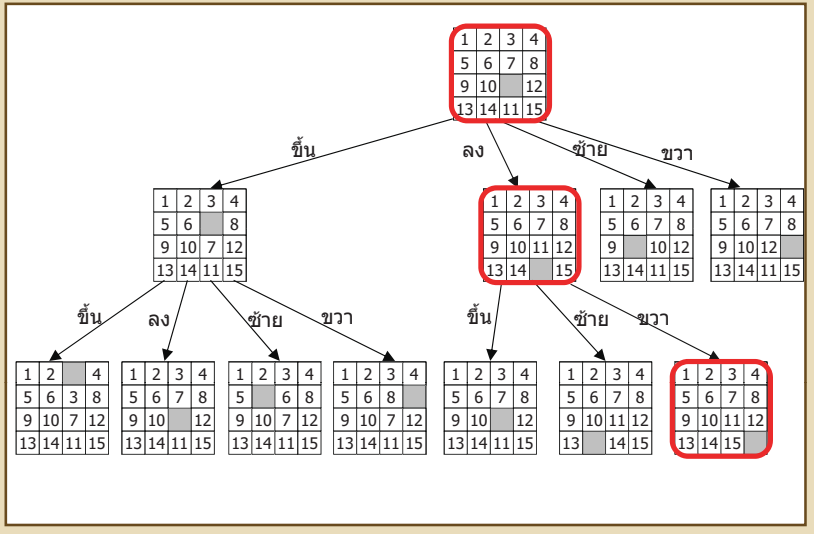
# 15-puzzle

1	2	3	4
5		7	8
9	6	10	12
13	14	11	15

# 15-puzzle



## ค้นหาตามแนวกว้าง

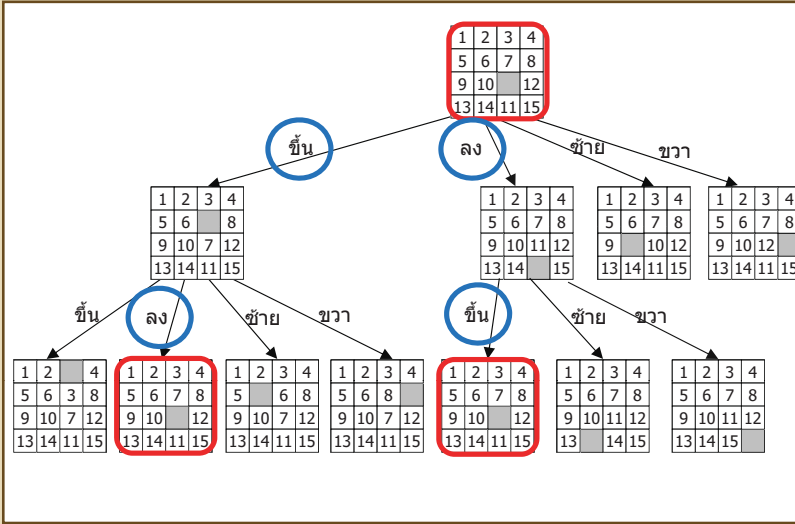


## 15-puzzle : Breadth-First Search

```

solve( board ) {
    Q = an empty queue
    Q.enqueue( board );
    while ( Q ≠ ∅ ) {
        b = Q.dequeue();
        if ( b.isAnswer() ) return b;
        for each d ∈ {UP, DOWN, LEFT, RIGHT} {
            if ( b.canMoveBlank( d ) ) {
                b1 = b.moveBlank( d );
                Q.enqueue( b1 );
            }
        }
    }
    print "no solution";
}
    
```

## ระวังการผลิตปมสถานะที่ซ้ำซ้อน



## ใช้ set เก็บปมสถานะต่าง ๆ ที่เคยผลิต

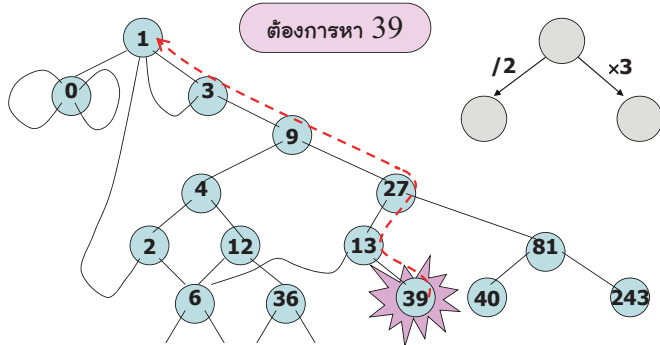
```

solve( board ) {
    set = an empty set
    Q = an empty queue
    Q.enqueue( board ); set.add( board )
    while ( Q ≠ ∅ ) {
        b = Q.dequeue();
        if ( b.isAnswer() ) return b;
        for each d ∈ {UP, DOWN, LEFT, RIGHT} {
            if ( b.canMoveBlank( d ) ) {
                b1 = b.moveBlank( d );
                if ( b1 ∉ set ) {
                    Q.enqueue( b1 ); set.add( b1 )
                }
            }
        }
    }
    print "no solution";
}
    
```

## ตัวอย่าง : คุณสามหารสอง

- ❖ ให้จำนวนเต็ม  $v$
- ❖ เริ่มด้วย 1 จะต้อง  $\times 3$  และหรือ  $/ 2$  (ปิดเศษทิ้ง) อย่างไม่ จึงมีค่าเท่ากับ  $v$
- ❖ เช่น
  - ❖  $v = 10 = 1 \times 3 \times 3 \times 3 \times 2 / 2 / 2$
  - ❖  $v = 31 = 1 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 / 2 / 2 / 2 / 2 \times 3 / 2$
- ❖ ขอลุยทุกรูปแบบตามแนวกว้าง

## คุณสามหารสอง : ค้นตามแนวกว้าง



$$39 = 1 \times 3 \times 3 \times 3 / 2 \times 3$$

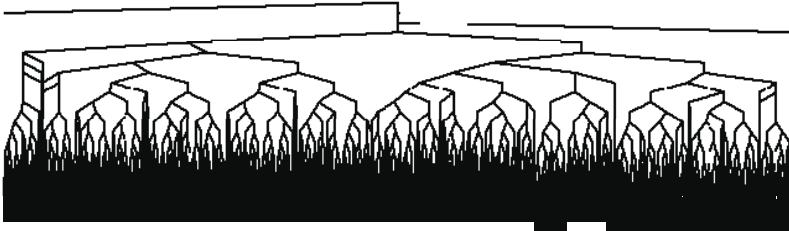
BFS : สิ้นสุด

## คุณสมบัติสอง : ค้นหาแนวกว้าง

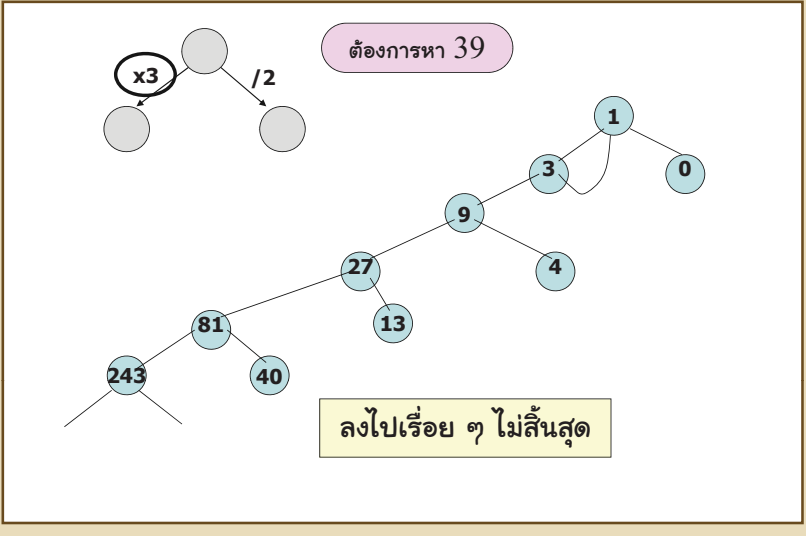
```

m3d2( target ) {
    set = an empty set
    Q = an empty queue
    state = new State(1);
    Q.enqueue( state ); set.add( state )
    while ( Q ≠ ∅ ) {
        state = Q.dequeue();
        if (state.value == target) return state;
        d2 = new State(state.value/2, state);
        if (d2 ∉ set) {Q.enqueue( d2 ); set.add( d2 );}
        m3 = new State(state.value*3, state);
        if (m3 ∉ set) {Q.enqueue( m3 ); set.add( m3 );}
    }
    return ∅
}
    
```

## BFS : 41 = ?



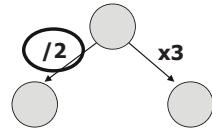
## ค้นหาตามแนวลึก อาจหาคำตอบไม่พบ



## คุณสมบัติสอง : ค้นหาตามแนวลึก

```

m3d2 ( target ) {
    set = an empty set
    S = an empty stack
    state = new State(1);
    S.push( state ); set.add( state )
    while ( S ≠ ∅ ) {
        node = S.pop();
        if (state.value == target ) return state;
        m3 = new State(state.value*3, state);
        if (m3 ∉ set) {S.push( m3 ); set.add( m3 )}
        d2 = new State(state.value/2, state);
        if (d2 ∉ set) {S.push( d2 ); set.add( d2 )}
    }
    return ∅
}
    
```

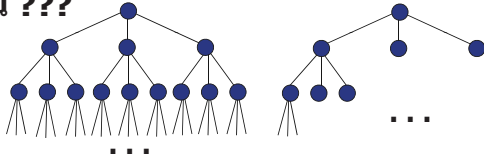






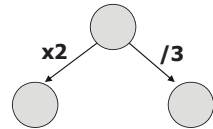
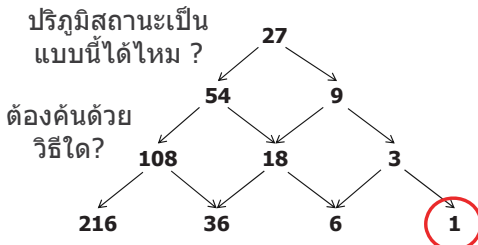
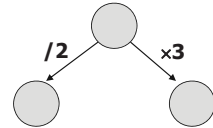
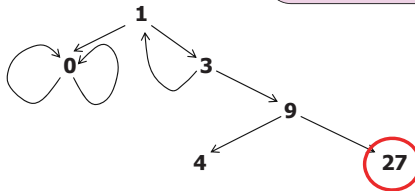
## DFS vs. BFS

- ❖ **depth-first search ใช้ stack**
  - ❖ ถ้าต้นไม้มีขนาดไม่จำกัด, อาจหาไม่พบคำตอบ
  - ❖ ต้นไม้สูง  $h$ , จะใช้เนื้อที่ใน stack แค่  $O(b \cdot h)$
- ❖ **breadth-first search ใช้ queue**
  - ❖ ประกันว่าพบ answer state ที่ใกล้รากสุด
  - ❖ ต้นไม้สูง  $h$ , จะใช้เนื้อที่ใน queue เป็น  $O(b^h)$
- ❖ **state space tree มีขนาดใหญ่, ซ้ำมาก ๆ**
- ❖ **มีข้อดีตรงไหน ???**



## คุณสมบัติสามประการ

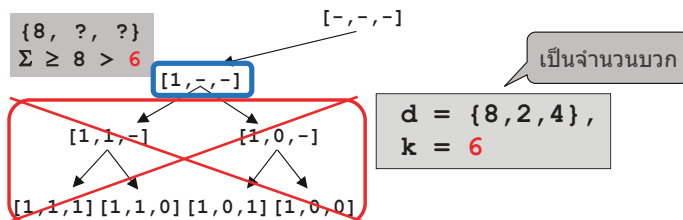
ต้องการหา 27



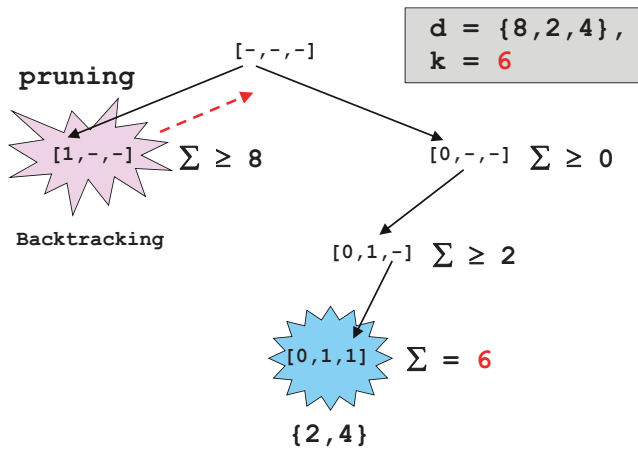
# Backtracking

## การย้อนรอย (backtracking)

- ❖ ค้นหาคำตอบในปริภูมิสถานะ → ซ้ำ
- ❖ พิจารณาสถานะที่แทนผลเฉลยบางส่วน (partial solution state) ถ้าไม่มีแนว ไม่ค้นต่อ
- ❖ ไม่มีแนว → มั่นใจว่าไม่พบสถานะคำตอบแน่ ๆ



## Sum of Subset : Backtracking



## DFS + Backtracking

```
subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
    sum = sum(d, x, m)
    if (sum > k) return
    if (m == n) {
        if ( sum == k ) print( x )
    } else {
        x[m+1] = 1; subsetSum( d, k, x, m+1 )
        x[m+1] = 0; subsetSum( d, k, x, m+1 )
    }
}
```

$$\text{sum}(d, x, m) = \sum_{j=1}^m x[j]d[j]$$

## DFS + Backtracking

```

subsetSum( d[1..n], k, x[1..n], m ) {
    sum = sum(d, x, m)
if (sum > k) return
    if (m == n) {
        if ( sum == k ) print( x )
    } else {
        if ( sum+d[m+1] <= k )
            x[m+1] = 1; subsetSum( d, k, x, m+1 )
        x[m+1] = 0; subsetSum( d, k, x, m+1 )
    }
}

```

$$\text{sum}(d, x, m) = \sum_{j=1}^m x[j]d[j]$$

## BFS + Backtracking

```

subsetSum( d[1..n], k )
    Q ← an empty queue;
    Q.enqueue( a zero-length array )
    while ( Q ≠ ∅ ) {
        x[1..m] ← Q.dequeue()
        sum = sum(d, x, m)
        if (sum <= k) {
            if ( m == n ) {
                if ( sum == k ) print(x)
            } else {
                x0 = copyOf(x, m+1); x0[m+1] = 0
                x1 = copyOf(x, m+1); x1[m+1] = 1
                Q.enqueue(x0);
                Q.enqueue(x1);
            }
        }
    }
}

```

## Sum of Subset : Backtracking

n	จำนวนคำตอบ	DFS (จำนวนปมที่ค้น)		DFS + Backtracking (จำนวนปมที่ค้น)	
		คำตอบแรก	คำตอบทั้งหมด	คำตอบแรก	คำตอบทั้งหมด
10	6	1,402	2,047	133	384
11	20	621	4,095	97	1,934
12	37	708	8,191	78	3,660
13	36	1,922	16,383	144	4,100
14	81	3,967	32,767	26	8,198
15	204	1,797	65,535	60	27,351
16	128	4,085	131,071	41	20,015
17	616	7,684	262,143	76	70,795
18	1,052	16,354	524,287	74	121,853
19	2,515	6,649	1,048,575	120	360,480
20	7,133	6,152	2,097,151	21	949,847
21	6,837	30,472	4,194,303	97	789,842
22	8,979	442,309	8,388,607	139	915,099
23	50,129	14,090	16,777,215	73	7,145,916
24	92,457	24,456	33,554,431	25	12,847,798
25	54,493	1,015,288	67,108,863	234	6,159,965

## ลองคิดดู : Sum of Subset

1. ต้องปรับอย่างไร ถ้าเซตเก็บจำนวนลบได้

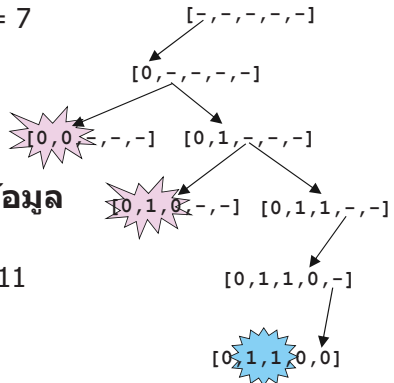
❖  $d = \{-3, 4, -2, 5, 1\}, k = 7$

2. ของเดิม : เราไม่ลงต่อ

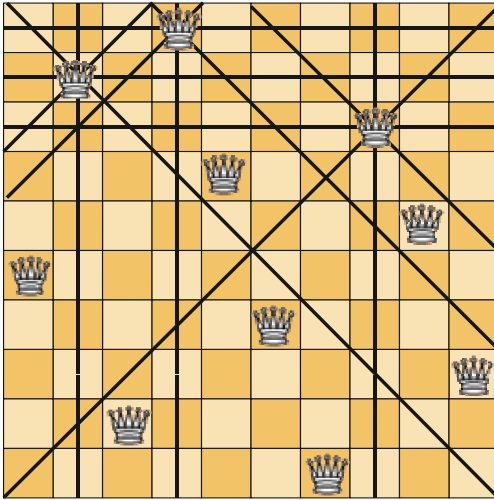
ถ้า  $\sum_{j=1}^m x[j]d[j] > k$

ของใหม่ : เรียงลำดับข้อมูล  
จะปรับอย่างไรให้ดีขึ้น

❖  $d = \{8, 6, 5, 2, 1\}, k = 11$



# n-Queen Problem



## ใช้อาเรย์ 1 มิติแทนการวางควีน

แถวที่ 1 วางคอลัมน์ที่ 2

	col	1	2	3	4	...
1	2		Q			
2	4				Q	
3	9					
4	3			Q		
5	1	Q				
:						

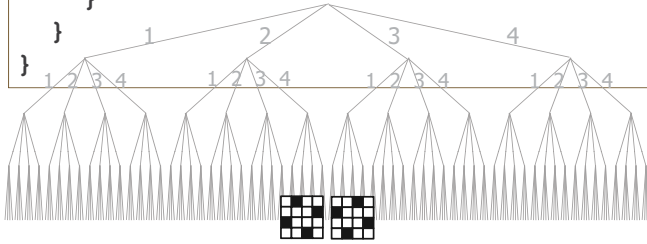
$col[r]$  แทนหมายเลขคอลัมน์ที่วางควีนของแถวที่  $r$

[2, 4, 9, 3, 1, ... ]

## n-Queen : DFS

```

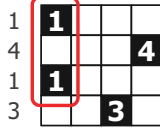
queen(col[1..n], m) {
    if (m == n) {
        if (isValid(col)) print(col)
    } else {
        for (i = 1; i <= n; i++) {
            col[m+1] = i; queen(col, m+1);
        }
    }
}
    
```



- [1, 1, 1, 1]
- [1, 1, 1, 2]
- [1, 1, 1, 3]
- [1, 1, 1, 4]
- [1, 1, 2, 1]
- [1, 1, 2, 2]
- [1, 1, 2, 3]
- [1, 1, 2, 4]
- ...
- [4, 4, 3, 1]
- [4, 4, 3, 2]
- [4, 4, 3, 3]
- [4, 4, 3, 4]
- [4, 4, 4, 1]
- [4, 4, 4, 2]
- [4, 4, 4, 3]
- [4, 4, 4, 4]

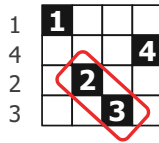
## การวางควีนที่ผิดกฎ

[1,4,1,3]



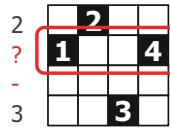
คอลัมน์เดียวกัน

[1,4,2,3]



แนวทแยงเดียวกัน

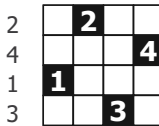
[2,?,-,3]



ไม่เกิด


มีตัวเลขซ้ำกัน  
หรือไม่ ?

[2,4,1,3]



- [1, 1, 1, 1]
- [1, 1, 1, 2]
- [1, 1, 1, 3]
- ...
- [4, 4, 4, 1]
- [4, 4, 4, 2]
- [4, 4, 4, 3]
- [4, 4, 4, 4]

## การตรวจสอบแนวทแยง

	col	1	2	3	4	...	
1	2		Q				$ 1-2  \neq  2-4 $
2	4				Q		$ 1-3  \neq  2-9 $
3	9						$ 1-4  \neq  2-3 $
4	3			Q			$ 1-5  \neq  2-1 $
5	1	Q					...
:	col[r]						$ 2-3  \neq  4-9 $
	แทนหมายเลขคอลัมน์						$ 2-4  \neq  4-3 $
	ที่วางควีนของแถวที่ r						$ 2-5  =  4-1 $ 
							...

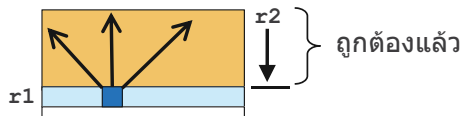
ควีนของแถว  $r_1$  กับ  $r_2$  จะไม่เห็นกันแนวทแยง ถ้า

$$|r_1 - r_2| \neq |col[r_1] - col[r_2]|$$

## การตรวจสอบ n-Queen ที่ถูกต้อง

```

isValid(col[1..n]) {
  for (r1 = 2; r1 <= n; r1++) {
    for (r2 = 1; r2 < r1; r2++) {
      if ( col[r1] == col[r2] ||
          |col[r1] - col[r2]| == r1 - r2 )
        return false
    }
    return true;
  }
}
    
```



ควีนของแถว  $r_1$  กับ  $r_2$  จะไม่เห็นกันแนวทแยง ถ้า

$$|r_1 - r_2| \neq |col[r_1] - col[r_2]|$$



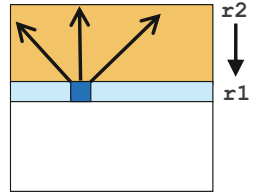
## n-Queen : DFS + Backtracking

```

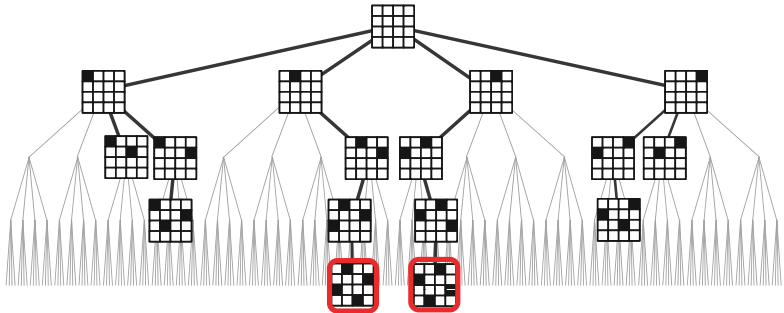
queen(col[1..n], m) {
    if (m == n) {
        if (isValid(col)) print(col)
    } else {
        for (i = 1; i <= n; i++) {
            col[m+1] = i
            if (isValid(col, m+1))
                queen(col, m+1)
        }
    }
}
    
```

```

isValid(col[1..n], k) {
    r1 = k
    for (r2 = 1; r2 < r1; r2++) {
        if ( col[r1] == col[r2] ||
            |col[r1] - col[r2]| == r1 - r2 )
            return false
    }
    return true;
}
    
```



## n-Queen : DFS + Backtracking








## n-Queen

n	จำนวนคำตอบ	จำนวนการเรียกซ้ำจนพบคำตอบแรก
4	2	9
5	10	6
6	4	32
7	40	10
8	92	114
9	352	42
10	724	103
11	2,680	53
12	14,200	262
13	73,712	112
14	365,596	1,900
15	2,279,184	1,360
16	14,772,512	10,053
17	95,815,104	5,375

## 0/1 Knapsack






- ❖ ของ  $n$  ชั้นมีหมายเลข :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละชั้นหนัก :  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$
- ❖ แต่ละชั้นมีมูลค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ กุญเป็หนึ่งใบจุของได้นักไม่เกิน  $W$
- ❖ ปัญหา : จงเลือกของใส่ถุง เพื่อให้
  - ❖ คุงไม่ขาด
  - ❖ ได้มูลค้ำรวมมากที่สุด

- 1  2.5Kg. \$400
  - 2  1.4Kg. \$50
  - 3  2.8Kg. \$350
  - 4  0.7Kg. \$150
-  4Kg.

# 0/1 Knapsack

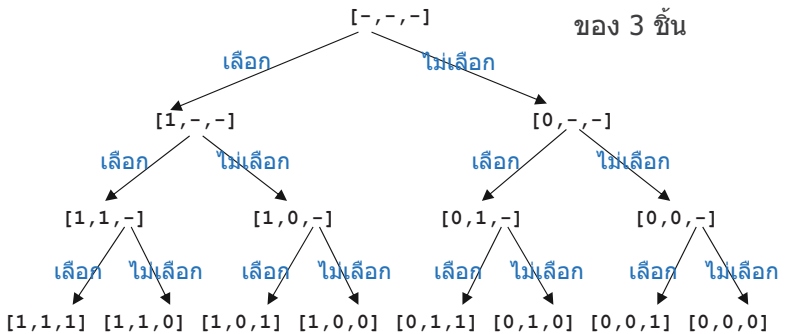
- ❖ ของ  $n$  ชิ้นมีหมายเลข :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละชิ้นหนัก :  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$
- ❖ แต่ละชิ้นมีมูลค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ กุญแจหนึ่งใบจุของได้หนักไม่เกิน  $W$
- ❖ หา  $\langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle$ ,  $x_k = 0$  หรือ  $1$

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{k=1}^n x_k v_k \\ & \text{subject to} \quad \sum_{k=1}^n x_k w_k \leq W \\ & \quad \quad \quad x_k \in \{0,1\} \end{aligned}$$

- |          |   |                 |
|----------|---|-----------------|
| <b>1</b> |  | 2.5Kg.<br>\$400 |
| <b>2</b> |  | 1.4Kg.<br>\$50  |
| <b>3</b> |  | 2.8Kg.<br>\$350 |
| <b>4</b> |  | 0.7Kg.<br>\$150 |
|          |  | 4Kg.            |

$\langle x_1, x_2, x_3, x_4 \rangle$   
 $\langle 1, 0, 0, 1 \rangle$

# 0/1 Knapsack : State Space



## 0/1 Knapsack : ลุยทุกเซตย่อย

```

knapsack( w[1..n], v[1..n], W ) {
  x = new array[1..n] with all 0's
  v_max = -∞; x_max = x
  knapsack( w, v, W, x, 0 )
  return x_max
}
knapsack(w[1..n], v[1..n], W, x[1..n], m ) {

  if (m == n) {
    if (sum(w,x) <= W AND sum(v,x) > v_max) {
      v_max = sum(v, x); x_max = x
    }
  } else {
    x[m+1] = 1; knapsack( w, v, W, x, m+1 )
    x[m+1] = 0; knapsack( w, v, W, x, m+1 )
  }
}

```

$$\text{sum}(w,x) = \sum_{j=1}^n w[j]x[j]$$

$$\text{sum}(v,x) = \sum_{j=1}^n v[j]x[j]$$

## 0/1 Knapsack : Backtracking

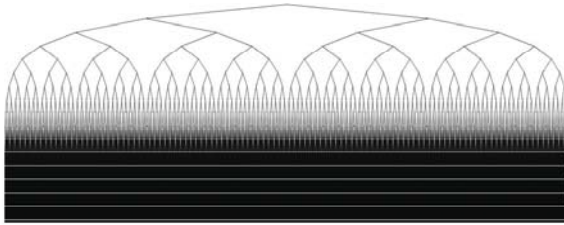
```

knapsack( w[1..n], v[1..n], W ) {
  x = new array[1..n] with all 0's
  v_max = -∞; x_max = x
  knapsack( w, v, W, x, 0 )
  return x_max
}
knapsack(w[1..n], v[1..n], W, x[1..n], m ) {
  if (sum(w, x, m) > W) return <.....เพิ่มเงินไขอะไร
  if (m == n) {                                     <.....ได้อีกบ้าง?
    if (sum(w,x) <= W AND sum(v,x) > v_max) {
      v_max = sum(v, x); x_max = x
    }
  } else {
    x[m+1] = 1; knapsack( w, v, W, x, m+1 )
    x[m+1] = 0; knapsack( w, v, W, x, m+1 )
  }
}

```

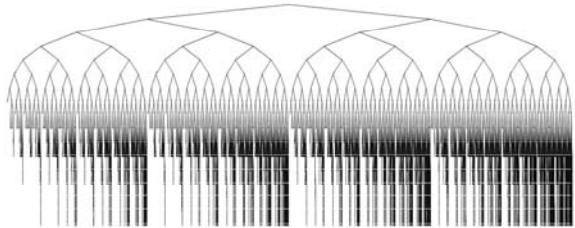
$$\text{sum}(w,x,m) = \sum_{j=1}^m w[j]x[j]$$

## 0/1 Knapsack : Backtracking



เริ่มต้น

เพิ่มการ  
ย้อนรอย



## ทอนเงิน

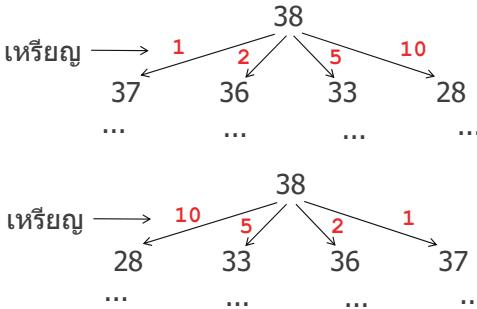
- ❖ มีเหรียญอยู่  $n$  แบบ :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละแบบมีค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ต้องการทอนเงินให้ลูกค้ามูลค่า  $V$
- ❖ โดยใช้เหรียญเป็นจำนวนน้อยสุด
  - ❖ (มีเหรียญแต่ละแบบจำนวนไม่จำกัด)



- ❖ ตัวอย่าง : สกุลเงินไทย
  - ❖ มีเหรียญ : 1, 2, 5, 10 บาท (ขอไม่ใช้เหรียญสลึง)
  - ❖ ต้องการทอนเงินมูลค่า 38 บาท
  - ❖ คำตอบ : 10 บาท 3 เหรียญ,  
5 บาท 1 เหรียญ,  
2 บาท 1 เหรียญ,  
1 บาท 1 เหรียญ

## ลองคิดดู

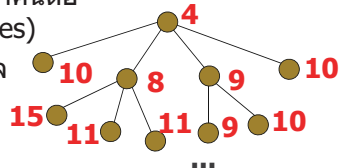
- ❖ เขียนปริภูมิสถานะของการทอนเงิน
- ❖ ควรค้นแบบใด ? (DFS, BFS), ย้อนรอยเมื่อไร ?
- ❖ ลองแบบมีเหรียญ 1, 2, 5, 10 กับ 1, 4, 6, 10



# Least-Cost Search

## Least-Cost Search

- ❖ ลำดับการเลือก state เพื่อผลิต state ใหม่ของ DFS และ BFS เป็นไปอย่างมีระเบียบ
- ❖ แต่ไร้เหตุผล !!!
- ❖ blind/uninformed search
- ❖ Least-cost search
  - ❖ แต่ละ state มีต้นทุน (cost function) ในการค้นเพื่อให้ได้คำตอบ
  - ❖ เลือก state ที่มีต้นทุนต่ำสุดมาค้นต่อ (ใช้ priority queue เก็บ states)
  - ❖ ใช้ต้นทุนต่ำสุดเป็นตัวตัดสินใจ (คล้าย greedy แต่ไปแล้วไม่ดี กลับใจได้)

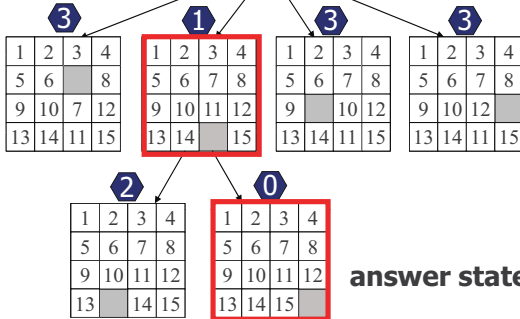


# 15-Puzzle : Least-Cost Search

จำนวนหมายเลขที่  
อยู่ผิดตำแหน่ง

2

ลองคิด cost function  
ที่น่าจะดีกว่านี้



answer state

# 15-puzzle : LC-Search

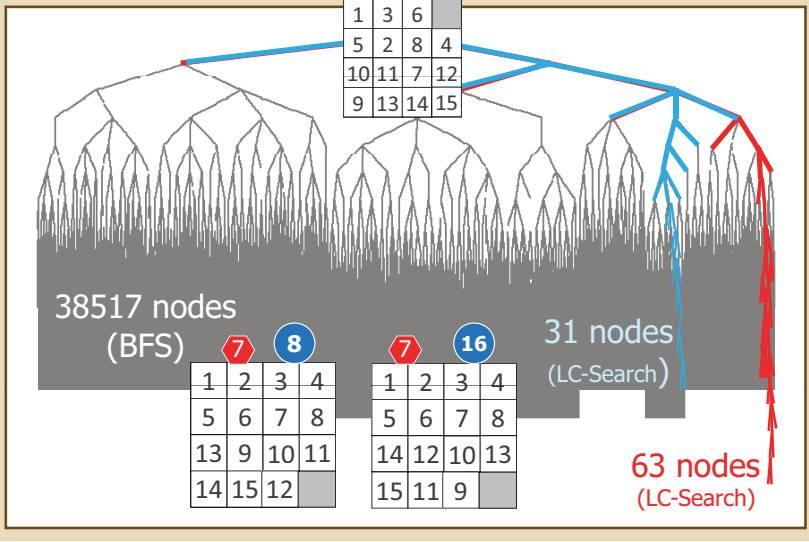
```

solve( board ) {
    set = an empty set
    PQ = an empty priority queue
    PQ.add( board ); set.add( board )
    while ( PQ ≠ ∅ ) {
        b = PQ.removeMin()
        if ( b.isAnswer() ) return b;
        for each d ∈ {UP, DOWN, LEFT, RIGHT} {
            if ( b.canMoveBlank( d ) ) {
                b1 = b.moveBlank( d );
                if ( b1 ∉ set ) {
                    PQ.add( b1 ); set.add( b1 )
                }
            }
        }
    }
    print "no solution";
}
    
```

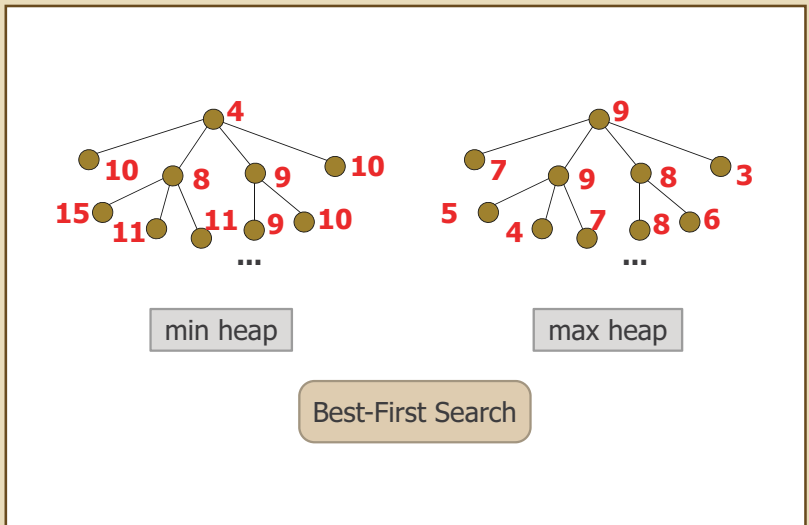
priority queue จัดลำดับ  
ตารางตาม cost function



## Breadth-First vs. Least-Cost



## Least-Cost & Max-Profit



## ทอนเงิน

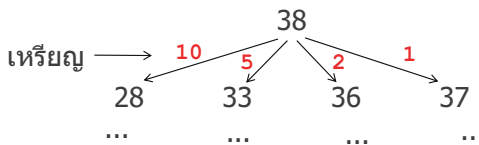
- ❖ มีเหรียญอยู่  $n$  แบบ :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละแบบมีค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ต้องการทอนเงินให้ลูกค้ามูลค่า  $V$
- ❖ โดยใช้เหรียญเป็นจำนวนน้อยสุด
  - ❖ (มีเหรียญแต่ละแบบจำนวนไม่จำกัด)



- ❖ ตัวอย่าง : สกุลเงินไทย
  - ❖ มีเหรียญ : 1, 2, 5, 10 บาท (ขอไม่ใช้เหรียญสลึง)
  - ❖ ต้องการทอนเงินมูลค่า 38 บาท
  - ❖ คำตอบ : 10 บาท 3 เหรียญ,  
5 บาท 1 เหรียญ,  
2 บาท 1 เหรียญ,  
1 บาท 1 เหรียญ

## ลองคิดดู : การทอนเงิน

- ❖ จากปริภูมิสถานะของการทอนเงิน 38 ด้วยเหรียญ 1, 2, 5, 10 ข้างล่างนี้



- ❖ จงออกแบบ cost ที่นำไปใช้กับ LC-search
- ❖ แล้วลองใช้ค้นหาการทอนเงิน 41 ด้วยเหรียญ 1, 5, 10, 12, 25 ดู

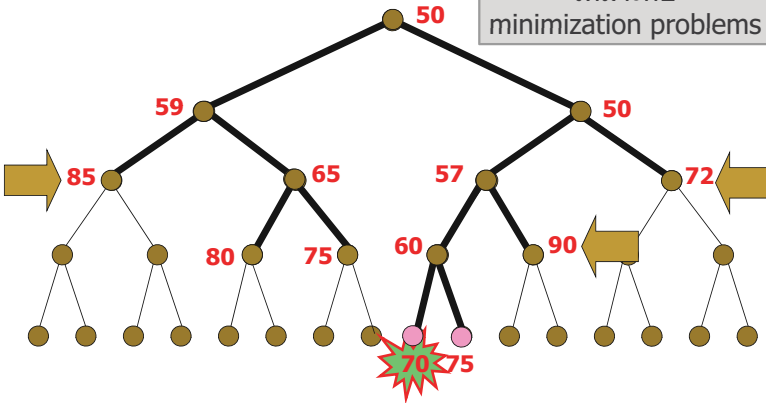
# Branch-and-Bound

## Branch & Bound

- ❖ เหมาะกับ **optimization problems**
- ❖ **Maximization :**
  - ❖ แต่ละปมมี upper bound ของค่าที่ต้องการ maximize
  - ❖ Knapsack : [1, 0, 1, -, -, -, -] ให้มูลค่ารวมได้ไม่เกิน 235
- ❖ **Minimization :**
  - ❖ แต่ละปมมี lower bound ของค่าที่ต้องการ minimize
  - ❖ TSP : [1, 4, 3, -, -, -] ให้ระยะทางรวมอย่างน้อย 213
- ❖ มักใช้ **bound** ข้างต้นเป็นตัวนำทางในการค้นด้วย

# Least-Cost Search + Bound

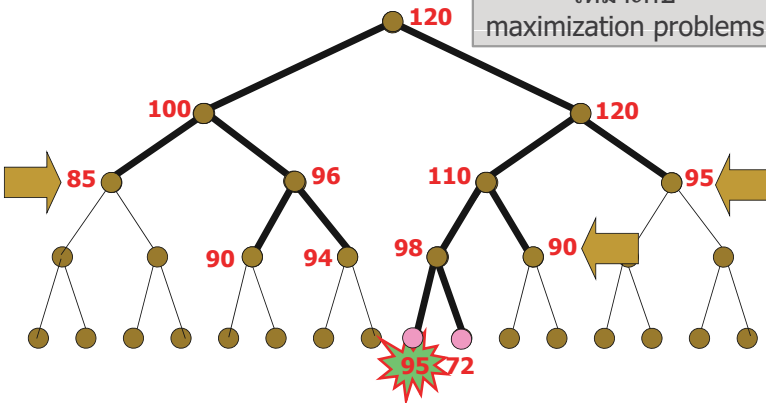
เหมาะกับ minimization problems



lower bound ที่น้อยสุดตอนนี้มีค่าไม่น้อยกว่าคำตอบดีที่สุดที่รู้มาก็แสดงว่า พบคำตอบที่น้อยสุดแล้ว

# Max-Profit Search + Bound

เหมาะกับ maximization problems



upper bound ที่มากที่สุดตอนนี้มีค่าไม่มากกว่าคำตอบดีที่สุดที่รู้มาก็แสดงว่า พบคำตอบที่มากที่สุดแล้ว

## 0/1 Knapsack

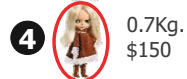
- ❖ ของ  $n$  ชิ้นมีหมายเลข :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละชิ้นหนัก :  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$
- ❖ แต่ละชิ้นมีมูลค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ กุญแจหนึ่งใบจุของได้หนักไม่เกิน  $W$
- ❖ หา  $\langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle$ ,  $x_k = 0$  หรือ  $1$

$$\text{maximize } \sum_{k=1}^n x_k v_k$$

$$\text{subject to } \sum_{k=1}^n x_k w_k \leq W$$

maximization  
problems

$$x_k \in \{0, 1\}$$



$$\langle x_1, x_2, x_3, x_4 \rangle \\ \langle 1, 0, 0, 1 \rangle$$

## Fractional Knapsack

- ❖ ถ้าอนุญาตให้ "เฉือน" ของบางส่วนใส่ถุงได้
  - ❖  $0 \leq x_k \leq 1$ , ได้มูลค่าเป็นสัดส่วนตามปริมาณที่เฉือน
- ❖ สามารถหาคำตอบได้รวดเร็ว (Greedy algo.)
  - ❖ ไล่หยิบเริ่มจากของที่มีมูลค่าต่อน้ำหนักมากที่สุด ใส่ถุงไปเรื่อย ๆ จนถึงขั้นที่ถ้าใส่ ถุงจะขาด ก็เฉือนของใส่ถุงให้พอดีที่ถุงรับน้ำหนักได้
- ❖ ถ้าของ 1, 2, ...,  $n$  เรียงแล้ว  $\frac{v_1}{w_1} \geq \frac{v_2}{w_2} \geq \dots \geq \frac{v_n}{w_n}$
- ❖ ใช้เวลา  $O(n)$

$$x_1=1.0 \quad x_2=1.0 \quad x_3=1.0 \quad x_4=0.8$$

$$v_1=66, \quad v_2=20, \quad v_3=30, \quad v_4=60, \quad v_5=40 \quad \Sigma v = 164$$

$$w_1=30, \quad w_2=10, \quad w_3=20, \quad w_4=50, \quad w_5=40 \quad W = 100$$

$$v/w : 2.2 \quad 2.0 \quad 1.5 \quad 1.2 \quad 1.0$$

## Upper Bound ของ 0/1 Knapsack

$$v_1=66, v_2=20, v_3=30, v_4=60, v_5=40 \quad W = 100$$

$$w_1=30, w_2=10, w_3=20, w_4=50, w_5=40$$

มูลค่ารวมของ  
คำตอบของ  
0/1 Knapsack



มูลค่ารวมของ  
คำตอบของ  
Fractional Knapsack

$$\langle 1, 1, 1, 0, 1 \rangle$$

$$\Sigma v = 156$$

$$\langle 1, 1, 1, 0.8, 0 \rangle$$

$$\Sigma v = 164$$

## Upper Bound ของมูลค่ารวม

- ❖ มีของอยู่  $n$  ชิ้น
- ❖ เรียงชิ้นที่  $1, 2, \dots, n$  ตาม  $v/w$  จากมากไปน้อย

- ❖ คำตอบ  $x_1, x_2, \dots, x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n$
- |   |   |
|---|---|
| $1, 0, \dots, 1,$<br>ตัดสินใจแล้วว่า<br>จะเลือกหรือไม่เลือก<br>$\Sigma x_i v_i$ | $?, ?, \dots, ?$<br>ยังไม่ตัดสินใจ<br>$???$ |
|---|---|

- ❖ สามารถคำนวณ  $\max \Sigma v$  ในส่วนที่ยังไม่ตัดสินใจ ด้วยการหาคำตอบของ **fractional knapsack** ตั้งแต่ชิ้นที่  $m+2$  ถึง  $n$  เมื่อคงจุได้  $W - \Sigma x_i w_i$

## ตัวอย่าง

$$W = 100$$

<del><math>v_1=66</math></del>	$v_2=20$	$v_3=30$	$v_4=60$	$v_5=40$
<del><math>w_1=30</math></del>	$w_2=10$	$w_3=20$	$w_4=50$	$w_5=40$

$$v/w : 2.2 \quad 2.0 \quad 1.5 \quad 1.2 \quad 1.0$$

$$\Sigma v = 0 + 20 + 30 + 60 + 20 = 130$$

$$W = 100 - 30 = 70$$

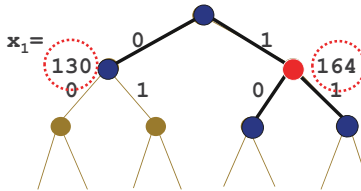
$v_1=66$	$v_2=20$	$v_3=30$	$v_4=60$	$v_5=40$
$w_1=30$	$w_2=10$	$w_3=20$	$w_4=50$	$w_5=40$

$$v/w : 2.2 \quad 2.0 \quad 1.5 \quad 1.2 \quad 1.0$$

$$\Sigma v = 66 + 20 + 30 + 48 + 0 = 164$$

## 0/1 Knapsack

❖ Max-Profit search เลือกแตกปมที่กำไรสูงสุด



$x_1=0, W=100-0$   
 $\max (\Sigma v \text{ ที่เหลือ})$  เมื่อ  
 $x_2=1, x_3=1, x_4=1, x_5=0.5$   
 ได้  $\max \Sigma v = 0 + 130$

$x_1=1, W=100-30=70$   
 $\max (\Sigma v \text{ ที่เหลือ})$  เมื่อ  
 $x_2=1, x_3=1, x_4=0.8, x_5=0$   
 ได้  $\max \Sigma v = 66 + 98 = 164$

$$W = 100$$

<del><math>v_1=66</math></del>	$v_2=20$	$v_3=30$	$v_4=60$	$v_5=40$
<del><math>w_1=30</math></del>	$w_2=10$	$w_3=20$	$w_4=50$	$w_5=40$

$$v/w : 2.2 \quad 2.0 \quad 1.5 \quad 1.2 \quad 1.0$$

## 0/1 Knapsack : Branch & Bound

```

Knapsack( w[1..n], v[1..n], W ) { // sorted by v/w
  H = an empty max heap;  $V_{MAX} = -\infty$ 
  H.add([], FKS(w,v,W,1,n))
  while( H  $\neq \emptyset$  ) {
    (x[1..m],  $V_{UB}$ ) = H.removeMax()
    if ( $V_{UB} \leq V_{MAX}$ ) break;
    if (m == n) {
      if ( $V_{UB} > V_{MAX}$ ) {  $V_{MAX} = V_{UB}$ ;  $x_{MAX} = x$  }
    } else {
       $\Sigma v = \text{sum}(v, x, m)$ ;  $\Sigma w = \text{sum}(w, x, m)$ 
       $x_0 = \text{copyOf}(x, m+1)$ ;  $x_0[m+1] = 0$ 
      H.add(x0,  $0 + \Sigma v + \text{FKS}(w, v, W - \Sigma w, m+2, n)$ )
      if ( $W - \Sigma w - w[m+1] \geq 0$ ) {
         $x_1 = \text{copyOf}(x, m+1)$ ;  $x_1[m+1] = 1$ 
        H.add(x1,  $v[m+1] + \Sigma v + \text{FKS}(w, v, W - \Sigma w - w[m+1], m+2, n)$ )
      }
    }
  }
  return  $x_{MAX}$ 
}
    
```

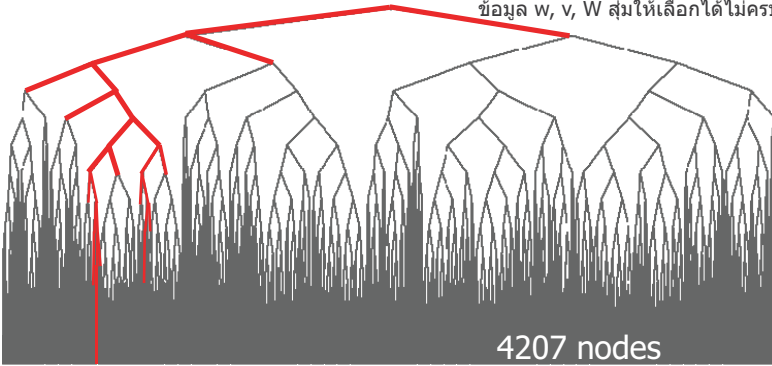
BOUND

BRANCH

## BT & BB

Knapsack :  $n = 13$ ,

ข้อมูล  $w, v, W$  สุ่มให้เลือกได้ไม่ครบ



34 nodes  
(Branch & Bound)

4207 nodes  
(Backtracking)



n	BFS	Backtrack	B&B	n	B&B
1	3	3	3	50	86
2	7	5	5	100	188
3	15	6	6	150	232
4	31	12	10	200	308
5	63	33	11	250	423
6	127	70	12	300	555
7	255	120	12	350	564
8	511	148	15	400	609
9	1,023	302	18	450	775
10	2,047	944	18	500	781
11	4,095	1,829	23	550	998
12	8,191	4,996	20	600	991
13	16,383	4,207	34	650	1,088
14	32,767	11,562	39	700	1,159
15	65,535	17,587	22	750	1,312
16	131,071	55,583	28	800	1,351
17	262,143	119,443	47	850	1,488
18	524,287	68,944	34	900	1,334
19	1,048,575	694,689	39	950	1,576
20	2,097,151	288,154	29	1,000	1,699

จำนวน  
ปมที่ค้น

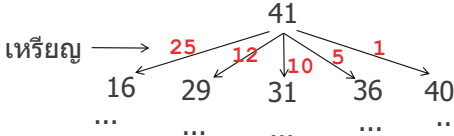
## ทอนเงิน

- ❖ มีเหรียญอยู่  $n$  แบบ :  $1, 2, 3, \dots, n$
- ❖ แต่ละแบบมีค่า :  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$
- ❖ ต้องการทอนเงินให้ลูกค้ามูลค่า  $V$
- ❖ โดยใช้เหรียญเป็นจำนวนน้อยสุด
  - ❖ มีเหรียญแต่ละแบบจำนวนไม่จำกัด
- ❖ ตัวอย่าง
  - ❖ มีเหรียญ : 1, 5, 10, 12, 25 บาท
  - ❖ ต้องการทอนเงินมูลค่า 41 บาท
  - ❖ คำตอบ : 12 บาท 3 เหรียญ,  
5 บาท 1 เหรียญ



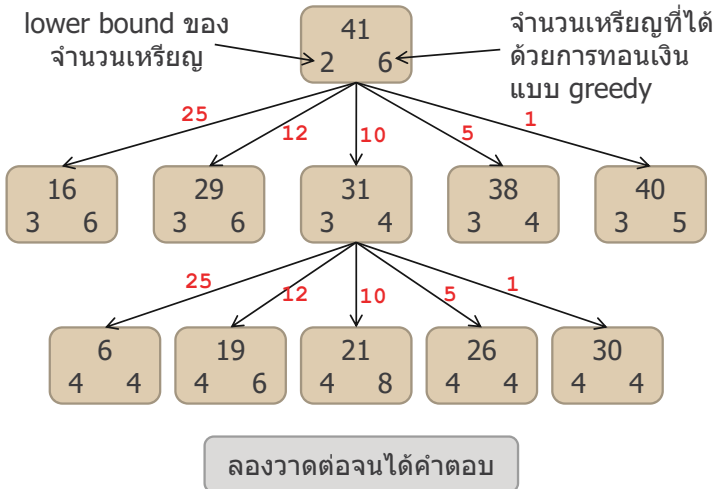
## การทอนเงิน : branch & bound

- ❖ จากปริภูมิสถานะของการทอนเงิน 41 ด้วยเหรียญ 1, 5, 10, 12, 25 ข้างล่างนี้



- ❖ ใช้ผลการทอนเหรียญแบบ greedy เป็น cost (ทอนด้วยเหรียญที่มีค่ามากที่สุดก่อน) ชวนำทาง
- ❖ lower bound ของจำนวนเหรียญที่ปม x คือ
  - ❖ จำนวนเหรียญที่ทอนมาจนถึงปม x บวกกับ
  - ❖  $\left\lceil \frac{\text{เงินที่ยังไม่ทอนที่ปม x}}{\text{มูลค่าเหรียญมากที่สุดที่น้อยกว่าเงินที่ยังไม่ทอน}} \right\rceil$

## การทอนเงิน : branch & bound



# การแจกผลเฉลยแบบ เรียงสับเปลี่ยน

## การแจกผลเฉลย : permutation

### ❖ หลายปัญหามีผลเฉลยเป็นแบบการเรียงสับเปลี่ยน

- ❖ n-Queen
- ❖ assignment problem
- ❖ travelling salesman problem
- ❖ bandwidth minimization problem
- ❖ ...

[1,2,3,4]	[2,1,3,4]	[3,2,1,4]	[4,2,3,1]
[1,2,4,3]	[2,1,4,3]	[3,2,4,1]	[4,2,1,3]
[1,3,2,4]	[2,3,1,4]	[3,1,2,4]	[4,3,2,1]
[1,3,4,2]	[2,3,4,1]	[3,1,4,2]	[4,3,1,2]
[1,4,3,2]	[2,4,3,1]	[3,4,1,2]	[4,1,3,2]
[1,4,2,3]	[2,4,1,3]	[3,4,2,1]	[4,1,2,3]

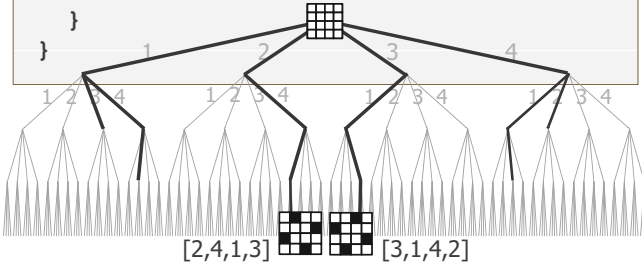
$n$	$n!$
1	1
2	2
3	6
4	24
5	120
6	720
7	5,040
8	40,320
9	362,880
10	3,628,800
11	39,916,800
12	479,001,600

## n-Queen : Backtracking

```

queen(col[1..n], m) {
  if (m == n) print(col)
  else {
    for (i = 1; i <= n; i++) {
      col[m+1] = i;
      if (isValid(col, m+1))
        queen(col, m + 1);
    }
  }
}
    
```

- [1,1,1,1]
- [1,1,1,2]
- [1,1,1,3]
- [1,1,1,4]
- [1,1,2,1]
- [1,1,2,2]
- [1,1,2,3]
- [1,1,2,4]
- ...
- [4,4,3,1]
- [4,4,3,2]
- [4,4,3,3]
- [4,4,3,4]
- [4,4,4,1]
- [4,4,4,2]
- [4,4,4,3]
- [4,4,4,4]



## ปรับปรุงให้ปริภูมิเล็กลง

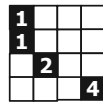
ไม่มีกรณีวางควีนใน  
คอลัมน์เดียวกัน

- [1,2,3,4]
- [1,2,4,3]
- [1,3,2,4]
- [1,3,4,2]
- [1,4,3,2]
- [1,4,2,3]
- [2,1,3,4]
- [2,1,4,3]

4! = 24  
กรณี

- ...
- [3,4,1,2]
- [3,4,2,1]
- [4,2,3,1]
- [4,2,1,3]
- [4,3,2,1]
- [4,3,1,2]
- [4,1,3,2]
- [4,1,2,3]

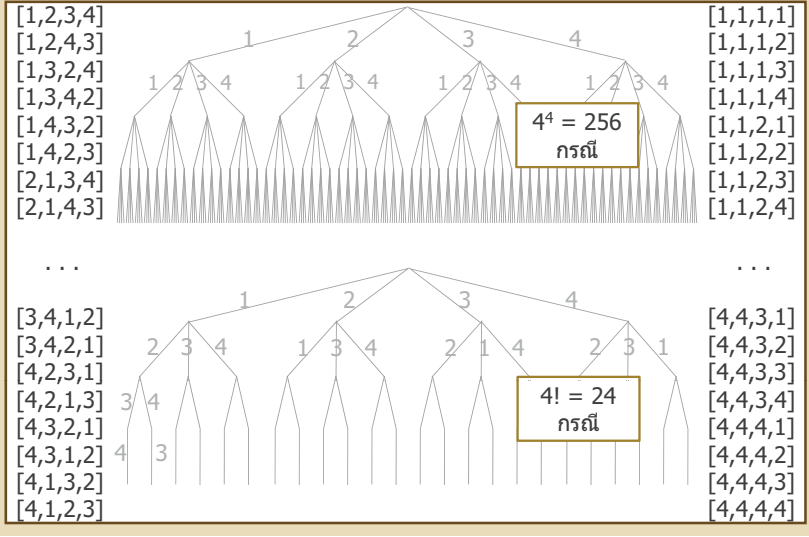
ต้องตรวจกรณีวาง  
ควีนในคอลัมน์  
เดียวกัน



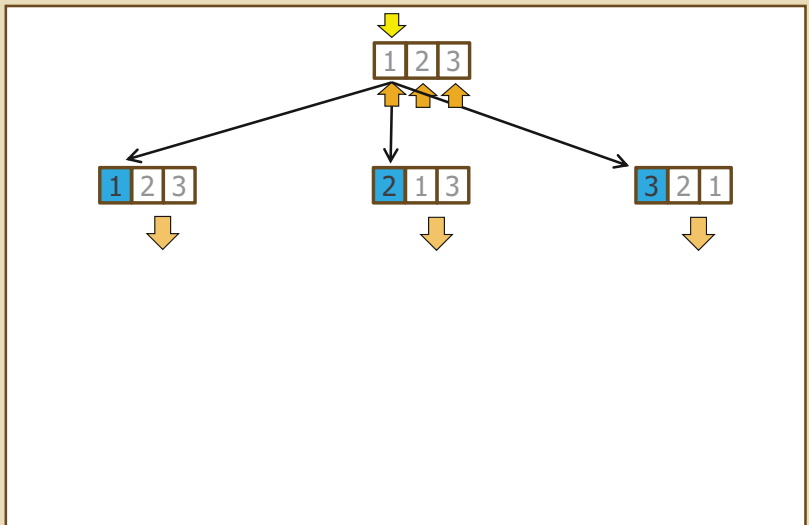
4<sup>4</sup> = 256  
กรณี

- [1,1,1,1]
- [1,1,1,2]
- [1,1,1,3]
- [1,1,1,4]
- [1,1,2,1]
- [1,1,2,2]
- [1,1,2,3]
- [1,1,2,4]
- ...
- [4,4,3,1]
- [4,4,3,2]
- [4,4,3,3]
- [4,4,3,4]
- [4,4,4,1]
- [4,4,4,2]
- [4,4,4,3]
- [4,4,4,4]

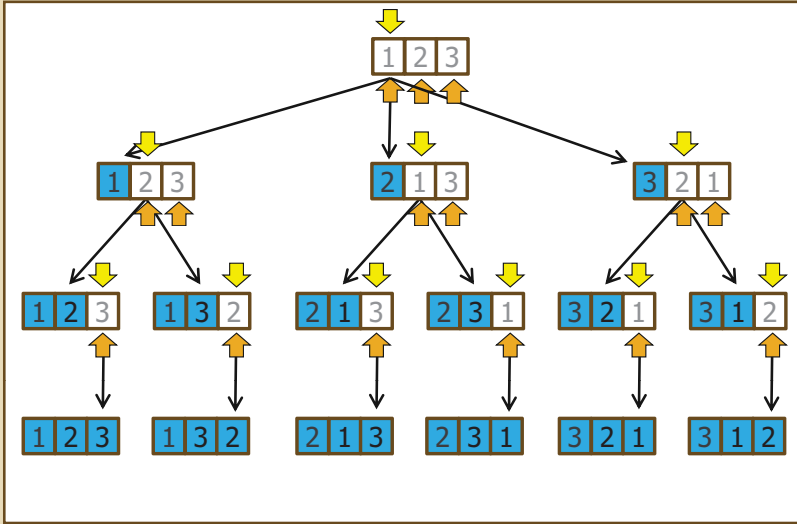
## ปรับปรุงให้ปริภูมิเล็กลง



## การแจกแจงการเรียงสับเปลี่ยน

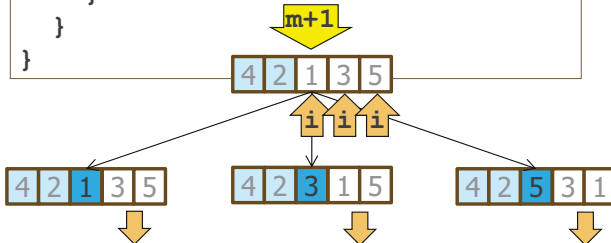


## การแจกแจงการเรียงสับเปลี่ยน



## การแจกแจงการเรียงสับเปลี่ยน

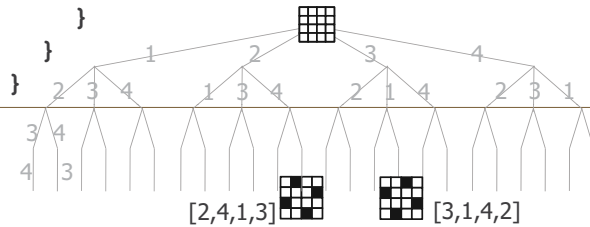
```
perm(x[1..n], m) {
    if (n == m) print(x)
    else {
        for(i = m+1; i <= n; i++) {
            x[i] ↔ x[m+1]
            perm(x, m+1)
            x[i] ↔ x[m+1]
        }
    }
}
```



## n-Queen : DFS

```

queen(x[1..n], m ) {
  if (n == m)
    if (isValid(x)) print( x )
  else {
    for(i = m+1; i <= n; i++) {
      x[i] ↔ x[m+1]
      queen(x, m+1)
      x[i] ↔ x[m+1]
    }
  }
}
    
```

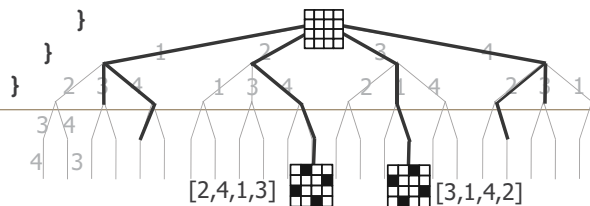


- [1,2,3,4]
- [1,2,4,3]
- [1,3,2,4]
- [1,3,4,2]
- [1,4,3,2]
- [1,4,2,3]
- [2,1,3,4]
- [2,1,4,3]
- ...
- [3,4,1,2]
- [3,4,2,1]
- [4,2,3,1]
- [4,2,1,3]
- [4,3,2,1]
- [4,3,1,2]
- [4,1,3,2]
- [4,1,2,3]

## n-Queen : Backtracking

```

queen(x[1..n], m ) {
  if (n == m)
    if (isValid(x)) print( x )
  else {
    for(i = m+1; i <= n; i++) {
      x[i] ↔ x[m+1]
      if (isValid(x, m+1))
        queen(x, m+1)
      x[i] ↔ x[m+1]
    }
  }
}
    
```



- [1,2,3,4]
- [1,2,4,3]
- [1,3,2,4]
- [1,3,4,2]
- [1,4,3,2]
- [1,4,2,3]
- [2,1,3,4]
- [2,1,4,3]
- ...
- [3,4,1,2]
- [3,4,2,1]
- [4,2,3,1]
- [4,2,1,3]
- [4,3,2,1]
- [4,3,1,2]
- [4,1,3,2]
- [4,1,2,3]

## n-Queen : Backtracking

n	จำนวนคำตอบ	จำนวนการเรียกซ้ำจนพบคำตอบแรก		เวลาในการหาทุกคำตอบ (วินาที)	
		แบบแรก ( $n^n$ )	แบบที่สอง ( $n!$ )	แบบแรก ( $n^n$ )	แบบที่สอง ( $n!$ )
4	2	9	9	≈ 0	≈ 0
5	10	6	6	≈ 0	≈ 0
6	4	32	33	≈ 0	≈ 0
7	40	10	10	≈ 0	≈ 0
8	92	114	117	≈ 0	≈ 0
9	352	42	44	≈ 0	≈ 0
10	724	103	103	0.01	≈ 0
11	2,680	53	53	0.06	0.05
12	14,200	262	262	0.37	0.26
13	73,712	112	108	2.26	1.55
14	365,596	1,900	1,915	15.13	10.00
15	2,279,184	1,360	1,359	106.26	68.23
16	14,772,512	10,053	10,053	798.30	497.55
17	95,815,104	5,375	5,447	6,213.57	3,747.33

## n-Queen : Backtracking

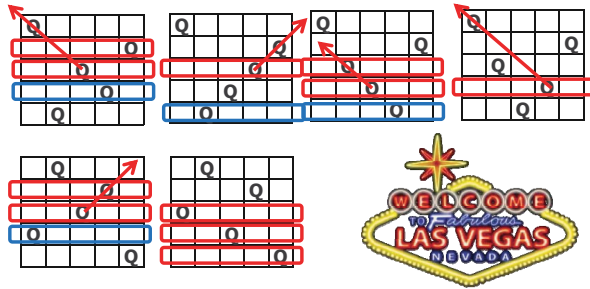
n	ปริภูมิแบบ permutation (หยุดค้นเมื่อพบคำตอบแรก)	
	จำนวนปม	เวลา (วินาที)
5	6	≈ 0
10	103	≈ 0
15	1,359	0.004
20	199,638	0.073
25	48,652	0.023
30	16,918,415	10.231
35	255,491,565	189.845

นานไป



## n-Queen : Las Vegas

- ❖ เริ่มด้วย permutation สุ่ม ๆ ของ  $1, 2, \dots, n$
- ❖ ตรวจสอบทีละแถวว่า เห็นควีนแถวบน ๆ หรือไม่
- ❖ ถ้าเห็น ให้สลับควีนของแถวนั้นกับแถวถัดไป
- ❖ ถ้าสลับครบทุกแถวแล้วยังไม่สำเร็จ ทำใหม่ทั้งหมด



## n-Queen : Las Vegas

```

queenLV( col[1..n] ) {
  for ( i = 1; i <= n; i++) col[i] = i;
  while ( queenLV1(col) == false ) {}
  print( col )
}
queenLV1(col[1..n]) {
  shuffle( col )
  for(k = 2; k <= n; k++) {
    j = k + 1
    while (!isValid(col, k)) {
      if ( j > n) return false
      col[k] ↔ col[j];
      j++
    }
  }
  return true
}

```

## n-Queen : Las Vegas

$n$	ปริภูมิแบบ permutation (หยุดค้นเมื่อพบคำตอบแรก)	
	จำนวนสถานะ	เวลา (วินาที)
100	122,468	0.05
150	110,397	0.06
200	633,492	0.45
250	869,546	0.74
300	5,743,536	5.76
350	3,546,165	4.08
400	10,838,971	14.14
450	15,321,788	22.24
500	4,779,326	7.78
550	126,438,286	218.59
600	12,246,381	23.09
650	156,425,660	315.30
700	76,669,563	164.98
750	299,588,148	696.40
800	134,631,279	333.67

$n$	จำนวนคำตอบ
4	2
5	10
6	4
7	40
8	92
9	352
10	724
11	2,680
12	14,200
13	73,712
14	365,596
15	2,279,184
16	14,772,512
17	95,815,104

## Assignment Problem

- ❖ มีงาน  $n$  งาน, มีคน  $n$  คน
- ❖ ต้นทุนการให้คนที่  $i$  ทำงานที่  $j$  เท่ากับ  $c_{ij}$
- ❖ จงหาการกำหนดงานให้กับทุกคน ที่ใช้ต้นทุนต่ำสุด (แต่ละคนทำงานต่างกัน)
- ❖ ผลเฉลยอยู่ในรูปแบบ permutation

❖ (4, 2, 1, 3)

$a, b, c, d$

	งาน			
	1	2	3	4
คน $a$	14	12	15	20
$b$	15	10	14	25
$c$	10	19	17	23
$d$	16	18	8	40

Branch & Bound

# Lower Bound ของต้นทุนการจ้างงาน

❖ ใช้อะไรแทน cost นำทางในการค้น (branch) ?

❖ เป็น minimization problem

- ❖ ต้องหา lower bound ของต้นทุนการจ้างงานกับคน
- ❖ ต้องจำต้นทุนรวมน้อยสุดของคำตอบที่ดีที่สุดที่รู้มา

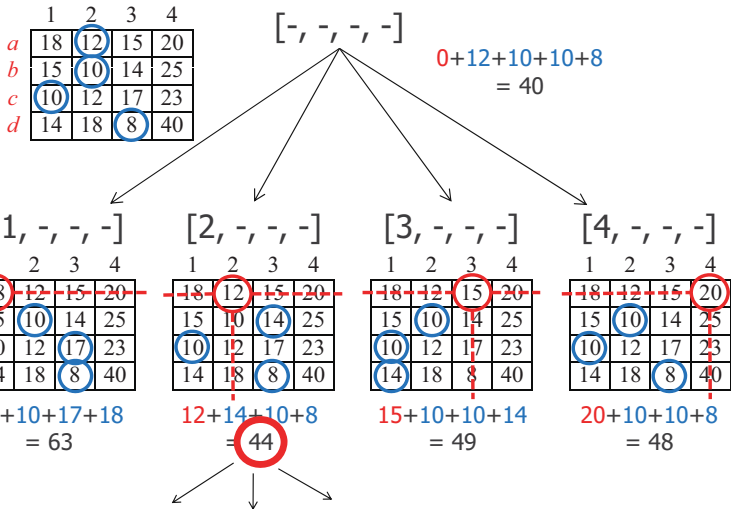
❖ ค่าวน lower bound ของต้นทุนการจ้างงาน ?

- ❖ ต้นทุนการจ้างงานที่ตัดสินใจไปแล้ว บวกกับ 15
- ❖ ต้นทุนน้อยสุดของการจ้างงานกับคนที่เหลือ  $10 + 10 + 14$

	1	2	3	4	
a	<del>18</del>	<del>12</del>	15	<del>20</del>	49
b	15	10	14	25	
c	10	16	17	23	
d	14	18	8	40	

[3, -, -, -]

## Assignment : Branch & Bound



# Assignment : Branch & Bound

1	2	3	4
<del>18</del>	12	<del>15</del>	<del>20</del>
15	10	14	25
10	12	17	23
14	18	8	40

[2, -, -, -]

$$12+14+10+8 = 44$$

[2, 1, -, -]

a

1	2	3	4
	12		
<del>15</del>	<del>14</del>	<del>25</del>	
10		17	23
14		8	40

b

$$12+15+17+8 = 52$$

[2, 3, -, -]

c

1	2	3	4
	12		
<del>15</del>		<del>14</del>	<del>25</del>
10		17	23
14		8	40

$$12+14+10+14 = 50$$

[2, 4, -, -]

1	2	3	4
	12		
<del>15</del>		<del>14</del>	<del>25</del>
10		17	23
14		8	40

$$12+25+10+8 = 55$$

# Assignment : Branch & Bound

[-, -, -, -]

40

[1, -, -, -]

59

[2, -, -, -]

44

[3, -, -, -]

49

[4, -, -, -]

48

[2, 1, -, -]

52

[2, 3, -, -]

50

[2, 4, -, -]

55

[4, 2, -, -]

48

[4, 3, -, -]

60

[4, 1, -, -]

55

[4, 2, 3, -]

61

[4, 2, 1, -]

48

[4, 2, 1, 3]

48

## ตรวจสอบหนึ่งคำตอบตอนเริ่มต้น

	1	2	3	4
a	18	12	15	20
b	15	10	14	25
c	10	12	17	23
d	14	18	8	40

$$18+10+17+40 = 85$$

หรือ

	1	2	3	4
a	18	12	15	20
b	15	10	14	25
c	10	12	17	23
d	14	18	8	40

$$20+14+12+14 = 60$$

หรือ ...

ให้กับ  $C_{\min}$  ตอนเริ่มต้น

$$C_{\min} = 60$$

[-, -, -, -] 40

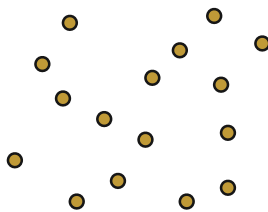
[1, -, -, -]  
63

[2, -, -, -]  
44

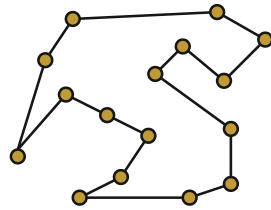
[3, -, -, -]  
49

[4, -, -, -]  
48

## Travelling Salesperson Problem



Input



Output

## TSP : รูปแบบของผลเฉลย

- ❖ ผ่าน  $n$  เมือง เมืองละครั้ง และกลับมาที่เมืองเริ่มต้น
- ❖ ผลเฉลยอยู่ในรูปแบบ permutation ของ  $1,2,\dots,n$  (ที่มี 1 เป็นจุดเริ่มต้น เพราะเป็นวงกลับมา 1)
- ❖ ตัวอย่าง :  $n = 4$  มีทั้งหมด  $(4-1)! = 6$ 
  - ❖  $(1,2,3,4), (1,2,4,3), (1,3,2,4),$   
 $(1,3,4,2), (1,4,2,3), (1,4,3,2)$

## TSP : ลุยทุกผลเฉลย (DFS)

```

tsp( g[1..n][1..n] ) {
    L_MIN = ∞; x_MIN = []
    tsp( g, [1,2,3,...,n], 1 );
    return x_MIN
}
tsp( g[1..n][1..n], x[1..n], m ) {
    if (n == m) {
        len = tourLength(g, x)
        if (len < L_MIN) {L_MIN = len; x_MIN = x}
    } else {
        for(i = m+1; i <= n; i++) {
            x[i] ↔ x[m+1]
            tsp( g, x, m+1 )
            x[i] ↔ x[m+1]
        }
    }
}

```

## TSP : ลุยทุกผลเฉลย (BFS)

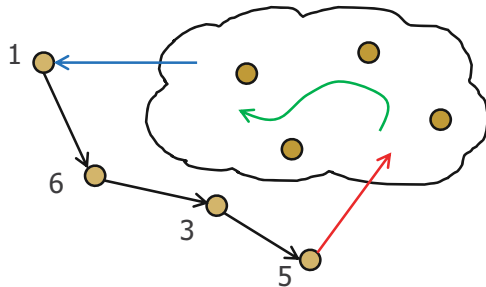
```

tsp( g[1..n][1..n] ) {
  LMIN = ∞; xMIN = []
  Q = an empty queue
  Q.enqueue([1,2,...,n], 1) {
  while ( Q ≠ ∅ ) {
    (x, m) = Q.dequeue()
    if (n == m) {
      len = tourLength(g, x)
      if (len < LMIN) {LMIN = len; xMIN = x}
    } else {
      for (i = m+1; i <= n; i++) {
        x' = copyOf(x)
        x'[i] ↔ x'[m+1]
        Q.enqueue(x', m+1)
      }
    }
  }
  return xMIN
}
    
```

## TSP : Branch & Bound

### ❖ TSP เป็น minimization problem

- ❖ ต้องหา lower bound ของระยะทางการเดินทาง
- ❖ ต้องจำระยะทางน้อยสุดของการเดินทางที่สั้นสุดที่รู้มา



รู้แล้ว

[1, 6, 3, 5, -, -, -, -]

ต้องคำนวณ lower bound

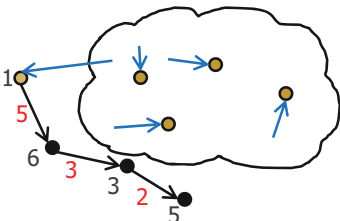
## TSP : Branch & Bound

```

tspBB( g[1..n][1..n] ) {
    H = an empty queue
    x_MIN = [1,2,...,n]; L_MIN = tourLengthLB(g, x_MIN, n)
    H.add(x_MIN, 1, tourLengthLB(g, x_MIN, 1))
    while ( H ≠ ∅ ) {
        (x, m, L_LB) = H.removeMin()
        if (L_LB ≥ L_MIN) break;
        if (n == m) {
            L_MIN = L_LB; x_MIN = x
        } else {
            for (i = m+1; i ≤ n; i++) {
                x' = copyOf(x)
                x'[i] ↔ x'[m+1]
                H.add(x', m+1, tourLengthLB(g, x', m+1))
            }
        }
    }
    return x_MIN
}
    
```

## Lower Bound : $\Sigma$ สั้นสุดพุ่งเข้า

การเดินทางเป็นวงผ่านทุกปม  
ทุกปมต้องมีเส้นเชื่อม **พุ่งเข้า** หา



ใช้ผลรวมของความยาว  
เส้นเชื่อม **สั้นสุดที่พุ่งเข้า**

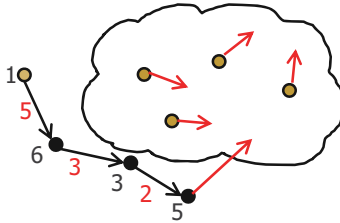
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	9	5	6	3	5	1	2
2	5	-	7	4	7	5	3	2
3	1	3	-	5	2	4	1	3
4	2	4	1	-	3	7	6	3
5	2	3	4	6	-	2	4	3
6	2	4	3	5	1	-	6	3
7	1	5	3	6	3	7	-	4
8	7	4	5	3	6	2	5	-

$$5+3+2 + 1+3+3+3+2 = 22$$



## Lower Bound : $\Sigma$ สิ้นสุดพุ่งออก

การเดินทางเป็นวงผ่านทุกปม  
ทุกปมต้องมีเส้นเชื่อม**พุ่งออก**



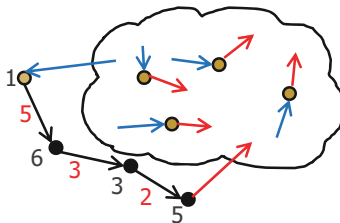
ใช้ผลรวมของความยาว  
เส้นเชื่อม**สิ้นสุดที่พุ่งออก**

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	9	5	6	3	5	1	2
2	5	-	7	4	7	5	3	2
3	1	3	-	5	2	4	1	3
4	2	4	1	-	3	7	6	3
5	2	3	4	6	-	2	4	3
6	2	4	3	5	1	-	6	3
7	1	5	3	6	3	7	-	4
8	7	4	5	3	6	2	5	-

$$5+3+2 + 2+2+2+1+3 = 20$$

## Lower Bound : $\Sigma$ สิ้นสุดพุ่งเข้าออก

การเดินทางเป็นวงผ่านทุกปม  
ทุกปมต้องมีเส้นเชื่อม**พุ่งเข้าและออก**



ใช้ผลรวมของความยาว  
ครึ่งหนึ่งเส้นเชื่อม**สิ้นสุดที่พุ่งเข้า**  
ครึ่งหนึ่งเส้นเชื่อม**สิ้นสุดที่พุ่งออก**

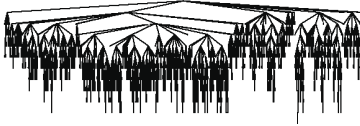
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	9	5	6	3	5	1	2
2	5	-	7	4	7	5	3	2
3	1	3	-	5	2	4	1	3
4	2	4	1	-	3	7	6	3
5	2	3	4	6	-	2	4	3
6	2	4	3	5	1	-	6	3
7	1	5	3	6	3	7	-	4
8	7	4	5	3	6	2	5	-

$$5+3+2 + (1+3+3+3+2)/2 + (2+2+2+1+3)/2 = 21$$

## ผลการใช้ Lower Bound แบบต่าง ๆ

12 เมือง

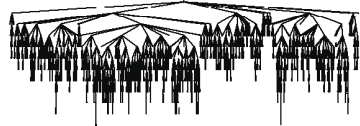
$11! = 39,916,800$  ปมสถานะ



$\Sigma$  สิ้นสุดพุ่งออก  
3,760 ปม



$\Sigma$  สิ้นสุดพุ่งเข้า  
3,748 ปม



$\Sigma$  สิ้นสุดพุ่งเข้าออก  
3,061 ปม

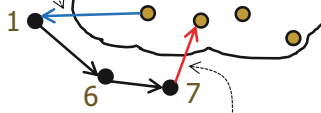
## ผลการใช้ Lower Bound แบบต่าง ๆ

n	(n-1)!	จำนวนปมที่ค้นจนพบค่าตอบที่ดีที่สุด		
		$\Sigma$ พุ่งออกสิ้นสุด	$\Sigma$ พุ่งเข้าสิ้นสุด	$\frac{1}{2} \Sigma$ พุ่งออกสิ้นสุด + $\frac{1}{2} \Sigma$ พุ่งเข้าสิ้นสุด
12	3.9E+07	3,760	3,748	3,061
13	4.8E+08	5,467	5,596	4,609
14	6.2E+09	13,829	14,391	11,438
15	8.7E+10	24,095	30,127	21,419
16	1.3E+12	212,427	53,906	76,597
17	2.1E+13	812,003	115,314	223,374
18	3.6E+14	817,545	126,305	227,961
19	6.4E+15	879,701	160,094	260,309
20	1.2E+17	25,302	3,203	6,547
21	2.4E+18	832,548	684,112	519,849
22	5.1E+19	1,743,490	759,293	709,383
23	1.1E+21	7,976,159	4,395,088	3,776,967
24	2.6E+22	8,792,218	6,736,808	4,622,674
25	6.2E+23	9,274,855	10,393,598	5,556,872
26	1.6E+25	16,497,668	15,663,247	8,426,109

## Lower Bound อีกแบบ : MST

ต้องการ lower bound ระยะทาง  
ของวิธีสั้นสุดที่ผ่านทุกปมในกลุ่ม  
(ขอ path ไม่ใช่ cycle)

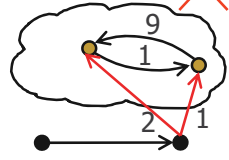
เส้นสั้นสุดจากกลุ่ม  
พุ่งเข้าหา 1



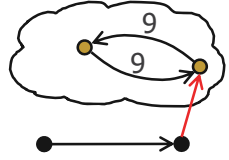
เส้นสั้นสุดจาก 7  
พุ่งเข้าหากลุ่ม

ใช้กับกรณี  $w_{ij} = w_{ji}$   
(symmetric TSP)

lower bound = ~~9~~



lower bound = 9

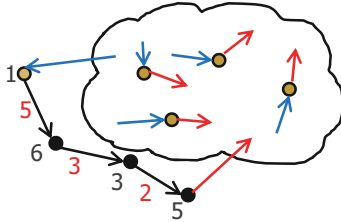


## เปรียบเทียบ Lower Bounds

$n$	$(n-1)!$	จำนวนปมที่ค้นจนพบค่าตอบที่ดีที่สุด	
		$\frac{1}{2} \Sigma$ พุ่งออกสั้นสุด + $\frac{1}{2} \Sigma$ พุ่งเข้าสั้นสุด	ใช้ minimum spanning tree
12	3.9E+07	11,027	2,814
13	4.8E+08	15,605	4,739
14	6.2E+09	14,073	2,896
15	8.7E+10	47,407	8,780
16	1.3E+12	50,367	6,166
17	2.1E+13	3,536,828	530,603
18	3.6E+14	1,223,231	240,766
19	6.4E+15	1,653,389	239,125
20	1.2E+17	4,382,206	455,304

ใช้กับกรณี  $w_{ij} = w_{ji}$   
(symmetric TSP)

## ลองทำดู



เลือกตัวมากระหว่าง  
ผลรวมเส้นเชื่อมสั้นสุดที่ฟังเข้า  
ผลรวมเส้นเชื่อมสั้นสุดที่ฟังออก

## สรุป

### ❖ ลุยทุกรูปแบบ

- ❖ DFS : ใช้หน่วยความจำน้อย แต่อาจหาคำตอบไม่พบ
- ❖ BFS : พบคำตอบที่ใกล้รากสุด แต่ใช้หน่วยความจำมาก
- ❖ LC-search : ใช้ cost function นำทางไปสู่คำตอบ

### ❖ Backtracking

- ❖ มีการพิจารณาว่าควรค้นต่อจาก state ปัจจุบันหรือไม่

### ❖ Branch and bound

- ❖ ใช้กับ optimization problem
- ❖ รู้จักเลือกปมที่ดีเพื่อแตกกิ่ง
- ❖ ใช้ขอบเขตของค่าของคำตอบที่ state ต่าง ๆ ในการเปรียบเทียบกับคำตอบดีที่สุดที่รู้มา เพื่อจำกัดการแตกกิ่ง

# เอ็นพีบริบูรณ์

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

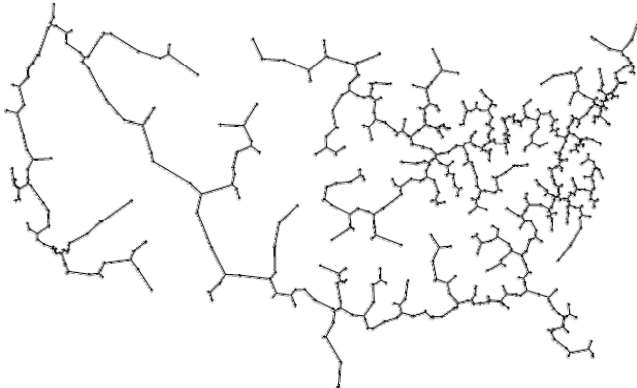
## หัวข้อ

ปัญหาง่าย – ปัญหายาก  
Polynomial – Exponential  
การจัดกลุ่มปัญหา  
กลุ่มปัญหา P และ NP  
การลดรูปปัญหา  
ปัญหา NP-complete

## เวลาในการหาคำตอบ

ปัญหา & วิธีแก้ไข	เวลาการทำงาน
ค้นข้อมูลในรายการที่เรียงแล้ว 1 ล้านตัว	< 1 ไมโครวินาที
หาตัวน้อยสุด 1 ล้านตัว	< 0.01 วินาที
เรียงลำดับข้อมูล 1 ล้านตัว	< 1 วินาที
หาวิถีสั้นสุดในกราฟที่มีเส้นเชื่อมล้านเส้น	< 1 วินาที
Geosteiner หา Steiner tree ของ 532 ปม	2.5 ชม.
Selby & Riodan แก้ Eternity Puzzle (ประกอบแผ่นจำนวน 209 ชิ้น ให้เป็นรูป 12 เหลี่ยมด้านเท่า)	7 เดือน (2 CPUs)
Concorde แก้ TSP ที่มี 15,112 เมือง	เวลารวมของ CPU จำนวน 110 ตัว ≈ 20 ปี

## Steiner Tree : 532 ปม

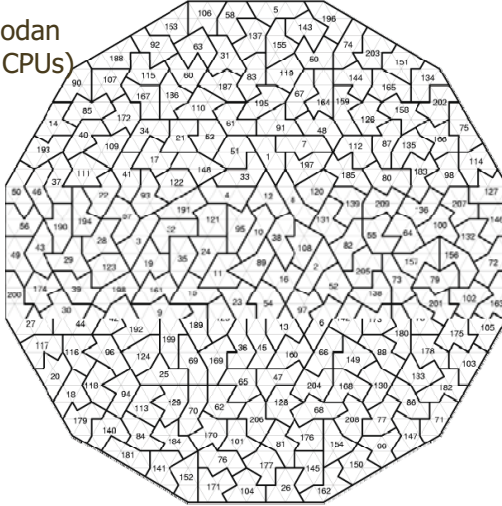


ใช้ GeoSteiner หาคำตอบของปัญหาขนาด 532 ปม  
ใช้เวลา 2.5 ชั่วโมง (ปี ค.ศ. 1998)

<http://www.diku.dk/hjemmesider/ansatte/martinz/geosteiner/>

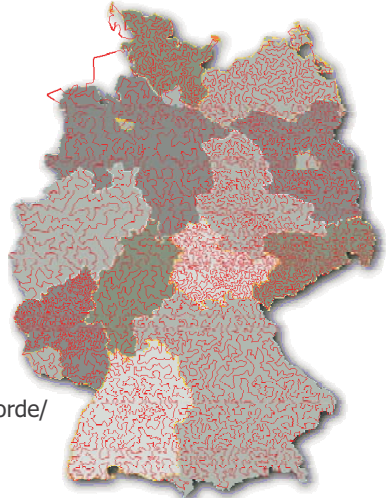
## Eternity Puzzle : 209 ชิ้น

Selby & Riodan  
7 เดือน (2 CPUs)



## TSP : 15,112 เมือง

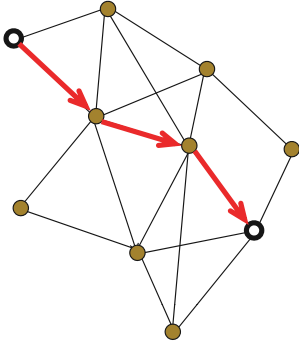
- ❖ หาค่าตอบที่ดีที่สุดได้ด้วย  
Concorde TSP
- ❖ ใช้ 110 CPUs
- ❖ รวมเวลา 585,936,700 s.  
(เทียบกับการใช้เครื่อง  
500MHz ทำงาน 22.6 ปี)



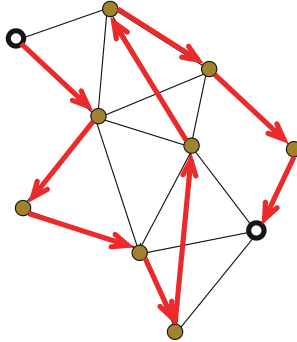
<http://www.tsp.gatech.edu/concorde/>

# ปัญหาหาง่าย – ยาก?

Shortest Path



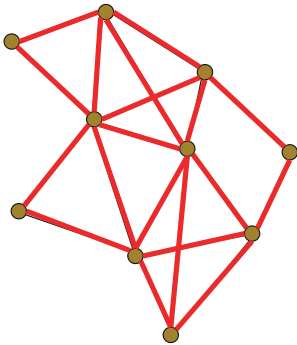
Longest Path



ทำไมถึงไม่หาวิธียาวสุด ด้วยการ  
ติดลบเส้นเชื่อม แล้วหาวิธีสั้นสุด ?

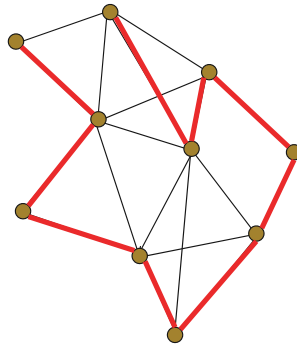
# ปัญหาหาง่าย – ยาก?

Euler Path



ผ่านทุกเส้น เส้นละครั้ง  
ลำดับเส้น  $\rightarrow [n(n-1)/2]!$

Hamiltonian Path

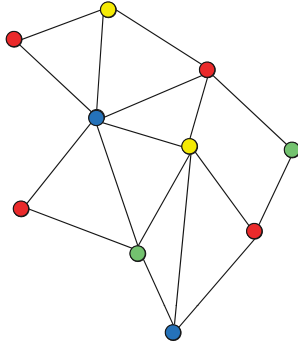


ผ่านทุกปม ปมละครั้ง  
ลำดับปม  $\rightarrow n!$



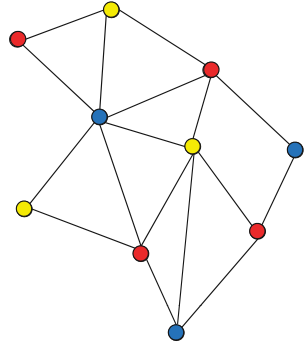
# ปัญหาง่าย – ยาก?

Planar 4 color



Planar 2 color  
ก็ง่ายมาก ลองคิดดู

Planar 3 color



# ปัญหาง่าย – ยาก?

Primality Testing

1111111111111111123

No

Factoring

1111111111111111123

$$= 8092579104960751 \times 1373$$

## อัลกอริทึมที่มีและไม่มีประสิทธิภาพ

### ❖ Search

- ❖  $O(n)$  : sequential search → ช้า
- ❖  $O(\log n)$  : binary search → เร็ว

### ❖ Sorting

- ❖  $O(n^2)$  : bubble sort, insertion sort → ช้า
- ❖  $O(n \log n)$  : merge sort, heap sort → เร็ว

### ❖ Longest Common Subsequence

- ❖  $O(2^n)$  : brute force → ช้า
- ❖  $O(n^2)$  : dynamic programming → เร็ว

อะไรจะเป็นตัวบอกว่าอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพ ?

## Polynomial vs. Exponential

### ❖ Polynomial-time algorithms Efficient

- ❖ อัลกอริทึมที่ใช้เวลาทำงานเป็น  $O(n^k)$   $k$  เป็นค่าคงตัว

### ❖ Exponential-time algorithms Inefficient

- ❖ อัลกอริทึมที่ใช้เวลาทำงานเป็น  $\Omega(c^n)$   $c$  เป็นค่าคงตัว  $c > 1$

ฟังก์ชัน	n				
	10	20	30	100	200
$2n$	20	40	60	200	400
$n \log_2 n$	33	86	166	664	1528
$n^2$	100	400	900	10000	40000
$n^4$	10000	40000	810000	$1 \times 10^8$	$1.6 \times 10^9$
$2^n$	1024	1048576	$1.07 \times 10^9$	$1.27 \times 10^{30}$	$1.61 \times 10^{60}$
$n!$	3628800	$2.43 \times 10^{18}$	$2.65 \times 10^{26}$	$33 \times 10^{157}$	$7.89 \times 10^{374}$
$n^n$	$10^{10}$	$1.05 \times 10^{26}$	$2.06 \times 10^{44}$	$1 \times 10^{200}$	$1.61 \times 10^{460}$

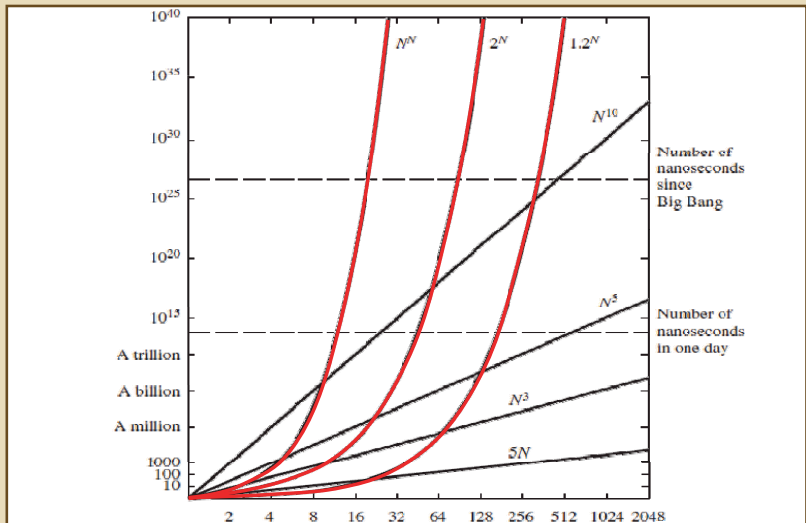
## เมื่อ $n$ ใหญ่ : Exp-time Algo ซ้ำมาก

ให้ CPU ทำงาน เหมือนล้านคำสั่งใน 1 วินาที

$$10 \text{ Giga} = 10^{10}$$

ฟังก์ชัน	n				
	10	20	30	100	200
$2n$	2ns	4ns	6ns	20ns	40ns
$n \log_2 n$	3.3ns	8.6ns	15ns	15ns	153ns
$n^2$	10ns	40ns	90ns	1 $\mu$ s	4 $\mu$ s
$n^4$	1 $\mu$ s	4 $\mu$ s	81 $\mu$ s	0.01s	0.16s
$2^n$	102ns	10.5ms	0.11s	$4.0 \times 10^{12}$ y	$5.1 \times 10^{42}$ y
$n!$	36.3ms	7.7 y	$8.4 \times 10^{14}$ y	$2.9 \times 10^{140}$ y	$2.5 \times 10^{357}$ y
$n^n$	1s	$330 \times 10^6$ y	$6.5 \times 10^{26}$ y	$3.2 \times 10^{182}$ y	$5.1 \times 10^{388}$ y

## Polynomial vs. Exponential



## อย่างก็งวลมากกับกรณีแปลก ๆ

- ❖ ถ้า  $k$  มาก  $O(n^k)$  – algo. ก็ช้ามากเหมือนกัน ?
- ❖  $n^{10}$  กับ  $n^{\log \log n}$  น่าใช้อันไหน ?
  - ❖  $n^{10}$  : polynomial
  - ❖  $n^{\log \log n}$  : super-polynomial
  - ❖ ถ้า  $n = 10^{100}$  :  $n^{10} = 10^{1000}$ ,  $n^{\log \log n} = 10^{200}$
- ❖ เพื่อความง่ายในการจัดกลุ่มปัญหา
  - ❖ Poly-time algo. (ส่วนใหญ่) → efficient algo.
  - ❖ Exp-time algo. (ส่วนใหญ่) → inefficient algo.

## ปัญหาง่าย - ยาก

### Tractable problems

- มี polynomial-time algo. หาคำตอบได้
  - min, max,
  - sort, search, select,
  - shortest path, MST, LCS,
  - ...

### Intractable problems

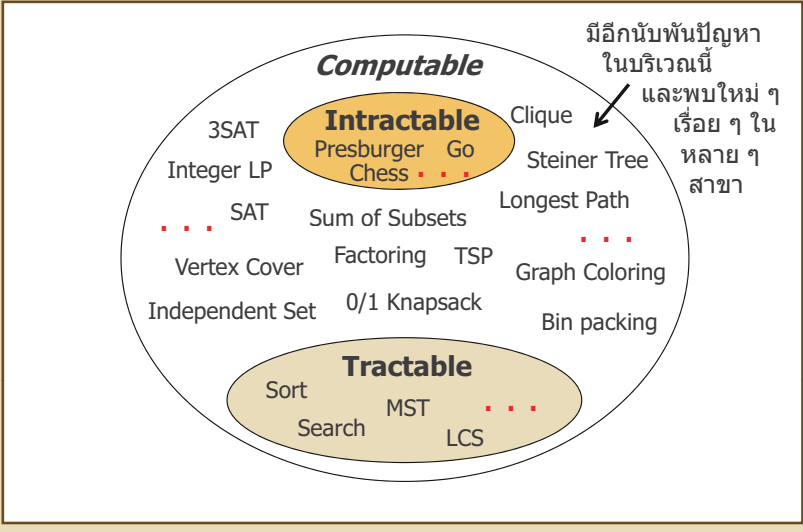
- ต้องใช้เวลาน้อย
- **Super-Polynomial algo.**
  - Tower of hanoi,
  - Halting in  $k$  instructions
  - Generalized Chess, Checker

ปัญหาง่าย

ปัญหายาก

แล้วพวก TSP, 0/1 Knapsack ?

# การจัดกลุ่มปัญหา



# Games & Puzzles : ยาก?



Clickomania



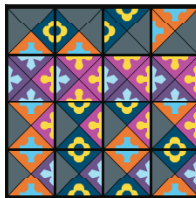
Rush Hour



Minesweeper

		6	4		1
	5		8	2	7
1		7		3	
4	6		2	7	9
9	2	3	5		6
		8		1	
7	1	9	6		8
2			4	8	

Sudoku



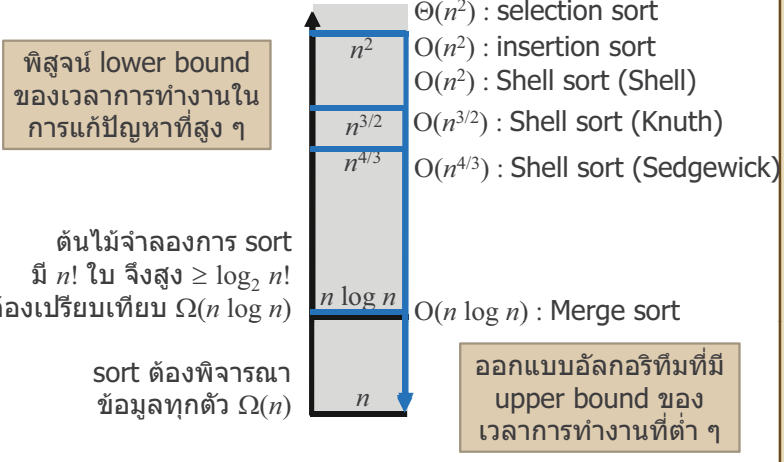
Tiling (Edge-Matching)

**SEND**            9567  
**+MORE**        +1085  
**MONEY**        10652

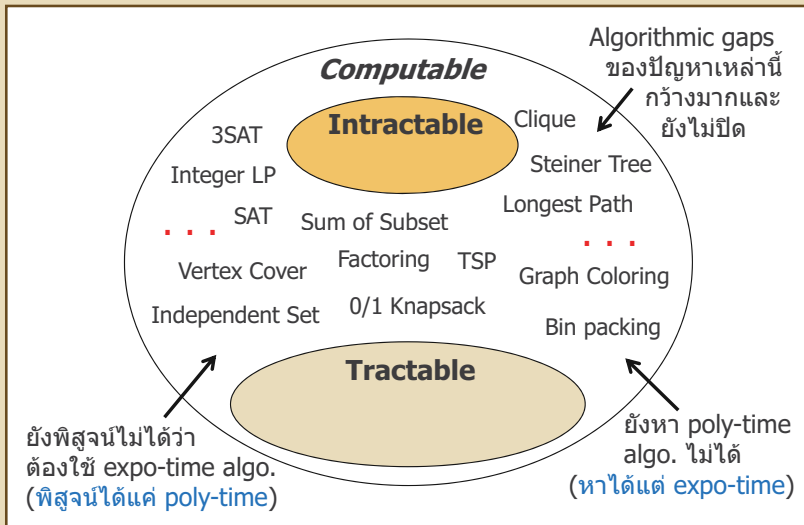
Cryptarithms

# Algorithmic Gap

## Comparison-based Sorting



# Algorithmic Gap



## Decision Problems

- ❖ ปัญหาตัดสินใจ ที่ให้ผลลัพธ์เป็นหนึ่งในสองค่า
  - ❖ True / False, Yes / No, มี / ไม่มี, ได้ / ไม่ได้
- ❖ ตัวอย่าง
  - ❖ G มี spanning tree ที่เส้นเชื่อมยาวรวมไม่เกิน k หรือไม่
  - ❖ แบ่งเซต D เป็นสองเซตย่อยที่มีผลรวมข้อมูลเท่ากันได้หรือไม่
  - ❖ P เป็นจำนวนเฉพาะหรือไม่
  - ❖ ...
- ❖ จากนั้นไปจะสนใจปัญหาตัดสินใจ
  - ❖ สนใจแต่ขนาดของ input ไม่ต้องสนใจขนาดของ output
  - ❖ ง่ายต่อการเปรียบเทียบความยากง่ายของปัญหา
  - ❖ ง่ายในการจัดกลุ่มปัญหา

## Decision Problems

- ❖ ปัญหาที่ผ่านมา ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ใช่แบบ True/False
    - ❖ แต่สามารถแปลงเป็น decision problem ได้
  - ❖ **Sum of subsets**
    - ❖ หาเซตย่อยของ D ที่ให้ผลรวมเป็น k
    - ❖ D มีเซตย่อยที่มีผลรวมเป็น k หรือไม่
  - ❖ **Travelling Salesman**
    - ❖ หา tour ที่มีระยะทางสั้นสุด ที่ผ่านทุกเมืองในกราฟ G
    - ❖ กราฟ G มี tour ผ่านทุกเมือง ที่มีระยะทางรวมอย่างมาก k หรือไม่
  - ❖ **0/1 Knapsack**
    - ❖ หาของที่หยิบใส่ถุง (ไม่ขาด) ให้มีมูลค่ารวมสูงสุด
    - ❖ มีวิธีหยิบของใส่ถุง (ไม่ขาด) ได้มูลค่ารวมอย่างน้อย k หรือไม่
- optimization problems

## Decision กับ Optimization

- ❖ ให้  $Q_{DEC}$  เป็นปัญหัดัดสินใจของ  $Q_{OPT}$
- ❖ ถ้า  $Q_{DEC}$  ยาก  $\rightarrow Q_{OPT}$  ยากแน่
- ❖ ถ้า  $Q_{OPT}$  ง่าย  $\rightarrow Q_{DEC}$  ง่ายด้วย
- ❖ มีหลายปัญหาที่
  - ❖ ใช้ algo ของ  $Q_{DEC}$  หาคำตอบของ  $Q_{OPT}$  ได้

## Graph Coloring

- ❖ **Graph Coloring** ปมปลายของเส้นเชื่อมเดียวกัน ห้ามมีสีเหมือนกัน
  - ❖  $GC_{OPT}$  : ใช้สีที่น้อยสุดในการทาสีของกราฟ  $G$  (หา  $\chi(G)$ )
  - ❖  $GC_{DEC}$  : ใช้  $k$  สีทาสีของกราฟ  $G$  ได้หรือไม่

```
GC_Dec( G, k ) {
  c = GC_Opt( G )
  return c <= k
}
```

ใช้ algo ของ  $GC_{OPT}$   
หาคำตอบให้  $GC_{DEC}$  ได้

```
GC_OPT( G=(V,E) ) {
  for (k = 1; k<=|V|; k++) {
    if (GC_Dec(G, k)) return k
  }
  return ???
}
```

ใช้ algo ของ  $GC_{DEC}$   
หาคำตอบให้  $GC_{OPT}$  ได้



## หาคำตอบของ $GC_{Opt}$ ด้วย $GC_{Dec}$

```

GC_OPT( G=(V,E) ) {
  low = 1; high = |V|; k = high
  while (low <= high) {
    mid = (low + high) / 2
    if (GC_Dec(G, mid)) {
      if (mid < k) k = mid
      high = mid - 1
    } else {
      low = mid + 1
    }
  }
  return k
}

```

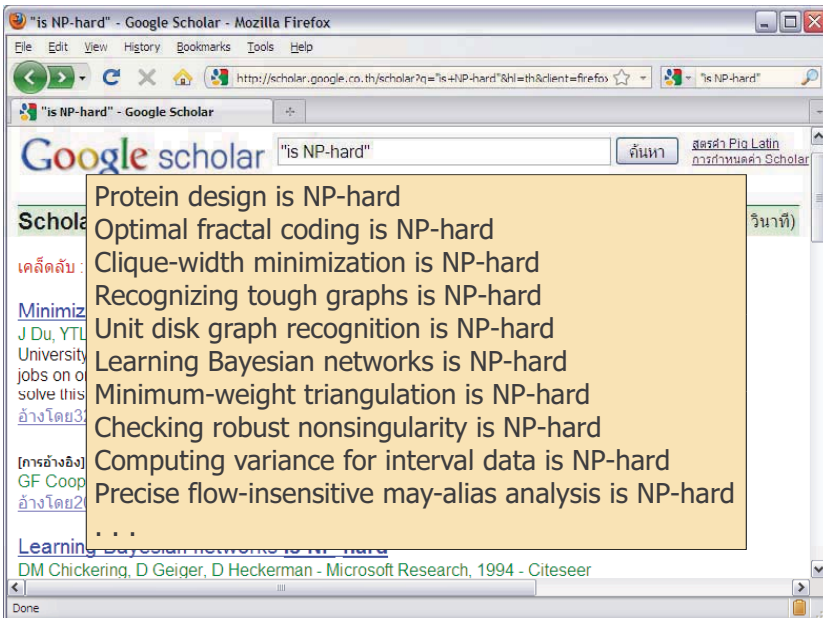
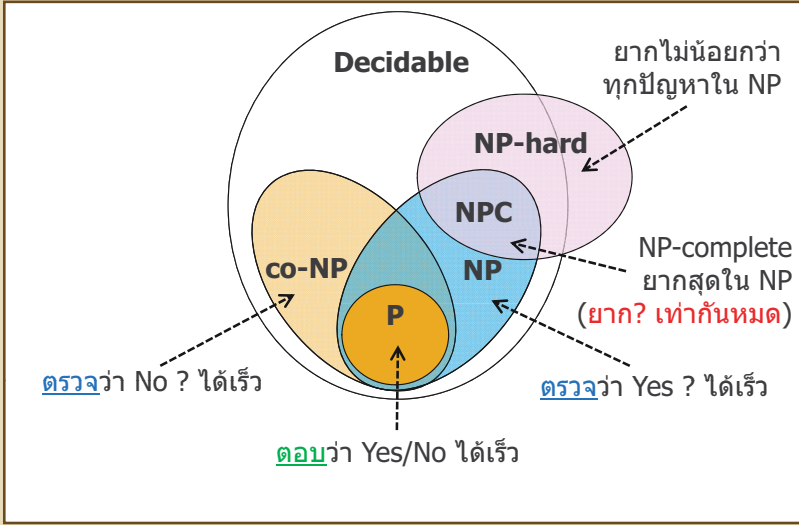
low	high	mid	$GC_{Dec}$	k
1	50	25	true	25
1	24	12	true	12
1	11	6	true	6
1	5	3	false	6
4	5	4	false	6
5	5	5	true	5

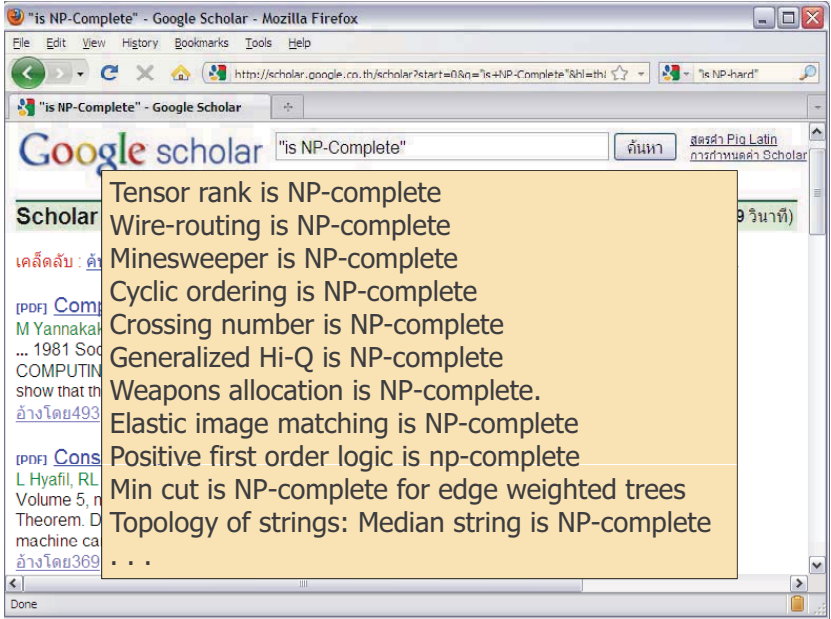
ด.ย. ให้กราฟมี 50 ปม  
chromatic number = 5

## ลองคิดดู

- ❖ กำหนดให้มี  $DSubsetSum( d[1..n], k )$ 
  - ❖ คืน true : เมื่อมีเซตย่อยของ  $d$  ที่มีผลรวมเท่ากับ  $k$
  - ❖ คืน false : เมื่อไม่มีเซตย่อยของ  $d$  ที่มีผลรวมเป็น  $k$
- ❖ จงเขียน  $SubsetSum( d[1..n], k )$ 
  - ❖ คืนเซตย่อยของ  $d$  ที่มีผลรวมเป็น  $k$  (ถ้ามี)
  - ❖ ใช้  $DSubsetSum( d, k )$  ให้เป็นประโยชน์
  - ❖ ถ้า  $DSubsetSum$  ทำงานใน polynomial time  
ต้องการให้  $SubsetSum$  ทำงานใน polynomial time ด้วย

# การจัดกลุ่มปัญหา





## กลุ่ม P

❖ P คือ กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่ **หาคำตอบได้** ในเวลา **polynomial time**

❖ ตัวอย่าง

- ❖ รายการ L มีตัวหุ่่มากหรือไม่ (majority) ?
- ❖ รายการ L มีข้อมูลที่มีค่าเป็น x หรือไม่ ?
- ❖ กราฟ G มี spanning tree ที่ความยาวเส้นเชื่อมรวมไม่เกิน k ?
- ❖ กราฟ G มีวิถี Euler หรือไม่ ?
- ❖ ลำดับ X และ Y มีความยาวของ LCS(X,Y) อย่างน้อย k ?
- ❖ การคูณเมตริกซ์  $A_1 A_2 \dots A_n$  ใช้จำนวนการคูณแบบสเกลาร์ไม่เกิน k ครั้งหรือไม่ ?
- ❖ M เป็นจำนวนเฉพาะหรือไม่ ?
- ❖ M เป็นจำนวนประกอบหรือไม่ ?

## กลุ่ม NP

- ❖ P : กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่ **หาคำตอบได้** ในเวลา polynomial time
- ❖ NP : กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่ **ตรวจคำตอบ yes ได้** ในเวลา polynomial time

d มีตัวหมู่มากหรือไม่ ?

```

hasMajority(d[1..n]) {
  for (i=1; i<=n; i++) {
    c = count(d, d[i])
    if (c > n/2) return true
  }
  return false
}

```

 $O(n^2)$ 

MAJORITY  $\in$  P

## กลุ่ม NP

- ❖ P : กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่ **หาคำตอบได้** ในเวลา polynomial time
- ❖ NP : กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่ **ตรวจคำตอบ yes ได้** ในเวลา polynomial time

d มีตัวหมู่มากหรือไม่ ?

```

validMajority(d[1..n], maj) {
  c = 0;
  for (i=1; i<=n; i++)
    if (d[i] == maj) c++;
  return c > n/2
}

```

witness,  
certificate

 $\Theta(n)$ 

MAJORITY  $\in$  NP

$P \subseteq NP$

(polynomial time verifiable)

## Verifier : Graph Coloring

เราหาสีปมใน  $G$  ด้วยสี  $k$  สีได้หรือไม่ ? witness,  
certificate

```

validColoring(G[1..n][1..n], k, color[1..n]) {
  numberOfColors = max(color)
  if (numberOfColors > k) return false
  for (i=1; i<n; i++) {
    for (j=i+1; j<=n; j++) {
      if (G[i][j] == true AND color[i] == color[j])
        return false
    }
  }
  return true
}

```

 $O(n^2)$ 

GRAPHCOLORING  $\in$  NP

## Verifier : Sum of Subset

$d$  มีเซตย่อยที่มีผลรวมเท่ากับ  $k$  ? witness,  
certificate

```

validSubsetSum( d[1..n], k, x[1..n] ) {
  sum = 0
  for (i=1; i<=n; i++)
    sum += d[i]*x[i]
  return (sum == k)
}

```

 $\Theta(n)$ 

SUBSETSUM  $\in$  NP

## Verifier : TSP

G มี Hamiltonian circuit ที่ยาว  $\leq k$  ? ↗ witness, certificate

```

validTSP( G[1..n][1..n], k, v[1..m] ) {
  if ( m ≠ n ) return false
  visited = an array of boolean[1..n]
  visited[] = false; visited[v[1]] = true
  for (i=2; i<=n; i++) {
    if ( visited[v[i]] ) return false
    visited[v[i]] = true
    length += G[v[i-1]][v[i]]
  }
  length += G[v[n]][v[1]]
  return length <= k
}

```

 $\Theta(n)$ 

TSP  $\in$  NP

## ให้แสดงว่า KNAPSACK $\in$ NP

มีวิธีหยิบของใส่ถุงเป้ โดยที่ถุงไม่ขาด  
และได้มูลค่ารวมรวมอย่างน้อย k ?

```

validKnapsack( ??? ) {
  ???
}

```

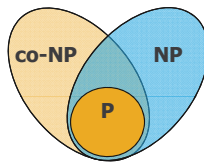
## กลุ่ม co-NP

❖ **กลุ่มปัญหา NP :**

- ❖ กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่ ตรวจสอบคำตอบ yes ได้ ในเวลา polynomial time

❖ **กลุ่มปัญหา co-NP :**

- ❖ กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่ ตรวจสอบคำตอบ No ได้ ในเวลา polynomial time



## Primality Testing

ตรวจสอบ Yes :  $n$  เป็นจำนวนเฉพาะ ?

Pratt certificate

```
validPrime( n, c ) {
  // คืน true ถ้าเป็น prime
  // ขอไม่แสดงรายละเอียด
}
```

Prime  $\in$  NP

$\Theta((\log n)^4)$

ตรวจสอบ No :  $n$  ไม่ใช่เป็นจำนวนเฉพาะ ?

ตัวประกอบของ  $n$

```
notValidPrime( n, c ) {
  // คืน true ถ้าไม่ใช่ prime
  return n % c == 0
}
```

Prime  $\in$  co-NP

$\Theta((\log n)^2)$

ปี ค.ศ. 2006 Agrawal–Kayal–Saxena ได้พิสูจน์ว่า Prime  $\in$  P

## 3- Colorability

ตรวจ Yes : เราหาสีปมใน G ด้วย 3 สีได้ ไขหรือไม่ ?

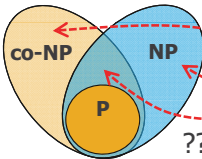
```
valid3Coloring( G[1..n][1..n], color[1..n] ) {
    ☺ ☺ // คืน true เมื่อหา 3 สีได้
}
```

3-Color  $\in$  NP

ตรวจ No : เราหาสีปมใน G ด้วยสี 3 สีไม่ได้ ไขหรือไม่ ?

```
notValid3Coloring( G[1..n][1..n], ??? ) {
    ☹ ☹ // คืน true เมื่อหา 3 สีไม่ได้
}
```

3-Color  $\notin$  co-NP



ตรวจคำตอบ Yes	ตรวจคำตอบ No
ยาก	ง่าย
ง่าย	ยาก
ง่าย	ง่าย
ยาก	ยาก

## NP : Nondeterministic Poly...

- ❖ NP : กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่ตรวจคำตอบ yes ได้ในเวลา polynomial time
- ❖ NP : กลุ่มของปัญหาตัดสินใจที่หาคำตอบ ได้ด้วย **Nondeterministic Polynomial-time algorithm**

```
ND TSP( G[1..n][1..n], k ) {
    v = a new array[1..n]
    for (i=1; i<=n; i++) v[i] = ND_Choice(1, n)
    if ( validTSP(G, k, v) ) return true
    FAIL
}
```

เดาคำตอบ

ตรวจคำตอบ



## ND\_SubsetSum

```

ND_SubsetSum( d[1..n], k ) {
  x = a new array[1..n]
  for (i=1; i<=n; i++) {
    x[i] = ND_Choice(0, 1)
  }
  if ( validSubsetSum(d, k, x) ) return true
  FAIL
}

```

เดาคำตอบ

ตรวจคำตอบ

## ND\_Coloring

```

ND_Coloring( G[1..n][1..n], k ) {
  c = a new array[1..n]
  for (i=1; i<=n; i++) {
    c[i] = ND_Choice(1, k)
  }
  if ( validColoring(g, k, c) ) return true
  FAIL
}

```

เดาคำตอบ

ตรวจคำตอบ

# ลองเขียนเอง : ND\_Knapsack

```
ND_Knapsack( w[1..n], v[1..n], W, k ) {
```

เดาคำตอบ

ตรวจคำตอบ

```
}
```

# NP-Complete

- $P \subseteq NP$
- $P \subseteq co-NP$
- $P = NP ?$
- $P = co-NP ?$
- $NP = co-NP ?$

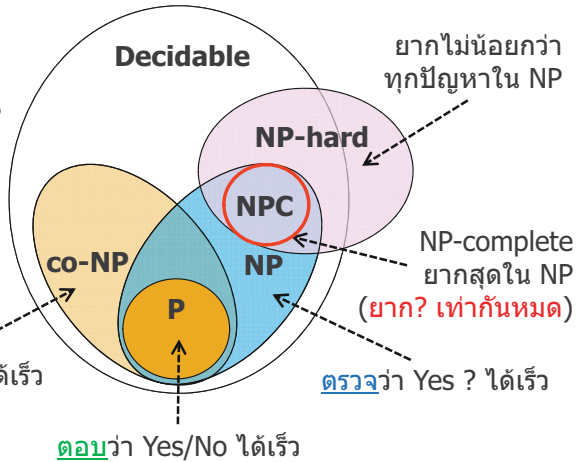
เชื่อกันว่า

- $P \neq NP$
- $P \neq co-NP$
- $NP \neq co-NP$

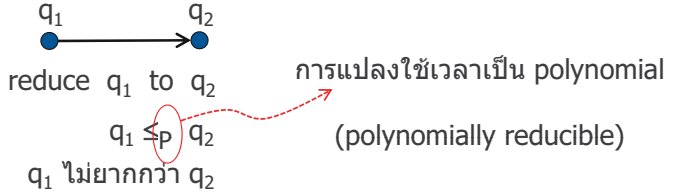
ตรวจว่า No ? ได้เร็ว

ตอบว่า Yes/No ได้เร็ว

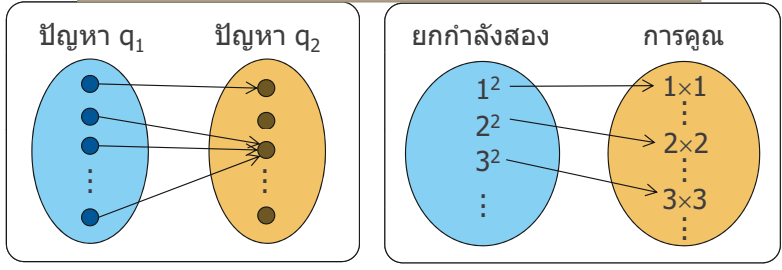
ตรวจว่า Yes ? ได้เร็ว



## Reduction : การลดรูป



แปลงทุก instance ของ  $q_1$  ไปเป็น instance ของ  $q_2$



## Reduction : SQR กับ MULT

```

Sqr ( x ) {
    a = x, b = x
    return Mult ( a, b )
}
    
```

**SQR  $\leq_p$  MULT**

```

Mult ( a, b ) {
    x = a+b, y = a-b
    return (Sqr(x) - Sqr(y)) / 4
}
    
```

**MULT  $\leq_p$  SQR**

$$a^2 + 2ab + b^2 = (a + b)^2$$

$$a^2 - 2ab + b^2 = (a - b)^2$$

$$4ab = (a + b)^2 - (a - b)^2$$

$$ab = \frac{(a + b)^2 - (a - b)^2}{4}$$

# Reduction : เพื่อใช้แก้ปัญหาใหม่

ปัญหา A ลดรูปเป็นปัญหา B ได้  
ใช้อัลกอริทึมของ B หาคำตอบให้ A ได้

instance ของปัญหา A

การแปลง instance ของ A  
เป็น instance ของ B

instance ของปัญหา B

อัลกอริทึมที่แก้ปัญหา B

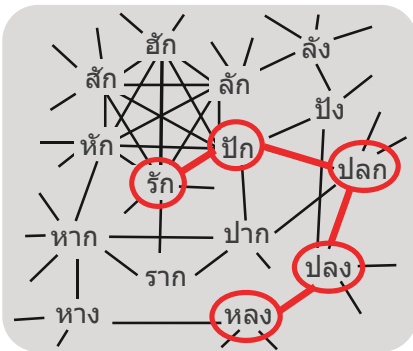
คำตอบ ของปัญหา B

การแปลงคำตอบของ B  
เป็นคำตอบของ A

คำตอบของปัญหา A

# Word Ladder $\leq_p$ Path Finding

รัก → ปัก → ปลก → ปลง → หลง



พจนานุกรม, คำต้น, คำปลาย

สร้างกราฟจากคำศัพท์ใน  
พจนานุกรม

กราฟ + ปมต้น + ปมปลาย

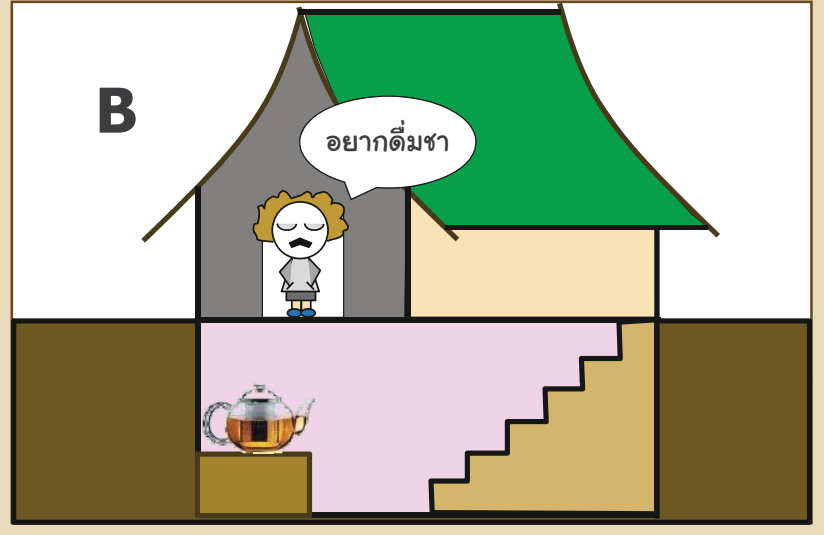
Breadth First Search

วิธีจากปมต้น ไปปมปลาย

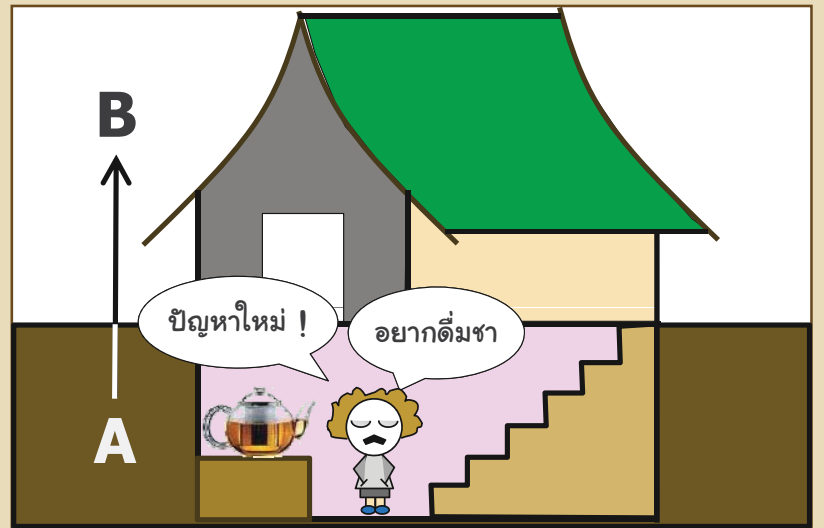
แปลงปมในวิถีเป็นลำดับ  
ของคำในแต่ละคำ

บันไดคำ

## Reduction : เพื่อใช้แก้ปัญหาใหม่



## Reduction : เพื่อใช้แก้ปัญหาใหม่



## Reduction : เพื่อเทียบความยากง่าย

ปัญหา A ลดรูปเป็นปัญหา B ได้

ถ้า B มี poly-time algo.  
A มี poly-time algo. ด้วย

ถ้า B เป็นปัญหาง่าย  
A ก็ต้องง่ายด้วย

ถ้า A เป็นปัญหายาก  
B ก็ต้องยากด้วย

$A \leq_p B$   
A ไม่ยากกว่า B

## ความยากง่ายของ SQR กับ MULT

```
Sqr( x ) {
  a = x, b = x
  return Mult( a, b )
}
```

$SQR \leq_p MULT$

SQR ไม่ยากกว่า MULT

```
Mult( a, b ) {
  x = a+b, y = a-b
  return (Sqr(x) - Sqr(y)) / 4
}
```

$MULT \leq_p SQR$

MULT ไม่ยากกว่า SQR

MULT กับ SQR  
ยาก (ง่าย) เท่ากัน

# NP-Complete

$q_1 \rightarrow q_2$   
 reduce  $q_1$  to  $q_2$   
 $q_1 \leq_p q_2$   
 $q_1$  ไม่ยากกว่า  $q_2$

**Cook-Levin Theorem**  
 ทุกปัญหาใน NP สามารถลดรูปไปเป็นปัญหา SAT ได้หมด  
 $\forall q \in NP, q \leq_p SAT$

SAT เป็นปัญหาที่ยากที่สุดใน NP

**NP-Complete :**  
 กลุ่มปัญหาใน NP ที่ยากที่สุดใน NP (ยาก? เท่ากันหมด)

มีความยากง่ายเท่ากันหมด

# Reduction : ตัวอย่าง

**NP**

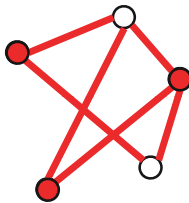
## Vertex Cover

### ❖ Optimization : input = G

- ❖ หาเซตย่อยของปม ( $V_C$ ) ในกราฟ G ที่มีขนาดเล็กที่สุด  
ที่เส้นเชื่อมทุกเส้นใน G มีจุดปลาย (อย่างน้อย 1 จุด) ใน  $V_C$

### ❖ Decision : input = G, k

- ❖ มีเซตย่อยของปม ( $V_C$ ) ในกราฟ G ขนาดอย่างมาก k หรือไม่  
ที่เส้นเชื่อมทุกเส้นใน G มีจุดปลาย (อย่างน้อย 1 จุด) ใน  $V_C$



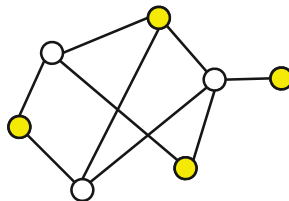
## Independent Set

### ❖ Optimization : input = G

- ❖ หาเซตย่อยของปม ( $V_I$ ) ในกราฟ G ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด  
ที่ไม่มีเส้นเชื่อมใน G ต่อกันระหว่างคู่ปมใด ๆ ใน  $V_I$

### ❖ Decision : input = G, k

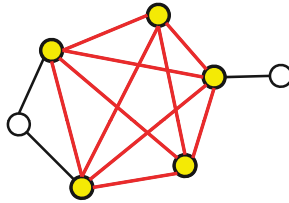
- ❖ มีเซตย่อยของปม ( $V_I$ ) ในกราฟ G ขนาดอย่างน้อย k หรือไม่  
ที่ไม่มีเส้นเชื่อมใน G ต่อกันระหว่างคู่ปมใด ๆ ใน  $V_I$





## Clique

- ❖ **Optimization : input = G**
  - ❖ หากกราฟย่อยบริบูรณ์ (complete subgraph) ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในกราฟ G
- ❖ **Decision : input = G, k**
  - ❖ G มีกราฟย่อยบริบูรณ์ขนาดอย่างน้อย k ปม ?

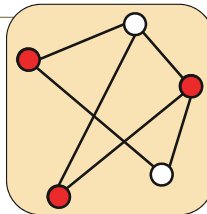


## VERTEXCOVER ∈ NP

```

validVertexCover( G=(V,E), k, vc[1..n] ) {
  if ( n > k ) return false
  covered[] = false
  for ( i=1; i<=n; i++)
    for each u ∈ Adj( vc[i] )
      covered[ (vc[i],u) ] = true
  for each edge (u,v) ∈ E
    if ( NOT covered[ (u,v) ] ) return false
  return true
}

```

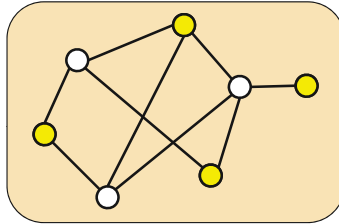
 $O(v^2)$ 


INDEPENDENTSET  $\in$  NP

```

validIndependentSet( G=(V,E), k, vi[1..n] ) {
  if (n < k) return false
  for (i=1; i<=n; i++)
    for (j=i+1; j<=n; i++)
      if ( (vi[i], vi[j])  $\in$  E ) return false
  return true
}

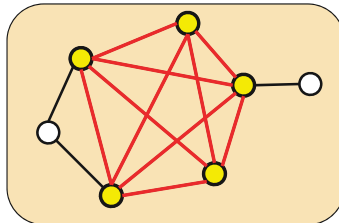
```

 $O(v^2)$ CLIQUE  $\in$  NP

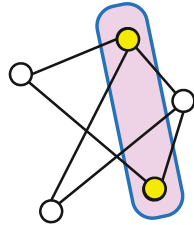
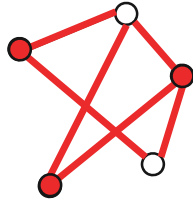
```

validClique( G=(V,E), k, c[1..n] ) {
  if (n < k) return false
  for (i=1; i<=n; i++)
    for (j=i+1; j<=n; i++)
      if ( (c[i], c[j])  $\notin$  E ) return false
  return true
}

```

 $O(v^2)$ 

## VERTEXCOVER กับ INDEPENDENTSET



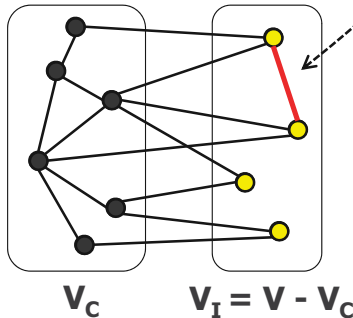
$$VC(G, 3) \longleftrightarrow IS(G, 3)$$

true  $\longleftrightarrow$  true

## VERTEXCOVER กับ INDEPENDENTSET

ถ้า  $V_C$  เป็น vertex cover ของ  $G$ ,  $V - V_C$  เป็น independent set

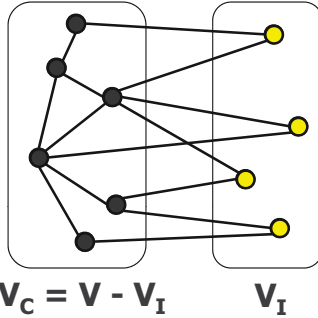
- ถ้า  $V_C$  เป็น vertex cover, ต้องไม่มีเส้นเชื่อมระหว่างปมใน  $V - V_C$
- เพราะถ้ามี จะไม่ถูก covered ใน  $V_C$



## VERTEXCOVER กับ INDEPENDENTSET

ถ้า  $V_I$  เป็น independent set ของ  $G$ ,  $V - V_I$  เป็น vertex cover

- ถ้า  $V_I$  เป็น independent set, ไม่มีเส้นเชื่อมระหว่างปมของ  $V_I$
- ดังนั้นเส้นเชื่อมทุกเส้นต้องมีปมปลายอย่างน้อยหนึ่งปมอยู่ใน  $V - V_I$



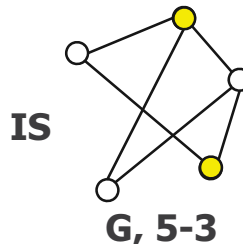
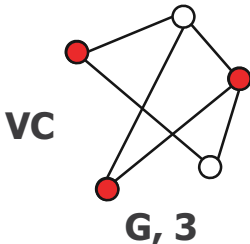
## VERTEXCOVER กับ INDEPENDENTSET

$V_C$  เป็น vertex cover ของ  $G$   
ก็ต่อเมื่อ

$V - V_C$  เป็น independent set ของ  $G$

$G$  มี vertex cover ขนาด  $k$   
ก็ต่อเมื่อ

$G$  มี independent set ขนาด  $|V| - k$



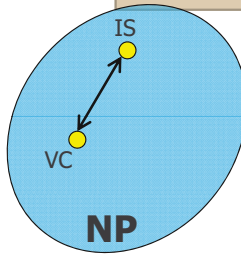
# Reductions

```
VertexCover( G=(V,E), k ) {
    return IndependentSet( G, |V| - k )
}
```

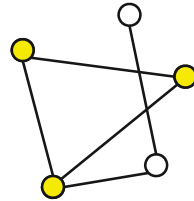
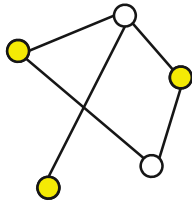
VERTEXCOVER  $\leq_p$  INDEPENDENTSET

```
IndependentSet( G=(V,E), k ) {
    return VertexCover( G, |V| - k )
}
```

INDEPENDENTSET  $\leq_p$  VERTEXCOVER



## INDEPENDENTSET กับ CLIQUE



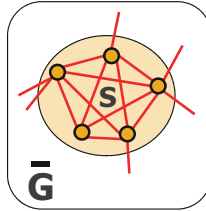
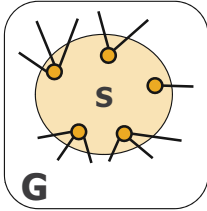
$IS(G, 3) \longleftrightarrow CLIQUE(\bar{G}, 3)$

true  $\longleftrightarrow$  true

## INDEPENDENTSET กับ CLIQUE

ถ้า  $S$  เป็น independent set ของ  $G$ ,  $S$  เป็น clique ของ  $\bar{G}$

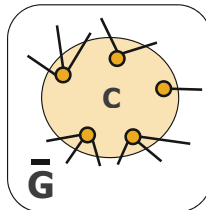
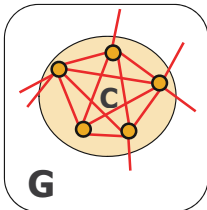
- ถ้า  $S$  เป็น independent set, ไม่มีเส้นเชื่อมระหว่างปมของ  $S$  ใน  $G$
- เมื่อสร้าง  $\bar{G}$  ต้องมีเส้นเชื่อมระหว่างทุกคู่ปมใน  $S$



## INDEPENDENTSET กับ CLIQUE

ถ้า  $C$  เป็น clique ของ  $G$ ,  $C$  เป็น independent set ของ  $\bar{G}$

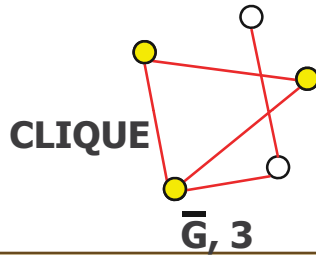
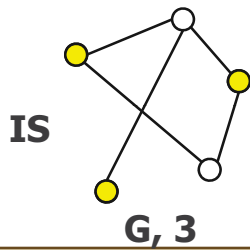
- ถ้า  $C$  เป็น clique, มีเส้นเชื่อมระหว่างทุกคู่ปมของ  $C$  ใน  $G$
- ดังนั้นต้องไม่มีเส้นเชื่อมระหว่างคู่ปมใดใน  $C$  ของ  $\bar{G}$



## INDEPENDENTSET กับ CLIQUE

S เป็น independent set ของ G  
ก็ต่อเมื่อ  
S เป็น clique ของ  $\bar{G}$

G มี independent set ขนาด k  
ก็ต่อเมื่อ  
 $\bar{G}$  มี clique ขนาด k



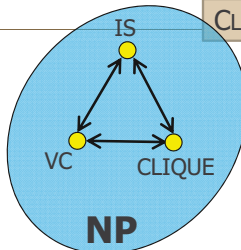
## Reductions

```
IndependentSet( G=(V,E), k ) {
  E' = เซตของเส้นเชื่อม (u,v) เมื่อไม่มี (u,v) ∈ E
  G' = (V, E')
  return Clique( G', k )
}
```

INDEPENDENTSET  $\leq_p$  CLIQUE

```
Clique( G=(V,E), k ) {
  E' = เซตของเส้นเชื่อม (u,v) เมื่อไม่มี (u,v) ∈ E
  G' = (V, E')
  return IndependentSet( G', k )
}
```

CLIQUE  $\leq_p$  INDEPENDENTSET



## ลองเขียนเอง

```
VertexCover( G=(V,E), k ) {
```

```
    return Clique(          )
}
```

VERTEXCOVER  $\leq_p$  CLIQUE

```
Clique( G=(V,E), k ) {
```

```
    return VertexCover(          )
}
```

CLIQUE  $\leq_p$  VERTEXCOVER

## NP-hard กับ NP-Complete

### ❖ X เป็นปัญหา NP-hard เมื่อ

❖ ทุกปัญหาใน NP ลดรูปไปเป็น X ได้ใน polynomial time

$$\forall q \in NP, q \leq_p X$$

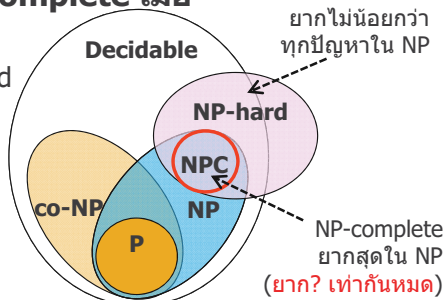
❖ NP-Hard ไม่ใช่ "ปัญหาที่อยู่ใน NP และเป็นปัญหายาก"

### ❖ X เป็นปัญหา NP-Complete เมื่อ

❖  $X \in NP$

❖ X เป็นปัญหา NP-hard

ขอตัวอย่างปัญหา  
ที่เป็น NP-hard





# Cook-Levin Theorem

## ❖ นิพจน์บูลีนในรูป

### Product of Sum Conjunctive Normal Form

SAT is NP-Complete

$$\begin{aligned} \text{❖ ด.ย. } f(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (\bar{x}_1 + \bar{x}_2)(x_1 + x_2 + x_3)(\bar{x}_3 + \bar{x}_4) \\ &= (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2) \wedge (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge (\bar{x}_3 \vee \bar{x}_4) \end{aligned}$$

❖ truth assignment คือการให้ค่าจริง/เท็จกับ  $x_i$  ของ  $f$

❖ satisfying truth assignment คือ truth assignment ที่ทำให้  $f$  เป็นจริง  $x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = 1, x_4 = 0$

## ❖ ปัญหา SAT (Satisfiability problem)

❖ input : นิพจน์บูลีน  $f$  ในรูป Conjunctive Normal Form

❖ คำถาม :  $f$  มี satisfying truth assignment หรือไม่ ?

❖ **SAT  $\in$  NP**

❖ **SAT is NP-hard**

Proc. 3<sup>rd</sup> Annual ACM Symposium Theory of Computing  
May 1971

Complexity of Theorem-Proving Procedures

Stephen A. Cook

University of Toronto



### Summary

It is shown that any recognition problem solved by a polynomial time-bounded nondeterministic Turing machine can be "reduced" to the problem of determining whether a given propositional formula is a tautology.

Here "reduced" means, roughly speaking, that the first problem can be solved deterministically in polynomial time provided an oracle is available for solving the second. From this notion of reducible, polynomial degrees of difficulty are defined, and it is shown that the problem of determining tautologyhood has the same polynomial degree as the problem of determining whether the first of two given graphs is isomorphic to a subgraph of the second. Other examples are discussed. A method of measuring the complexity of proof procedures for the predicate calculus is introduced and discussed.

Throughout this paper, a set of

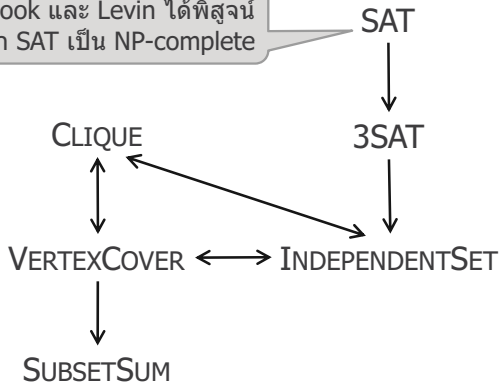
certain recursive set of strings on this alphabet, and we are interested in the problem of finding a good lower bound on its possible recognition times. We provide no such lower bound here, but theorem 1 will give evidence that {tautologies} is a difficult set to recognize, since many apparently difficult problems can be reduced to determining tautologyhood. By reduced we mean, roughly speaking, that if tautologyhood could be decided instantly (by an "oracle") then these problems could be decided in polynomial time. In order to make this notion precise, we introduce query machines, which are like Turing machines with oracles in [1].

A query machine is a multitape Turing machine with a distinguished tape called the query tape, and three distinguished states called the query state, yes state, and no state, respectively. If  $M$  is a query machine and  $T$  is a set of



## ตัวอย่าง

Cook และ Levin ได้พิสูจน์  
ว่า SAT เป็น NP-complete



## 3SAT is NP-Complete

- ❖ **3SAT คือ SAT ที่แต่ละ clause มีได้แค่ 3 literals**

$$(\bar{x}_1 + x_2 + x_3) (x_1 + \bar{x}_2 + x_4) (\bar{x}_1 + \bar{x}_4 + \bar{x}_3)$$

- ❖ **3SAT  $\in$  NP**

- ❖ **3SAT is NP-hard**

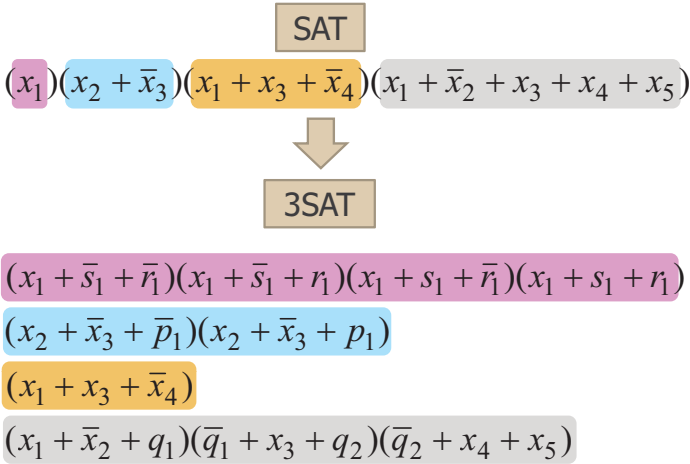
- ❖ เลือก SAT ที่รู้แล้วว่า เป็น NP-Complete
- ❖ จะแสดงให้เห็นว่า SAT  $\leq_p$  3SAT  
(SAT is polynomially reducible to 3SAT)



- ❖ **SAT  $\leq_p$  3SAT**

- ❖ วิธีแปลงนิพจน์บูลีนของ SAT เป็น นิพจน์บูลีนของ 3SAT
- ❖ ทำให้คำตอบ Yes/No ของ 3SATเป็นคำตอบของ SAT

## Reduction : SAT $\rightarrow$ 3SAT



## การแปลง clause ที่มี 2 ตัวแปร

$$(x_2 + \bar{x}_3) = (x_2 + \bar{x}_3 + \bar{p}_1)(x_2 + \bar{x}_3 + p_1)$$

$$\begin{aligned} & ((x_2 + \bar{x}_3) + \bar{p}_1)((x_2 + \bar{x}_3) + p_1) \\ &= (x_2 + \bar{x}_3) + (x_2 + \bar{x}_3)p_1 + (x_2 + \bar{x}_3)\bar{p}_1 + (\bar{p}_1 p_1) \\ &= (x_2 + \bar{x}_3) + (x_2 + \bar{x}_3)(p_1 + \bar{p}_1) + (\bar{p}_1 p_1) \\ &= (x_2 + \bar{x}_3) + (x_2 + \bar{x}_3)(1) + 0 \\ &= (x_2 + \bar{x}_3) \end{aligned}$$

จำนวน clauses เพิ่มขึ้น 1, ตัวแปรเพิ่มอีก 1

## การแปลง clause ที่มี 1 ตัวแปร

$$(x_1) = (x_1 + (\bar{s}_1 + \bar{r}_1))(x_1 + (\bar{s}_1 + r_1)) \\ (x_1 + (s_1 + \bar{r}_1))(x_1 + (s_1 + r_1))$$

$$(x_1 + (\bar{s}_1 + \bar{r}_1))(x_1 + (\bar{s}_1 + r_1))(x_1 + (s_1 + \bar{r}_1))(x_1 + (s_1 + r_1)) \\ = x_1 + x_1((\bar{s}_1 + \bar{r}_1) + (\bar{s}_1 + r_1) + (s_1 + \bar{r}_1) + (s_1 + r_1)) + \\ (\bar{s}_1 + \bar{r}_1)(\bar{s}_1 + r_1)(s_1 + \bar{r}_1)(s_1 + r_1) \\ = x_1 + x_1(1) + 0 \\ = x_1$$

จำนวน clauses เพิ่มขึ้น 3, ตัวแปรเพิ่มอีก 2

## การแปลง clause ที่มี > 3 ตัวแปร

$$(x_1 + \bar{x}_2 + x_3 + \bar{x}_4 + x_5 + \bar{x}_6 + \bar{x}_7) \\ = (x_1 + \bar{x}_2 + q_1) \\ (\bar{q}_1 + x_3 + q_2) \\ (\bar{q}_2 + \bar{x}_4 + q_3) \\ (\bar{q}_3 + x_5 + q_4) \\ (\bar{q}_4 + \bar{x}_6 + \bar{x}_7)$$

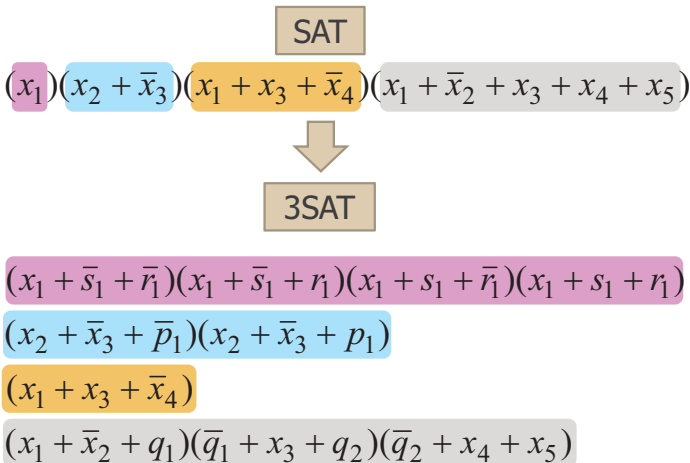
ตัวแปรที่มี k ตัว → จำนวน clauses เพิ่มขึ้น k-2, ตัวแปรเพิ่มอีก k-3

## การแปลง clause ที่มี $> 3$ ตัวแปร

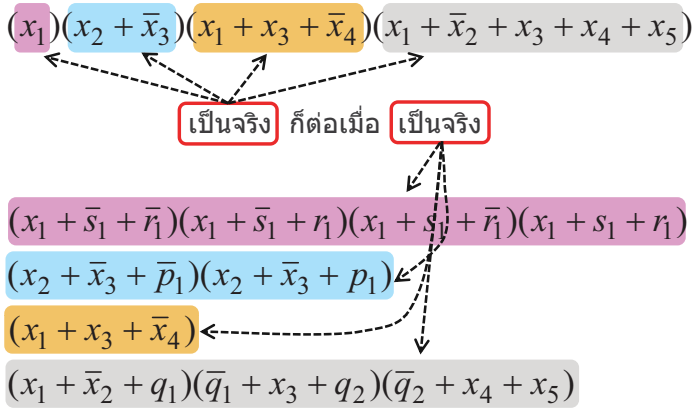
$$\begin{aligned}
 &(x_1 + \bar{x}_2 + x_3 + \bar{x}_4 + x_5 + \bar{x}_6 + \bar{x}_7) \\
 &= (x_1 + \bar{x}_2 + q_1) \\
 &\quad (\bar{q}_1 + x_3 + q_2) \\
 &\quad (\bar{q}_2 + \bar{x}_4 + q_3) \\
 &\quad (\bar{q}_3 + x_5 + q_4) \\
 &\quad (\bar{q}_4 + \bar{x}_6 + \bar{x}_7)
 \end{aligned}$$

instance ของ SAT แปลงไปเป็น instance ของ 3SAT  
ที่มีขนาดเป็น polynomial ของขนาดของ SAT

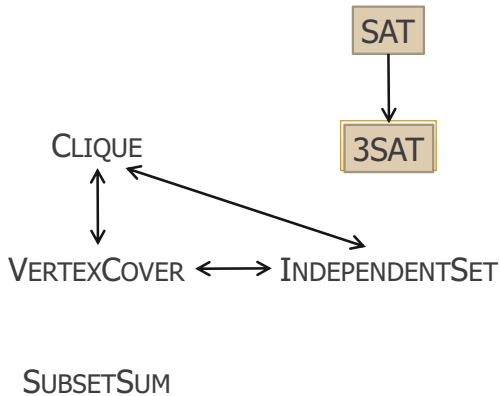
## Reduction : SAT $\rightarrow$ 3SAT



## Reduction : SAT $\rightarrow$ 3SAT



## ตัวอย่าง



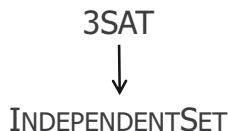
## ลองคิดดู : ยากไหม ?

- ❖ **1SAT** :  $(x_1)(x_2)(\bar{x}_3)(\bar{x}_4)(x_5)(\bar{x}_6)$
- ❖ **2SAT** :  $(x_1 + \bar{x}_2)(x_1 + \bar{x}_3)(x_2 + \bar{x}_4)(x_3 + x_4)$
- ❖ หา **satisfying truth assignment** ของนิพจน์บูลีนในรูป **sum of product** หรือ **disjunctive normal form**

$$(x_1\bar{x}_2x_4) + (x_1x_2\bar{x}_3) + (x_2\bar{x}_4) + (x_1\bar{x}_2x_3x_4)$$

## INDEPENDENTSET is NP-Complete

- ❖ **INDEPENDENTSET**  $\in$  **NP**
- ❖ **INDEPENDENTSET is NP-hard**
  - ❖ เลือก 3SAT ที่รู้แล้วว่า เป็น NP-Complete
  - ❖ จะแสดงให้เห็นว่า  $3SAT \leq_p$  INDEPENDENTSET
- ❖  **$3SAT \leq_p$  INDEPENDENTSET**
  - ❖ วิธีแปลงนิพจน์บูลีนของ 3SAT เป็นกราฟ G และจำนวน k
  - ❖ คำตอบ Yes/No ของ INDEPENDENTSET เป็นคำตอบของ 3SAT





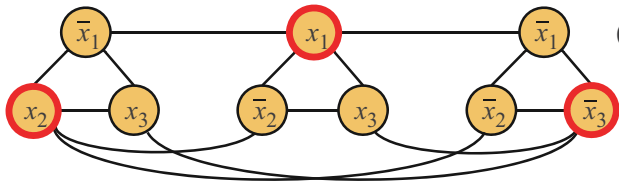
# 3SAT $\leq_p$ INDEPENDENTSET

ต้องเป็น true ทุก clause

$$(\bar{x}_1 + x_2 + x_3) (x_1 + \bar{x}_2 + x_3) (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3)$$

$$x_2 = 1, x_1 = 1, x_3 = 0$$

สร้างกราฟ G มี 1 สามเหลี่ยมแทน 1 clause  
มีเส้นเชื่อมข้ามสามเหลี่ยมระหว่างปมที่ "ขัด" กัน  
หา INDEPENDENTSET(G, k) k คือจำนวน clauses



G, 3

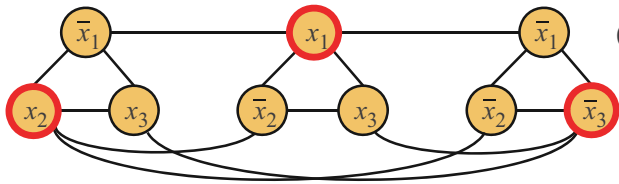
# 3SAT $\leq_p$ INDEPENDENTSET

ต้องเป็น true ทุก clause

$$(\bar{x}_1 + x_2 + x_3) (x_1 + \bar{x}_2 + x_3) (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3)$$

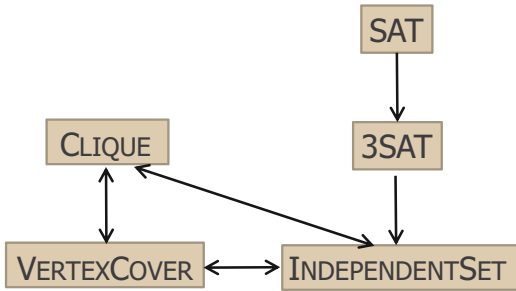
$$x_2 = 1, x_1 = 1, x_3 = 0$$

INDEPENDENTSET(G, k) คำนวณจริง  $\rightarrow$  3SAT(f) เป็นจริง  
3SAT(f) เป็นจริงได้  $\rightarrow$  INDEPENDENTSET(G, k) ต้องคำนวณจริง



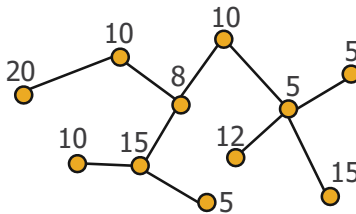
G, 3

# ตัวอย่าง



# ลองคิดดู : ยากไหม ?

ถ้าต้องการ Independent Set  
ขนาดใหญ่สุดของต้นไม้

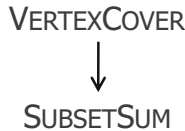


ถ้าแต่ละปมมีน้ำหนัก และต้องการ Independent Set  
ของต้นไม้ที่มีน้ำหนักปมรวมในเซตมากที่สุด

มี Independent Set ของต้นไม้ที่มี  
น้ำหนักปมรวมในเซตอย่างน้อย  $k$  หรือไม่

# SUBSETSUM is NP-Complete

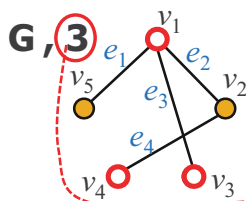
- ❖ **SUBSETSUM**  $\in$  NP
- ❖ **SUBSETSUM is NP-hard**
  - ❖ เลือก VERTEXCOVER ที่รู้แล้วว่า เป็น NP-Complete
  - ❖ จะแสดงให้เห็นว่า VERTEXCOVER  $\leq_p$  SUBSETSUM
- ❖ **VERTEXCOVER  $\leq_p$  SUBSETSUM**
  - ❖ วิธีแปลง  $G, k$  ของ VERTEXCOVER เป็น  $D, m$  ของ SUBSETSUM
  - ❖ คำตอบ Yes/No ของ SUBSETSUM เป็นของ VERTEXCOVER ด้วย



# VERTEXCOVER $\leq_p$ SUBSETSUM

	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
$v_1$	1	1	1	0
$v_2$	0	1	0	1
$v_3$	0	0	1	0
$v_4$	0	0	0	1
$v_5$	1	0	0	0

incidence matrix



$G, k$

3

	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
$d_1 = 1$	1	1	1	0
$d_2 = 1$	0	1	0	1
$d_3 = 1$	0	0	1	0
$d_4 = 1$	0	0	0	1
$d_5 = 1$	1	0	0	0
$d_6 = 0$	0	0	0	1
$d_7 = 0$	0	0	1	0
$d_8 = 0$	0	1	0	0
$d_9 = 0$	1	0	0	0

$D$
11110
10101
10010
10001
11000
1
10
100
1000

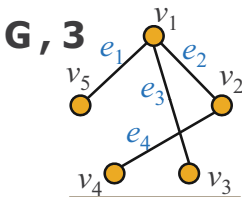
$m = 32222$

เลข 2 ทุกหลัก

# VERTEXCOVER $\leq_P$ SUBSETSUM

	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
$v_1$	1	1	1	0
$v_2$	0	1	0	1
$v_3$	0	0	1	0
$v_4$	0	0	0	1
$v_5$	1	0	0	0

incidence matrix



$G=(V, E), k$

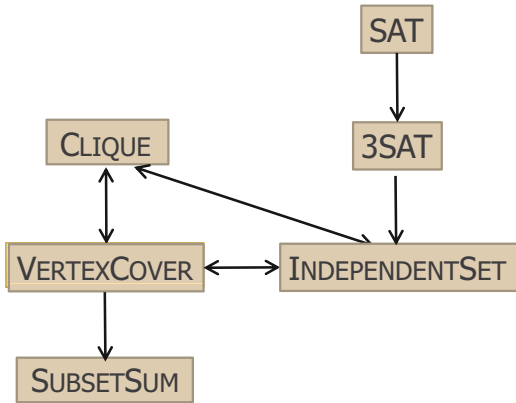
	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
$d_1 = 1$	1	1	1	0
$d_2 = 1$	0	1	0	1
$d_3 = 1$	0	0	1	0
$d_4 = 1$	0	0	0	1
$d_5 = 1$	1	0	0	0
$d_6 = 0$	0	0	0	1
$d_7 = 0$	0	0	1	0
$d_8 = 0$	0	0	1	0
$d_9 = 0$	1	0	0	0

$D$
11110
10101
10010
10001
11000
<input type="text" value="1"/>
10
<input type="text" value="100"/>
<input type="text" value="1000"/>

$n = |V| + |E|$   
 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$   
 $m = (k22\dots2)_{10}$

$m =$

## ตัวอย่าง

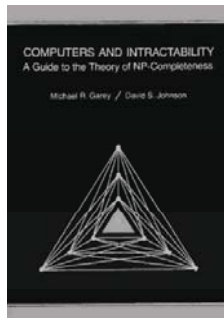


## ลองทำดู


$SAT \leq_p CLIQUE$

## ปัญหา NP-Complete มีมาก


- ❖ หนังสือฉบับตำนานของ **Garey & Johnson, 1979**
- ❖ รวบรวมหลายร้อยปัญหาที่เป็น **NP-complete**
- ❖ นำเสนอแนวทางการลดรูปและเอกสารอ้างอิง



## $P = NP$ ?

- ❖ ถ้ามีใครสักคน พบ **polynomial-time algo.** สำหรับปัญหาหนึ่งที่เป็น **NP-complete**
- ❖ เราจะได้ **polynomial-time algo.** สำหรับทุกปัญหาที่เป็น **NP-complete**
- ❖ นั่นคือ ทุกปัญหาใน **NP** หาคำตอบได้ใน **polynomial time** (เป็น tractable problem)
- ❖ จะสรุปได้ว่า  **$P = NP$**
- ❖ แต่ จนถึงปัจจุบัน ก็ยังไม่มีใครทำได้สำเร็จ 

## $P \neq NP$ ?

- ❖ ถ้ามีใครสักคน พิสูจน์ได้ว่า ต้องใช้เวลาอย่างน้อยเป็น **exponential** ในการหาคำตอบของ ปัญหาหนึ่งในกลุ่มปัญหา **NP-complete**
- ❖ จะสรุปได้ว่า ปัญหา **NP-complete** ทุกปัญหา เป็น **intractable problem**
- ❖ นั่นคือ  **$P \neq NP$**
- ❖ แต่ จนถึงปัจจุบัน ก็ยังไม่มีใครทำได้สำเร็จ 

## ลองคิดดู

- ❖ การพิสูจน์ว่า  $P = NP$  กับ การพิสูจน์ว่า  $P \neq NP$  แบบใดสะท้อนวงการ ?
- ❖ จริงหรือไม่
  - ❖ ปัญหา  $P = NP$  ? เป็น decision problem
  - ❖ ปัญหา  $P = NP$  ? เป็นปัญหาในกลุ่ม NP
- ❖ ถ้าปัญหา  $P = NP$  ? เป็นปัญหา NP-complete หมายความว่าอย่างไร ?

Millennium Prize Problems - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

http://www.claymath.org/millennium/

Millennium Prize Problems

**Clay Mathematics Institute**  
Dedicated to increasing and disseminating mathematical knowledge

HOME ABOUT CMI PROGRAMS NEWS & EVENTS AWARDS SCHOLARS PUBLICATIONS

**Millennium Problems**

In order to celebrate mathematics in the new millennium, The Clay Mathematics Institute of Cambridge, Massachusetts (CMI) has named seven *Prize Problems*. The Scientific Advisory Board of CMI selected these problems, focusing on important classic questions that have resisted solution over the years. The Board of Directors of CMI designated a \$7 million prize fund for the solution to these problems, with \$1 million allocated to each. During the *Millennium Meeting* held on May 24, 2000 at the Collège de France, Timothy Gowers presented a lecture entitled *The Importance of Mathematics*, aimed for the general public, while John Tate and Michael Atiyah spoke on the problems. The CMI invited specialists to formulate each problem.

One hundred years earlier, on August 8, 1900, David Hilbert delivered his famous lecture about open mathematical problems at the second International Congress of Mathematicians in Paris. This influenced our decision to announce the millennium problems as the central theme of a Paris meeting.

The [rules](#) for the award of the prize have the endorsement of the CMI Scientific Advisory Board and the approval of the Directors. The members of these boards have the responsibility to preserve the nature, the integrity, and the spirit of this prize.

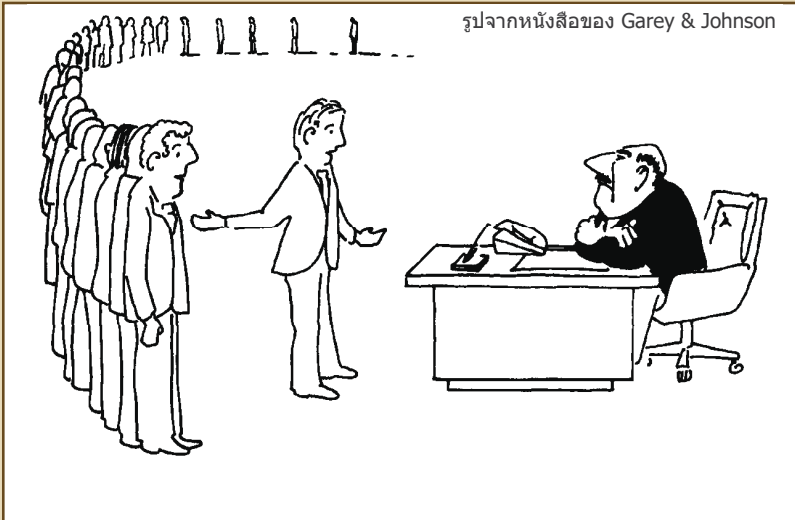
- [Birch and Swinnerton-Dyer Conjecture](#)
- [Hodge Conjecture](#)
- [Navier-Stokes Equations](#)
- [P vs NP](#)
- [Poincaré Conjecture](#)
- [Riemann Hypothesis](#)
- [Yang-Mills Theory](#)
- [Rules](#)
- [Millennium Meeting Videos](#)

# อัลกอริทึมสำหรับ ปัญหา NP-Hard

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## ปัญหา NP-complete นั้นยาก

รูปจากหนังสือของ Garey & Johnson



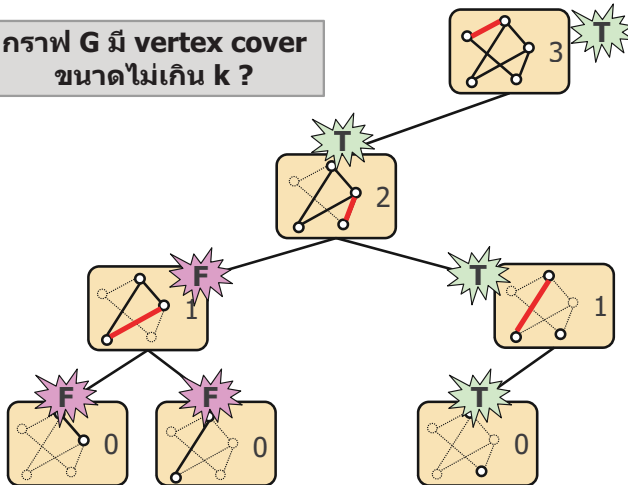


## พิจารณาตัวปัญหาให้รอบคอบ

- ❖ ปัญหาของเราเป็นกรณีเฉพาะหรือไม่
  - ❖ SAT ยาก แต่ 1SAT, 2SAT ง่าย
  - ❖ Independent Set ของกราฟยาก แต่ของต้นไม้ง่าย
  - ❖ 3-Color ยาก แต่ 2-Color ง่าย
  - ❖ ...
- ❖ บาง input ของปัญหาของเรามีขนาดเล็ก หรือไม่

## VertexCover( $G, k$ ) เมื่อ $k$ มีค่าน้อย

กราฟ  $G$  มี vertex cover  
ขนาดไม่เกิน  $k$  ?



## Vertex Cover

```

hasVertexCover( G=(V,E), k ) {
  if (|E| == 0) return true
  if ( k == 0 ) return false
  choose an edge (u,v) ∈ E
  if ( hasVertexCover( G-{u}, k-1 ) OR
      hasVertexCover( G-{v}, k-1 ) )
    return true
  else
    return false
}
    
```

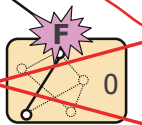
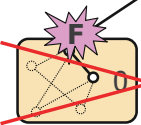
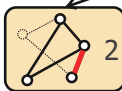
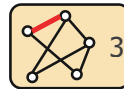
$O(2^k(n+m))$

ถ้ารู้ว่า  $k$  มีค่าน้อย, ถึงแม้กราฟใหญ่ ก็ยังเร็ว  
หรือถ้า  $k$  เป็นค่าคงตัว เราได้ polynomial-time algorithm

FPT : Fixed Parameter Tractable

## ปรับปรุง

กราฟ  $G$  มี vertex cover  
ขนาดไม่เกิน  $k$  ?



ข้อสังเกต :

ถ้า  $G$  มี  $n$  ปม, แต่ละปมมี degree ไม่เกิน  $n-1$

ถ้า  $G$  มี vertex cover ขนาดไม่เกิน  $k$  ปม

$G$  ต้องมีเส้นเชื่อมไม่เกิน  $k(n-1)$  เส้น

$$3 \text{ เส้น} > 1 \times (3-1) = 2 \text{ เส้น}$$

## อัลกอริทึมสำหรับ Vertex Cover

```

hasVertexCover( G=(V,E), k ) {
  if (|E| == 0 ) return true
  if (|E| > k(|V|-1)) return false
  choose an edge (u,v) ∈ E
  if ( hasVertexCover( G-{u}, k-1 ) OR
      hasVertexCover( G-{v}, k-1 ) )
    return true
  else
    return false
}

```

ลองปรับปรุงให้เป็น

อัลกอริทึมเพื่อหา vertex cover ขนาด k ของกราฟ G

## อัลกอริทึมสำหรับปัญหา NP-hard

### ❖ Backtracking, branch and bound

- ❖ ได้คำตอบที่ "ดีสุด" แต่อาจช้า
- ❖ อย่าลืมน่า ไม่จำเป็นว่าทุก instance ของปัญหา NP-hard ต้องใช้เวลานานในการหาคำตอบ

### ❖ Local search

- ❖ ได้คำตอบที่ "ดีมาก" ในทางปฏิบัติ แต่ไม่เสมอไป

### ❖ Approximation

- ❖ ได้คำตอบที่ "ดี" (ประกันคุณภาพ) และเร็วด้วย

## NP-Complete ≠ ยากทุก instances

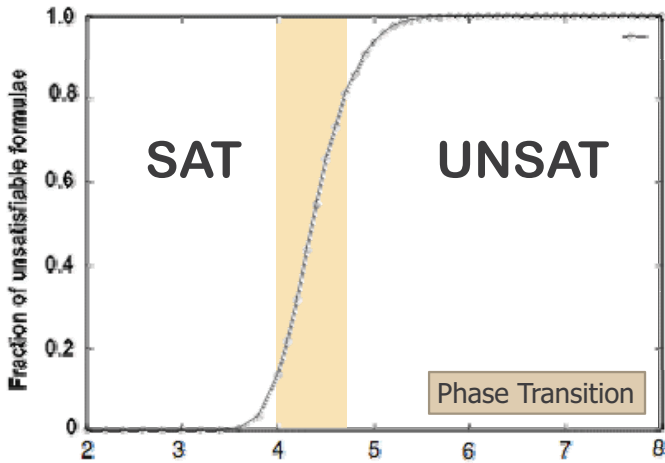
$$(x_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 + x_5 + \bar{x}_7)(x_2 + x_3 + x_4 + \bar{x}_6 + \bar{x}_7)$$

#clauses น้อย #ตัวแปรมาก น่าจะ satisfy ได้ง่าย

$$(x_1 + \bar{x}_2)(x_1 + x_2 + x_3)(\bar{x}_1 + x_2 + x_3)(\bar{x}_2 + \bar{x}_3)(x_3 + \bar{x}_2)(x_1 + \bar{x}_3)$$

#clauses มาก #ตัวแปรน้อย น่าจะ satisfy ได้ยาก

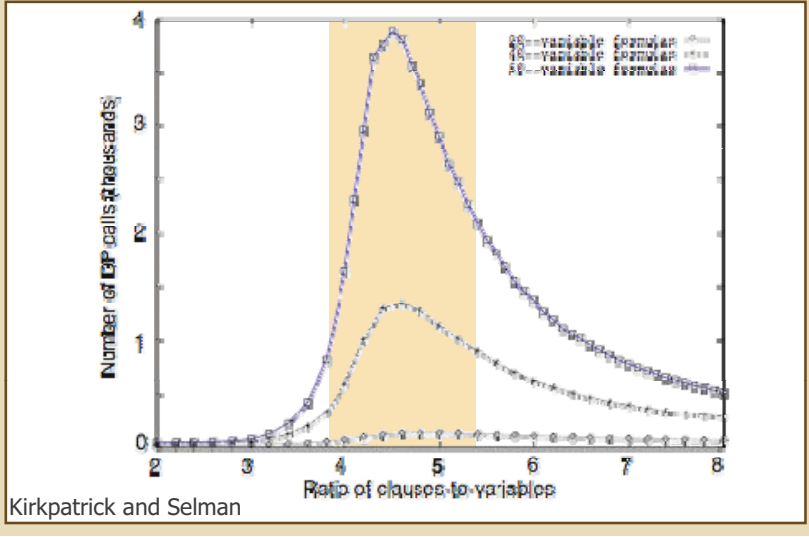
## NP-Complete ≠ ยากทุก instances



Kirkpatrick and Selman

Ratio of clauses-to-variables

# NP-Complete $\neq$ ยากทุก instances





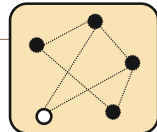
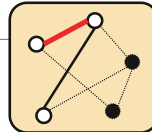
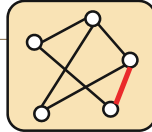
## Vertex Cover

- ❖ หา vertex cover ที่มีขนาดเล็กที่สุดเป็น NP-hard
- ❖ approx. : หาที่มีขนาดไม่เกิน 2 เท่าของที่เล็กที่สุด

```

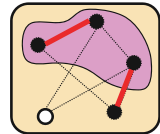
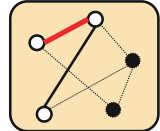
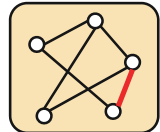
approxVertexCover( G=(V,E) ) {
  Vc = {}
  G* = G
  while ( กราฟ G* ยังมีเส้นเชื่อม ) {
    (u,v) = เลือกเส้นเชื่อมของ G* มาหนึ่งเส้น
    Vc = Vc ∪ {u, v}
    G* = G* - {u, v} // ลบเส้นเชื่อมที่ติดกับ u, v ออกด้วย
  }
  return Vc
}

```



## Vertex Cover : 2-approx.

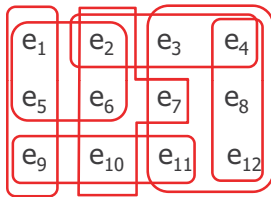
- ❖ ให้  $E^*$  คือเซตของเส้นเชื่อมที่ถูกเลือก
  - ❖ เส้นเชื่อมใน  $E^*$  ต้องไม่มีจุดปลายร่วมกัน
  - ❖ Vc เก็บจุดปลายของเส้นเชื่อมใน  $E^*$
  - ❖  $|Vc| = 2|E^*|$
- ❖ ให้  $V_{OPT}$  คือ optimal vertex cover
  - ❖ เส้นเชื่อม  $e \in E^*$  ต้องมีจุดปลายใน  $V_{OPT}$
  - ❖ ถ้า  $v_1 \in V_{OPT}$  เป็นจุดปลายของ  $e_1 \in E^*$   $v_1$  ต้องไม่เป็นจุดปลายของเส้นอื่นใน  $E^*$
  - ❖ ดังนั้น  $|E^*| \leq |V_{OPT}|$
- ❖ สรุปได้ว่า  $|Vc| \leq 2|V_{OPT}|$



2-approx.

## Set Cover

- ❖ **Input** : เซต  $U$ , และ  $s_1, s_2, \dots, s_m \subseteq U$
- ❖ **Output** : กลุ่มที่มีขนาดเล็กที่สุดของเซตย่อย  $s_k$  ที่มีสมาชิกรวมเป็น  $U$
- ❖ หา set cover ขนาดเล็กที่สุดเป็น NP-hard
- ❖ approx. : หาที่มีขนาดไม่เกิน  $\ln n$  เท่าของ OPT  $n$  คือจำนวนสมาชิกของ  $U$



VERTEXCOVER  $\leq_p$  SETCOVER

## Approx. Set Cover

```

approxSetCover( U, S[1..m] ) {
  CApprox = {}
  while ( U ≠ ∅ ) {
    sMAX = เลือกเซตใน S ที่มีสมาชิกปรากฏใน U มากสุด
    CApprox = CApprox ∪ {sMAX}
    U = U - sMAX
  }
  return CAPPROX
}

```

- ❖ ให้  $C_{opt}$  แทน set cover ขนาดเล็กที่สุด
- ❖ ให้  $C_{Approx}$  แทน set cover จาก approx. algo.
- ❖ ให้  $n$  คือจำนวนสมาชิกของ  $U$
- ❖ จะแสดงให้เห็นว่า  $|C_{Approx}| / |C_{opt}| = \ln n$



## Approx. Set Cover : Analysis

❖ **หลังรอบที่ k :**

- ❖ ให้  $n_k$  คือจำนวนสมาชิกที่เหลือใน U ที่ยังไม่ถูก covered
- ❖ สมาชิกที่เหลือนี้ต้องถูก covered ด้วย  $C_{OPT}$  ได้
- ❖ เซตย่อยที่ cover สมาชิกที่เหลือของ U ได้มากที่สุด ต้องมีขนาดอย่างน้อย  $n_k / |C_{OPT}|$  ตัว

❖ **หลังรอบที่ k+1 :**  $n_{k+1} \leq n_k \left(1 - \frac{1}{|C_{OPT}|}\right)$

$$n_k \leq n_{k-1} \left(1 - \frac{1}{|C_{OPT}|}\right) \leq n_{k-2} \left(1 - \frac{1}{|C_{OPT}|}\right)^2 = \dots$$

$$\frac{|C_{Approx}|}{|C_{OPT}|} = \ln n$$

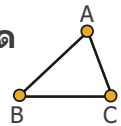
$$\leq n_0 \left(1 - \frac{1}{|C_{OPT}|}\right)^k \leq n_0 \left(e^{-1/|C_{OPT}|}\right)^k = n e^{-k/|C_{OPT}|} < 1, \text{ เมื่อ } \frac{k}{|C_{OPT}|} = \ln n$$

$$(1 - x) \leq e^{-x}$$

$$|C_{Approx}| = \text{จำนวนรอบที่ทำงาน}$$

## Metric TSP

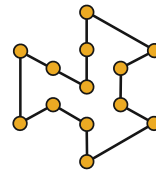
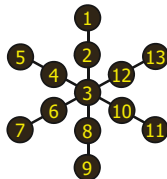
- ❖ หา tour ที่สั้นสุดเป็น NP-hard
- ❖ approx : หาที่ยาวไม่เกิน 2 เท่าของที่สั้นสุด
- ❖ ใช้กับระยะทางแบบ  $d_{AB} + d_{BC} \geq d_{AC}$



```

approxEuclideanTSP ( G=(V,E) ) {
    TMST = MinimumSpanningTree ( G )
    tour = PreorderTraversal ( TMST )
    return tour
}
    
```

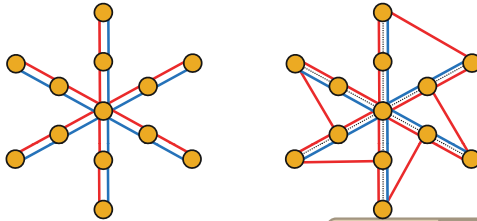
$$L_{Approx} \leq 2 L_{Opt}$$



## 2-Approx. TSP



$$L_{Opt} > L \geq L_{MST}$$

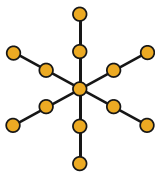


$$2L_{Opt} > 2L_{MST}$$

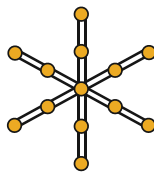
$\geq$

$$L_{Approx} < 2L_{Opt}$$

## 1.5-Approx. TSP



หา MST



สร้าง Euler graph



$$L_{Approx} < 2L_{Opt}$$



หา tour ไม่ผ่านปมซ้ำ โดยใช้ทางลัด

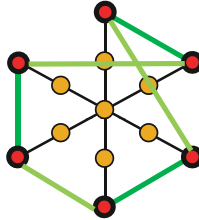


$$L_{Approx} < 1.5L_{Opt}$$

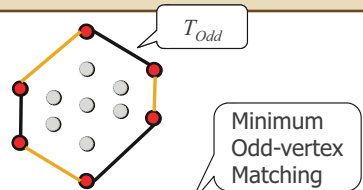
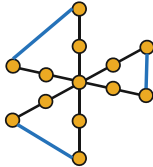
ทุกปมใน Euler graph ต้องมี degree เป็นจำนวนคู่

## สร้าง Euler Graph ที่ดีกว่า

- ❖ ให้  $V_{\text{Odd}}$  คือเซตของปมใน MST ที่มีดีกรีเป็นจำนวนคี่
  - ❖ หมายถึง :  $|V_{\text{Odd}}|$  เป็นจำนวนคู่
- ❖ หาเส้นเชื่อมที่จับทุกคู่ปมใน  $V_{\text{Odd}}$  ที่มีความยาวเส้นเชื่อมรวมน้อยสุด (minimal length matching)
- ❖ เพิ่มเส้นเชื่อมจับคู่  $V_{\text{Odd}}$  ใน MST ได้กราฟออยเลอร์



## 1.5-approx.



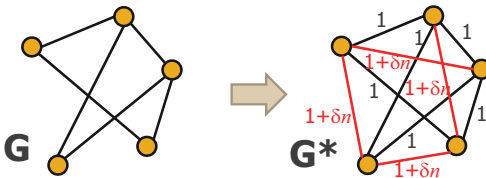
- กราฟ Euler มีเส้นเชื่อมจาก  $E_{MST}$  (ยาว  $L_{MST}$ ) และ  $E_{MOM}$  (ยาว  $L_{MOM}$ )
- ให้  $T_{\text{Odd}}$  คือ tour สั้นสุด (ยาว  $L_{\text{Odd}}$ ) ที่ผ่านเฉพาะปมใน  $V_{\text{Odd}}$ 
  - จะได้ว่า  $L_{\text{Odd}} \leq L_{\text{Opt}}$
- สามารถแบ่ง  $T_{\text{Odd}}$  ออกเป็นเส้นเชื่อมเส้นเว้นเส้นได้ 2 ชุด
  - แต่ละชุดเป็นการจับคู่ปมใน  $V_{\text{Odd}}$  ( $L_{MOM} \leq L_{\text{สั้น}}, L_{\text{ตา}}$ )
  - ชุดเล็กมีความยาวรวม  $\leq 0.5L_{\text{Odd}}$ , ดังนั้น  $L_{MOM} \leq 0.5L_{\text{Odd}}$
  - สรุปได้ว่า  $L_{MOM} \leq 0.5L_{\text{Opt}}$
- กราฟ Euler มีความยาวเส้นเชื่อมรวม  $L_{MST} + L_{MOM} \leq 1.5L_{\text{Opt}}$

## General TSP

- ❖ มี polynomial-time approx. algo. เพื่อแก้ปัญหา TSP ของกราฟใด ๆ หรือไม่ ?
- ❖ ถ้ามี จะแสดงให้เห็นว่า HAMILTONIANCYCLE  $\in$  P
  - ❖ หมายความว่า สามารถพิสูจน์ได้ว่า  $P = NP$  !!!
  - ❖ แต่ยังไม่จริง แสดงว่า ยังไม่มีใครหา polynomial-time approx. algo. สำหรับปัญหา TSP ของ  $G$  ทั่วไป

## ใช้ $\delta$ -approx TSP แก้ปัญหา HAMC

- ❖ ปัญหา :  $G=(V,E)$  มี Hamiltonian Cycle หรือไม่
- ❖ แปลง  $G$  ของ HAMILTONIANCYCLE เป็น  $G^*$  ของ TSP
  - ❖ สร้างกราฟ  $G^*=(V, E+E^*)$  เป็น complete graph
  - ❖ เส้นเชื่อมใน  $E$  ยาว 1, ใน  $E^*$  ยาว  $1+\delta n$  ( $n = |V|$ ,  $\delta > 1$ )
  - ❖ ถ้า  $G$  มีวงแฮมิลตัน,  $L_{Opt}$  ของ  $G^*$  ยาว  $n$
  - ❖ ถ้า  $G$  ไม่มีวงแฮมิลตัน,  $L_{Opt}$  ของ  $G^*$  ยาวเกิน  $\delta n$

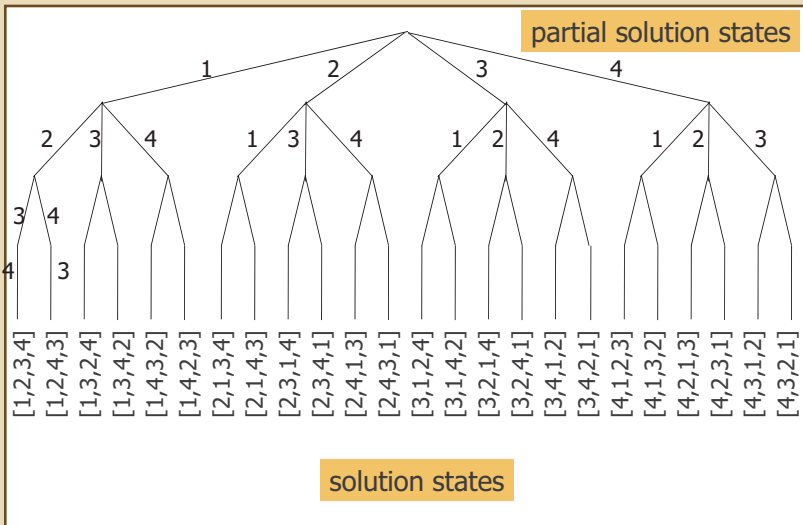


## ใช้ $\delta$ -approx TSP แก้ปัญหา HAMC

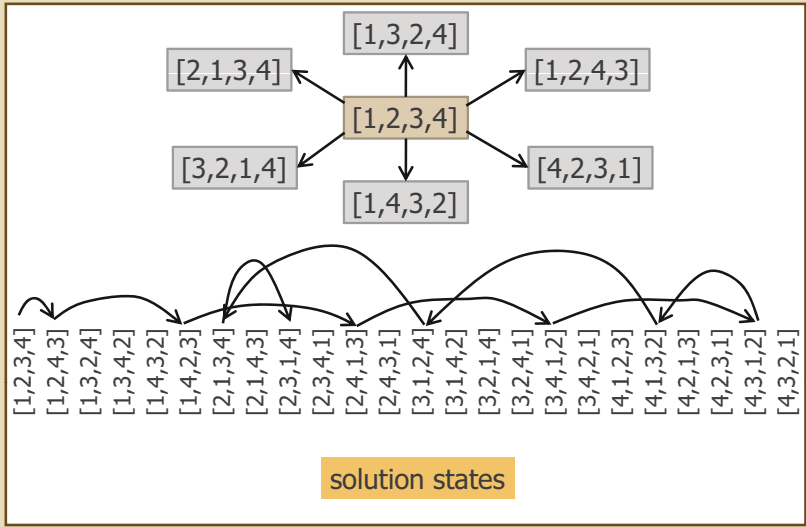
- ❖ ปัญหา :  $G=(V,E)$  มี Hamiltonian Cycle หรือไม่
- ❖ แปลง  $G$  ของ HAMILTONCYCLE เป็น  $G^*$  ของ TSP
  - ❖ สร้างกราฟ  $G^*=(V, E+E^*)$  เป็น complete graph
  - ❖ เส้นเชื่อมใน  $E$  ยาว 1, ใน  $E^*$  ยาว  $1+\delta n$  ( $n = |V|, \delta > 1$ )
  - ❖ ถ้า  $G$  มีวงแฮมิลตัน,  $L_{Opt}$  ของ  $G^*$  ยาว  $n$
  - ❖ ถ้า  $G$  ไม่มีวงแฮมิลตัน,  $L_{Opt}$  ของ  $G^*$  ยาวเกิน  $\delta n$
- ❖ ถ้ามี approxTSP ที่เป็น  $\delta$ -approx
  - ❖ approxTSP( $G^*$ ), ต้องได้ tour ยาว  $\leq \delta \times$ ความยาวทางสั้นสุด
  - ❖ ถ้า  $G$  มีวงแฮมิลตัน, approxTSP( $G^*$ ) ให้ tour ยาว  $n$ 
    - ❖ เพราะถ้าไปผ่านเส้นที่ยาว  $1+\delta n$  จะได้ tour ยาวเกิน  $\delta n$
  - ❖ ถ้า  $G$  ไม่มีวงแฮมิลตัน, approxTSP( $G^*$ ) ให้ tour ยาวเกิน  $\delta n$
  - ❖ ถ้า approxTSP ใช้เวลา polynomial time, HAMC  $\in P$

# Local Search

## การค้นแบบค่อย ๆ สร้างผลเฉลย

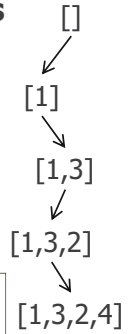


## การค้นหาเฉพาะที่ (Local Search)



## Local Search

- ❖ ใช้กับ NP-hard optimization problems
- ❖ ไม่ได้หาคำตอบที่ดีที่สุด ขอแค่คำตอบ "ดี ๆ"
- ❖ ไม่สนใจ "เส้นทาง" การสร้างคำตอบ
- ❖ ค้นในปริภูมิผลเฉลย (solution space)
  - ❖ ทุกสถานะเป็นสถานะผลเฉลย
  - ❖ หยุดค้นเมื่อใด ก็ได้คำตอบ



```

localSearch( p ) {
    s = initialSolution(p)
    while not terminate(p, s) {
        s* = select( neighbor(p, s) )
        if ( accept(p, s, s*) ) s = s*
    }
}
    
```

## Neighboring Solutions

- ❖ ปรับผลเฉลยหนึ่ง ให้เป็นผลเฉลยใหม่
- ❖ ตัวอย่าง
  - ❖ TSP : [1,2,3,4]
    - ❖ [1,**3**,2,4], [1,2,**4**,3], [1,**4**,3,2]
  - ❖ VertexCover : [1,0,0]
    - ❖ [**0**,0,0], [1,**1**,0], [1,0,**1**]
  - ❖ 3-Coloring : [1,2,2]
    - ❖ [**2**,2,2], [**3**,2,2], [1,**1**,2], [1,**3**,2], [1,2,**1**], [1,2,**3**]

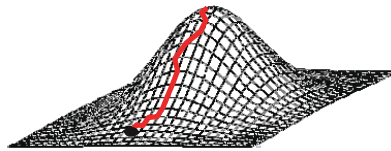
## Hill Climbing

```

knapsack( w[1..n], v[1..n], W ) {
  maxV = 0
  maxX[1..n] = a new array[1..n]
  betterSolution = true
  while (betterSolution) {
    x = maxX
    betterSolution = false
    for (i=1; i<n; i++) {
      x[i] = 1 - x[i]
      Ev = sum(v, x)
      if (sum(w, x) <= W && Ev > maxV) {
        maxX = x; maxV = Ev; betterSolution = true
        break
      }
      x[i] = 1 - x[i]
    }
  }
  return maxX
}

```

Maximization



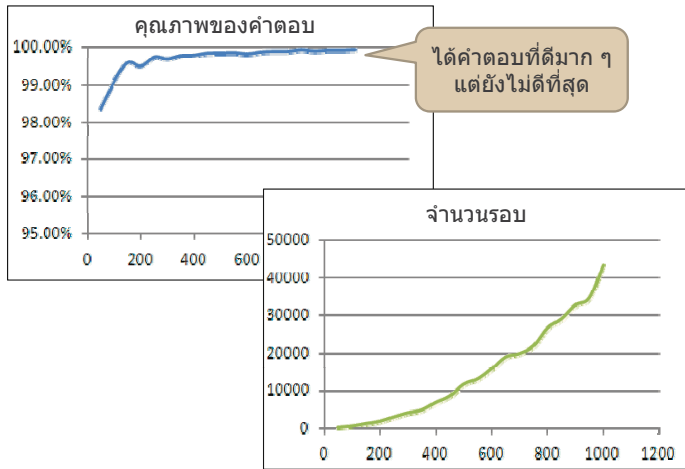
Simple Ascent  
vs.  
Steepest Ascent

สูงกว่าขั้นเลย

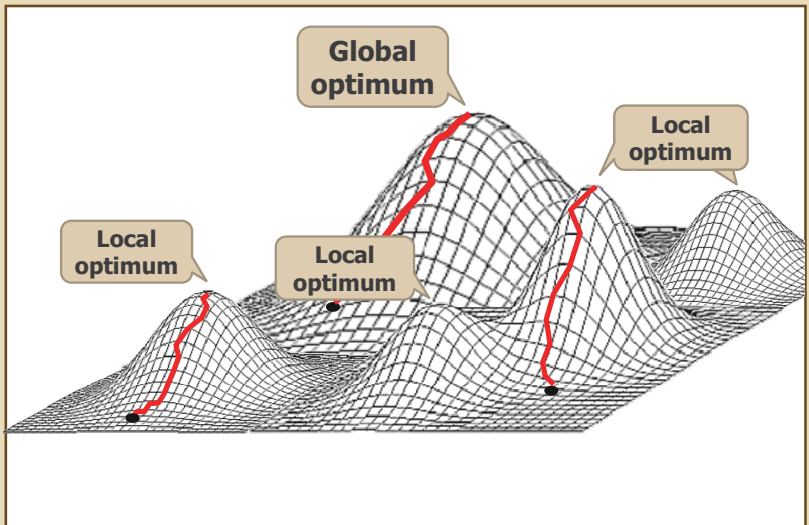
ขึ้นไปทางที่ชันสุด



## Hill Climbing : 0/1 Knapsack



## Global กับ Local Optimum



## Hill Climbing : TSP (เป็นลง)

```
tsp( d[1..n][1..n] ) {
  minT = {1,2,3,...,n}; shuffle( minT )
  minL = tourLength(d, minT);
  betterSolution = true;
  while ( betterSolution ) {
    x = minT; betterSolution = false;
    for each pair (i,j) in (1..n, 1..n) {
      x[i] ↔ x[j]
      len = tourLength(d, x)
      if (len < minL) {
        minL = len; minT = x; betterSolution = true;
        break;
      }
      x[i] ↔ x[j]
    }
  }
  return minT;
}
```

[1,2,3,4]

[1,3,2,4]

[1,2,4,3]

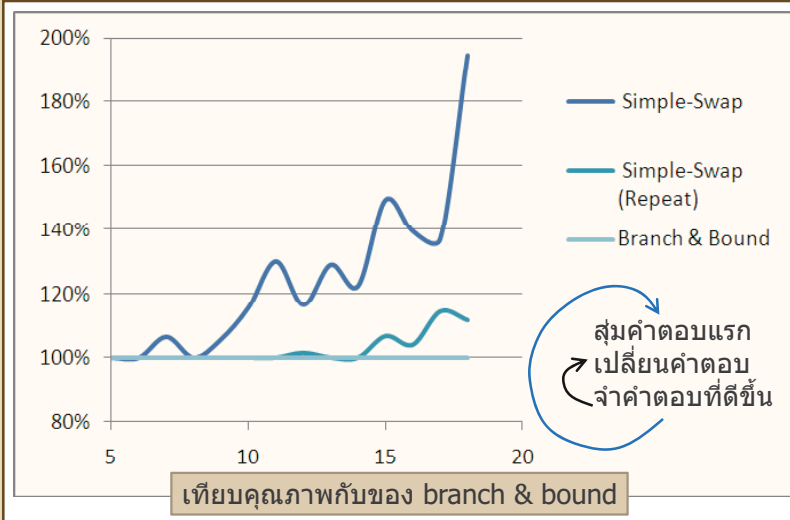
[1,4,3,2]

Simple Descent vs. Steepest Descent

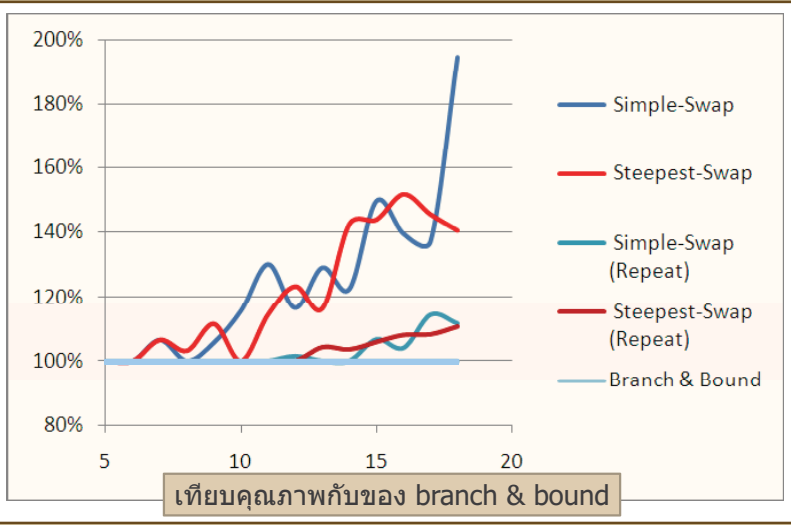
ต่ำกว่าลงเลย

ลงไปทางที่ชันสุด

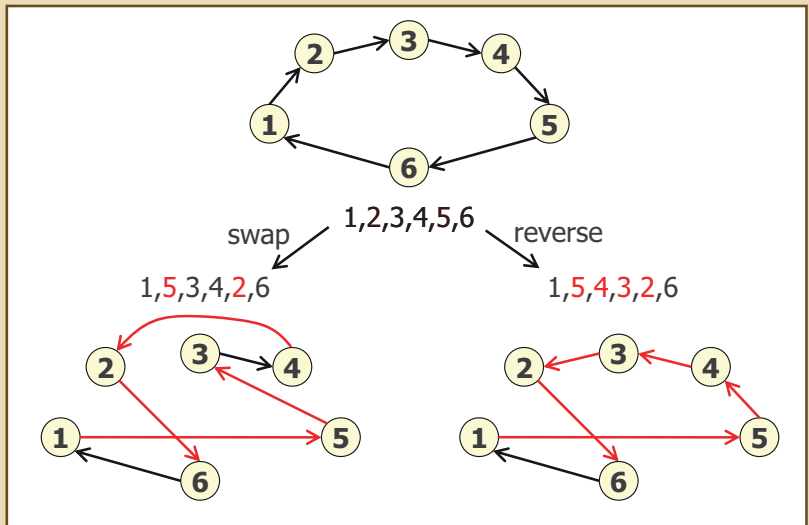
## TSP : Simple Descent



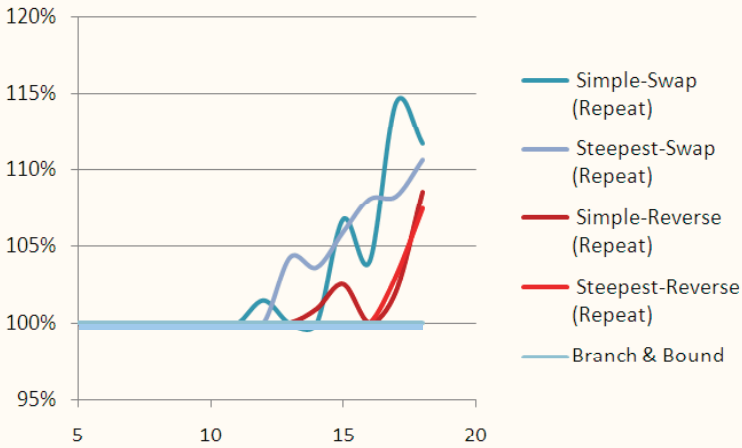
## Simple กับ Steepest Descent



## Neighboring Functions

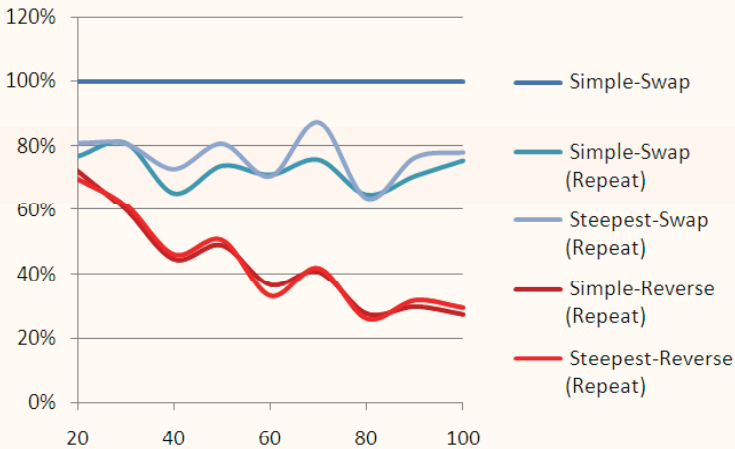


## Neighboring Functions



เทียบคุณภาพกับของ branch & bound

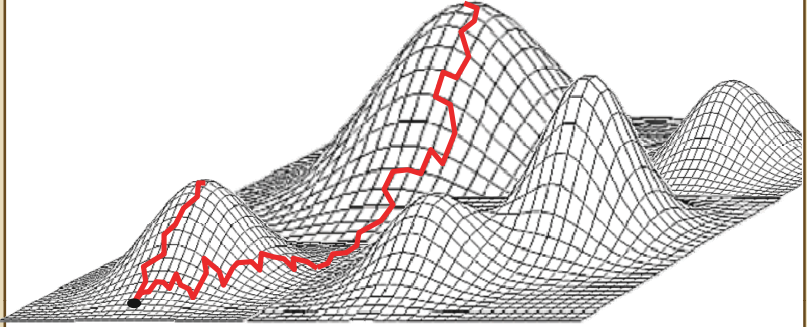
## Neighboring Function



เทียบคุณภาพกับของ Simple-Swap

# ทำอย่างไรให้ไม่ติด local optimum

❖ ต้องยอมรับคำตอบใหม่ แม้จะมีคุณภาพต่ำกว่า

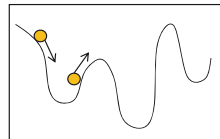


## Simulated Annealing

❖ ล้อเลียนกระบวนการอบเหนียว (Annealing)

- ❖ เพิ่มอุณหภูมิให้ของแข็งหลอมละลายกลายเป็นของเหลว แล้วลดอุณหภูมิลงให้กลับสภาพเป็นของแข็ง
- ❖ อบเหนียวโลหะ
  - ❖ ลดอุณหภูมิเร็วไป → เปราะ ✕
  - ❖ ค่อย ๆ ลดอุณหภูมิ → เหนียว ✓
- ❖ โครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากสถานะพลังงานศักย์สูง → สถานะพลังงานศักย์ต่ำ
- ❖ อาจเปลี่ยนจากต่ำ → สูงได้
  - ❖ อุณหภูมิสูงเปลี่ยนแปลงมาก ต่ำเปลี่ยนแปลงน้อย

$$e^{-\Delta E / KT}$$



## Simulated Annealing

```

localSearch( p ) {
    s = initialSolution(p)
    while not terminate(p, s) {
        s* = select( neighbor(p, s) )
        if ( accept(p, s, s*) ) s = s*
    }
}

```

```

simulatedAnnealing( p ) {
    s = initialSolution(p)
    T =  $T_0$ 
    while (  $T > 0$  ) {
        for ( i = 1; i <=  $N$ ; i++ ) {
            s* = neighbor(p, s)
             $\Delta E$  = energy(s*) - energy(s)
            if ( $\Delta E < 0$  OR random(0,1) <  $e^{-\Delta E/kT}$  )
                s = s*
        }
        T =  $\alpha T$ 
    }
}

```

## TSP : Simulated Annealing

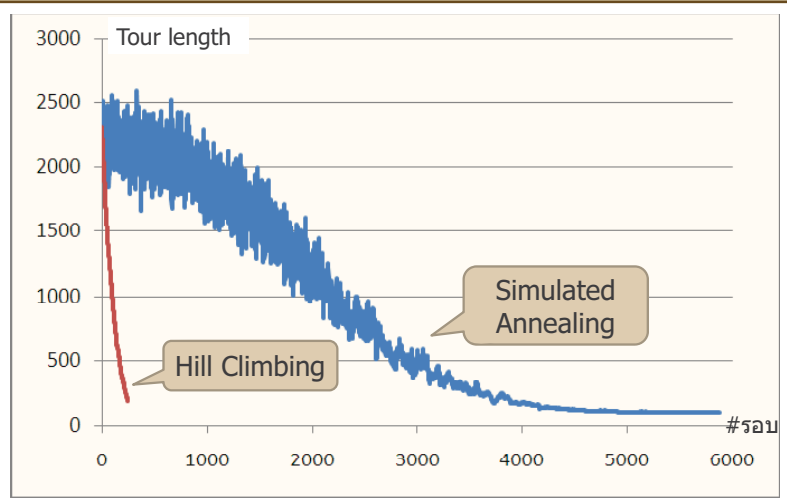
```

tspSA( d[1..n][1..n] ) {
    tour = initialTour( d )
    maxT = T = tourLength(d, tour)
    while ( T > 0.001 ) {
        N = maxT - T;
        for ( i = 1; i <= N; i++ ) {
            newTour = nextTour( minT )
            dE = tourLength(d, newTour) - tourLength(d, tour)
            if ( dE < 0 OR random(0,1) <  $e^{-dE/kT}$  ) {
                tour = newTour;
            }
        }
        T *= 0.999
    }
    return tour;
}

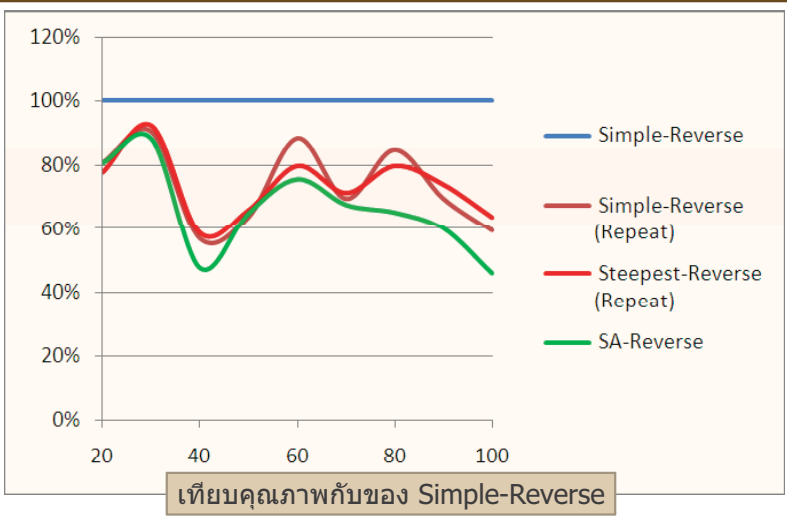
```

รับเส้นทางที่ยาวกว่าได้ง่ายเมื่อ T สูง  
รับยากขึ้นเมื่อ T ต่ำลง

## Hill Climb.. กับ Simulated Annealing



## TSP : Simulated Annealing

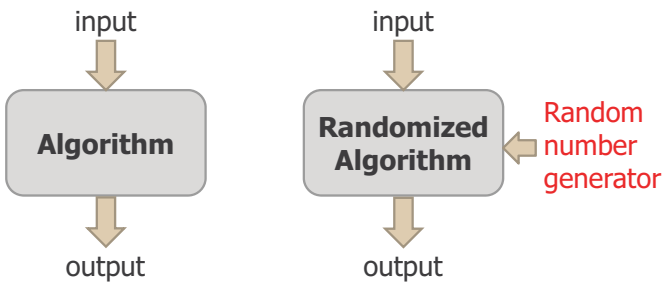


เทียบคุณภาพกับของ Simple-Reverse

# อัลกอริทึมเชิงสุ่ม

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## อัลกอริทึมเชิงสุ่ม



ง่าย, เร็ว, หรือ ง่าย+เร็ว  
ไม่กล้าฟันธง ให้โยนเหรียญ  
จนปัญญา !



## Randomized Majority

- ❖ ถ้า  $d$  ไม่มีตัวหุ้มมาก      2,1,3,1,0,2,1,4,5,7,8,3,2,8
  - ❖ สมมติตัวใดก็ต้องไม่ใช่ ค่าตอบถูกเสมอ
- ❖ ถ้า  $d$  มีตัวหุ้มมาก      1,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,2,3,1
  - ❖ โอกาสสุ่มได้ตัวหุ้มมาก  $> 1/2$     โอกาสตอบผิด  $< 1/2$

```

hasMajority( d[1..n] ) {
  i = random(1, n)
  c = count( d, i )
  return ( c > n/2 )
}
hasMajorityRepeat( d[1..n], k ) {
  for (i=1; i<=k; i++) {
    if (hasMajority(d)) return true
  }
  return false
}

```

โอกาสผิด  $< 1/2$

โอกาสผิด  $< 1/2^k$

## Randomized Quicksort

- ❖ เวลาของ Quicksort ขึ้นกับ pivot ที่เลือกตอนแบ่ง
  - ❖ ถ้าเลือก pivot แบบตายตัว จะมี bad input
    - ❖ worst-case เป็น  $O(n^2)$
    - ❖ avg-case เป็น  $O(n \log n)$  (เฉลี่ย input ทุกรูปแบบ)
  - ❖ ถ้าเลือก pivot แบบสุ่ม ไม่มี bad input
    - ❖ ได้ expected running time เป็น  $O(n \log n)$
    - ❖ ยังคงมี worst-case เป็น  $O(n^2)$  แต่ด้วยโอกาสที่ต่ำมาก

```

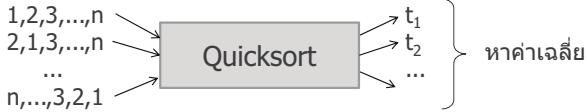
partition( d[1..n], left, right ) {
  k = random(left, right)
  d[k] ↔ d[left]
  p = d[left] // pivot
  i = left, j = right + 1
  ...
}

```

## Average กับ Expected

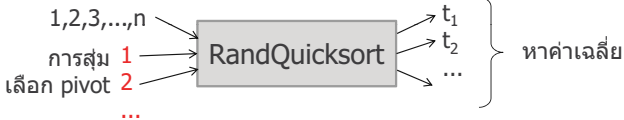
### ❖ วิเคราะห์ average time

- ❖ หาเวลาการทำงานเฉลี่ยของ input ทุกรูปแบบ



### ❖ วิเคราะห์ expected time

- ❖ หาเวลาการทำงานเฉลี่ยของการสุ่มทุกรูปแบบ



## Randomized Algorithms

### ❖ Monte Carlo

- ❖ คำนวณค่าตอบเสมอ แต่อาจผิด (ด้วยความน่าจะเป็นที่ต่ำ)
- ❖ ทำงานรวดเร็ว
- ❖ ตัวอย่าง : Randomized Majority

### ❖ Las-Vegas

- ❖ คำนวณค่าตอบที่ถูกต้องเสมอ หรือไม่ก็ยอมรับว่าไม่มีคำตอบ
- ❖ อาจทำงานช้า (ด้วยความน่าจะเป็นที่ต่ำ)
- ❖ ตัวอย่าง : Randomized QuickSort

Metropolis,  
Ulam,  
Neumann,  
1949



Babai  
1979

## Monte Carlo Algorithms

- ❖ **p-correct** :  $\Pr[\text{ให้คำตอบถูกต้อง}] \geq p$ 
  - ❖ hasMajority เป็น  $1/2$  - correct
- ❖ ถ้าเป็น **decision problem**
  - ❖ One-sided error
    - ❖ ถ้าคืนคำตอบหนึ่ง จะมั่นใจแน่นอนว่าถูกต้อง
    - ❖ hasMajority เป็น one-sided error
      - คืน true (มีตัวห่มมาก) เป็นคำตอบที่ถูกต้อง
      - คืน false (ไม่มีตัวห่มมาก) เป็นคำตอบที่มีโอกาสผิด
  - ❖ Two-sided error : คำตอบที่คืน มีโอกาสผิด

## Monte Carlo : Amplification

- ❖ เพิ่มโอกาสที่ได้คำตอบถูกต้องด้วยการทำซ้ำ
  - ❖ ถ้าเป็น p-correct, one-sided error algorithm
  - ❖ เรียกซ้ำ k ครั้ง จะได้  $1 - (1 - p)^k$  - correct

ครั้งที่	โอกาสผิด	โอกาสถูก
1	$(1 - p)$	$p$
2	$(1 - p)^2$	$1 - (1 - p)^2$
k	$(1 - p)^k$	$1 - (1 - p)^k$

```

hasMajorityRepeat( d[1..n], k ) {
  for ( i = 1 to k ) {
    if ( hasMajority(d) ) return true
  }
  return false
}

```

**C = A × B ?**

- ❖ ให้  $A, B$ , และ  $C$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $n \times n$
- ❖ อยากทราบว่า  $C$  เท่ากับ  $A \times B$  หรือไม่
- ❖ วิธีทำ
  - ❖ หา  $A \times B$  แล้วเปรียบเทียบกับ  $C$ 
    - ❖ คุณธรรมดา  $\Theta(n^3)$  เปรียบเทียบอีก  $O(n^2)$
    - ❖ ใช้การคูณของ Coppersmith & Winograd  $O(n^{2.38})$
    - ❖ ใช้ randomized algo.  $\rightarrow O(n^2)$

**C = A × B ?**

- ❖ ให้  $D = C - A \times B$
- ❖ ให้  $X$  เป็น 0/1 เวกเตอร์ขนาด  $1 \times n$
- ❖ จะได้  $XD$  เป็นเวกเตอร์ขนาด  $1 \times n$
- ❖ ถ้า  $D = 0$  จะได้  $XD = 0$  แน่ (ไม่ว่า  $X$  จะมีค่าใด)
- ❖ ถ้า  $D \neq 0$   $XD$  อาจเท่าหรือไม่เท่ากับ 0 ก็ได้

0 0 1 1 1	0 0 0 0 0	0 0 0 0 2
<b>X<sub>1</sub></b>	0 0 0 0 0	<b>X<sub>1</sub>D</b>
	1 0 0 2 -1 0	
1 0 1 0 1	0 0 0 0 2	0 0 0 0 0
<b>X<sub>2</sub></b>	1 0 0 -2 1 0	<b>X<sub>2</sub>D</b>
	<b>D</b>	

## C = AxB?

**X**  $x_1 \dots x_k \dots x_n$

**D**  $\begin{matrix} d_{1,1} & x_1 & d_{1,j} & \dots & d_{1,n} \\ d_{2,1} & x_2 & d_{2,j} & \dots & d_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{k,1} & x_k & d_{k,j} & \dots & d_{k,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n,1} & x_n & d_{n,j} & \dots & d_{n,n} \end{matrix}$

ให้แถวที่ k มี  $d_{k,j} \neq 0$

$x_1 d_{1,j} + x_2 d_{2,j} + \dots + x_k d_{k,j} + \dots + x_n d_{n,j} \Pr[\neq 0] \geq 1/2$

$x_1 d_{1,j} + x_2 d_{2,j} + \dots + 0 d_{k,j} + \dots + x_n d_{n,j} \neq 0$

$x_1 d_{1,j} + x_2 d_{2,j} + \dots + 1 d_{k,j} + \dots + x_n d_{n,j} \neq 0$

ถ้า  $d_{k,j} \neq 0$  และสุ่มให้  $x_k = 0$  หรือ  $1$  ,  $\Pr[\mathbf{XD} \neq 0] \geq 1/2$

ถ้า  $\mathbf{D} \neq \mathbf{0}$  สุ่มให้  $\mathbf{X}[1..n] = 0$  หรือ  $1$  ,  $\Pr[\mathbf{XD} \neq 0] \geq 1/2$

## C = AxB?

ถ้า  $\mathbf{D} \neq \mathbf{0}$  สุ่มให้  $\mathbf{X}[1..n] = 0$  หรือ  $1$  ,  $\Pr[\mathbf{XD} = 0] < 1/2$

```

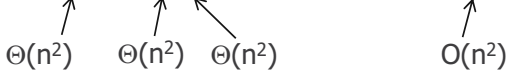
equalsMC( A[1..n][1..n], B[1..n][1..n],
          C[1..n][1..n] ) {
    D = C - AxB
    for( i = 1 to n ) X[i] = random(0,1)
    return XD == 0
}
    
```

คืน false, มั่นใจแน่นว่าไม่เท่า      คืน true, มั่นใจ  $\geq 50\%$  ว่าเท่า

one-sided error

1/2 - correct

เราไม่คำนวณ  $\mathbf{XD} = \mathbf{X}(\mathbf{C} - \mathbf{A}\times\mathbf{B})$     คำนวณ  $\mathbf{A}\times\mathbf{B}$  ใช้  $O(n^{2.38})$   
 แต่จะคำนวณ  $\mathbf{XC}$  กับ  $(\mathbf{XA})\mathbf{B}$  แล้วเปรียบเทียบ  $\mathbf{XC} == (\mathbf{XA})\mathbf{B}$



## C = AxB?

```

equalsMC( A[1..n][1..n], B[1..n][1..n],
          C[1..n][1..n] ) {
  for( i = 1 to n ) X[i] = random(0,1)
  return XC == (XA)B
}
    
```

$\frac{1}{2}$  - correct

```

equalsMC_Repeat( A[1..n][1..n], B[1..n][1..n],
                 C[1..n][1..n], k ) {
  for( i = 1 to k ) {
    if ( NOT equalsMC(A, B, C) ) return false
  }
  return true
}
    
```

$(1 - 2^{-k})$  - correct

## 2-SAT

$$(x_1 + \bar{x}_2)(x_1 + x_3)(\bar{x}_1 + x_2)(\bar{x}_2 + \bar{x}_3)(\bar{x}_2 + \bar{x}_4)(x_1 + \bar{x}_4)$$

2-SAT  $\in$  P

2-CNF



Implication Graph



Strongly Connected Components



## 2-SAT\_MC

- ❖ ถ้า 2-SAT\_MC คืน true → ถูกต้องแน่
- ❖ ถ้า 2-SAT\_MC คืน false
  - ❖ random walk จนครบแล้ว ไม่พบ satisfying assignment
    - ❖ เพราะว่า unsatisfiable จริง ๆ
    - ❖ หรือ satisfiable แต่ยังไม่ถึง
- ❖ ถ้า satisfiable และให้เดิน  $2n^2$  ครั้ง
  - ❖ จาก Markov's inequality :  $\Pr[X \geq a] \leq E(X) / a$
  - ❖  $\Pr[\text{จำนวนก้าวที่ต้องเดิน} \geq 2n^2] \leq n^2 / 2n^2 = 1/2$
- ❖ 2-SAT\_MC เป็น 1/2 - correct เมื่อให้เดิน  $2n^2$  ก้าว
- ❖ ขยายความแม่นยำโดยทำซ้ำ  $k$  ครั้ง
  - ❖  $(1 - 2^{-k})$  - correct

## Primality Testing

- ❖ PRIMES  $\in$  P AKS = Agrawal-Kayal-Saxena
- ❖ 2002 : AKS Primality Test  $\rightarrow O(\log^{12+\epsilon}(n))$
- ❖ ได้รับการปรับปรุง  $\rightarrow O(\log^{6+\epsilon}(n))$
- ❖ Miller-Rabin test  $\rightarrow O(\log^3(n))$ 
  - ❖  $3/4$  - correct, one-sided error



## Fermat Test

ถ้า  $n$  เป็นจำนวนเฉพาะ  $a^{n-1} \bmod n = 1$  สำหรับ  $1 \leq a \leq n-1$

$2^{3-1} \bmod 3 = 1$ ,  $4^{7-1} \bmod 7 = 1$  → prime  
 $2^{9-1} \bmod 9 = 4$ ,  $2^{25-1} \bmod 25 = 16$  → composite  
 $4^{15-1} \bmod 15 = 1$  แต่  $15 = 3 \times 5$  → **false witness**

จำนวน	จำนวน false witness
561	381
1105	766
1729	1294

มีจำนวนมากมายที่มี false witness มาก

ไม่เป็น p-correct

## Miller - Rabin

ถ้า  $n$  เป็นจำนวนเฉพาะ,  $a^{n-1} \bmod n = 1$  สำหรับ  $1 \leq a \leq n-1$

$$a^k \bmod n = \begin{cases} (a^{\lfloor k/2 \rfloor} \bmod n)^2 \bmod n & k \text{ is even} \\ a(a^{\lfloor k/2 \rfloor} \bmod n) \bmod n & k \text{ is odd} \end{cases}$$

```

MillerRabinTest( n ) { // Is n prime ?
  a = random(2, n-2) // ไม่เลือก 1 กับ n-1
  return powerMod(a, n-1, n) == 1
}

powerMod(a, k, n) {
  if (k == 0) return 1
  d = powerMod(a, k/2, n)
  x = d2 % n
  if ( x == 1 AND d ≠ 1 AND d ≠ n-1) return 0
  if (k % 2 == 1) d = x * a % n
  return d;
}
    
```

มี false witness  
ไม่เกิน  $(n-9)/4$  ตัว

$3/4$  - correct

ถ้า  $n$  เป็นจำนวนเฉพาะ และ  $1 \leq d \leq n-1$ ,  
 $d^2 \bmod n = 1$  ก็ต่อเมื่อ  $d = 1$  กับ  $d = n-1$

## Amplification : ลดโอกาสผิด

```
isProbablePrime( n, k ) { // Is n prime ?
  for ( i = 1 to k ) {
    if (MillerRabinTest(n) ≠ 1) return false
  }
  return true;
}
```

โอกาสผิด  $(1/4)^k$

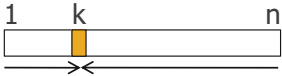
$(1 - (1/4)^k)$  - correct

## Las Vegas

- ❖ คืนคำตอบที่ถูกต้องเสมอ
  - ❖ หรือไม่ก็ยอมรับว่าไม่มีคำตอบ
  - ❖ เมื่อไม่มีคำตอบ ก็ลองใหม่
- ❖ ใช้การสุ่มเพื่อตัดสินใจระหว่างการทำงาน
- ❖ อาจทำงานช้า (ด้วยความน่าจะเป็นที่ต่ำ)
- ❖ ตัวอย่าง :
  - ❖ Randomized Quicksort
  - ❖ Randomized Quickselect
  - ❖ ...

## Randomized Sequential Search

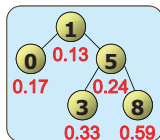
- ❖ ค้นตามลำดับจากซ้ายไปขวาในรายการ (กรณีพบ)
  - ❖ ช้าสุด (พบตัวท้ายสุดในรายการ) เปรียบเทียบ  $n$  ครั้ง
  - ❖ เฉลี่ย (ข้อมูลทุกตัวในรายการ) เปรียบเทียบ  $(n+1)/2$  ครั้ง
- ❖ **Las Vegas**  $(1+2+3+\dots+n)/n = (n(n+1)/2) / n$ 
  - ❖ โยนเฮอร์ริญ
    - ❖ ออกหัว : ค้นจากซ้ายไปขวา
    - ❖ ออกก้อย : ค้นจากขวามาซ้าย
  - ❖ ต้องการค้นตัวที่  $k$  ในรายการ
 



    - ❖ ออกหัว : เปรียบเทียบ  $k$  ครั้ง
    - ❖ ออกก้อย : เปรียบเทียบ  $(n - k + 1)$  ครั้ง
  - ❖ expected #cmps  $= \frac{1}{2} k + \frac{1}{2}(n - k + 1)$   
 $= (n+1)/2$  (ไม่ว่าจะค้นตัวใดก็ตาม)

## ต้นไม้ทรีพ (Treap)

- ❖ นำแนวคิดของฮีปเพิ่มในต้นไม้ค้นหาแบบทวิภาค  
Treap
- ❖ แต่ละปมมีข้อมูลสองตัว Binary search Tree + HeaP
  - ❖ ตัวข้อมูลจริง ของต้นไม้ค้นหาแบบทวิภาค
  - ❖ ข้อมูลเสริม เมื่อมองต้นไม้นี้เป็นฮีปแบบน้อยสุด
- ❖ ต้องรักษาโครงสร้างของต้นไม้ให้คงคุณสมบัติ
  - ❖ ข้อมูลจริงของต้นไม้ซ้ายน้อยกว่าราก ของต้นไม้ขวามากกว่าราก
  - ❖ ข้อมูลเสริมของปมพ่อดังน้อยกว่าของลูก
  - ❖ ใช้การหมุนปม สลับความเป็นพ่อลูกได้

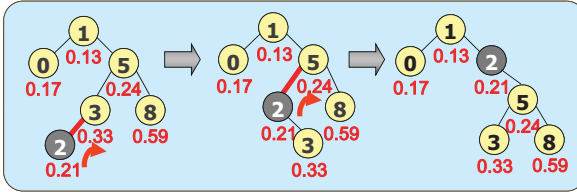


ข้อมูลเสริมของฮีปได้มาจากการสุ่มจำนวนจริงตอนสร้างปม

## การเพิ่มข้อมูล

### ❖ ต้องการเพิ่ม x

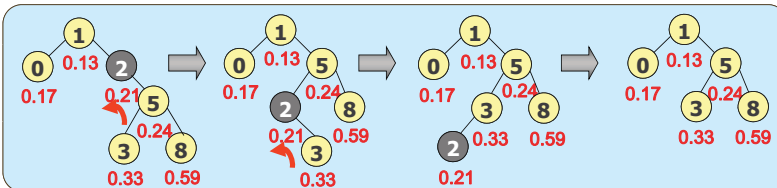
- ❖ เพิ่มปมใหม่เก็บ x เหมือนการเพิ่มในต้นไม้ค้นหาแบบทวิภาค
- ❖ สุ่มจำนวนจริงเป็นข้อมูลเสริมกำกับปมใหม่
- ❖ หมุนปม x ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะไม่ผิดอันดับแบบฮีป



## การลบข้อมูล

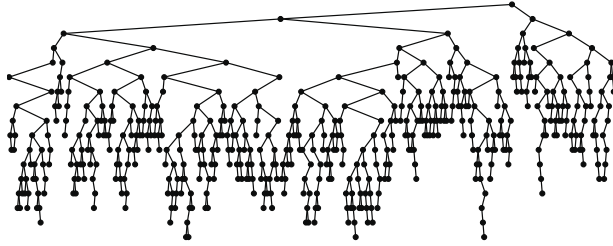
### ❖ ต้องการลบ x

- ❖ ค้นปมที่เก็บ x
- ❖ หมุนปมที่เก็บ x ลงไปเป็นใบ
- ❖ ลบใบนั้นทิ้ง



## ต้นไม้ทรีพ : Randomized BST

❖ เพิ่ม ลบ ค้น ใช้เวลา  $O(\log n)$  - expected time

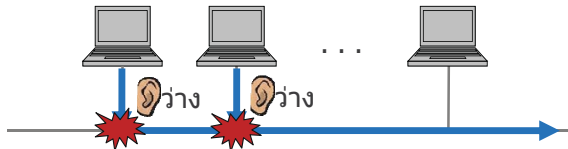


เพิ่มข้อมูลตามลำดับ 1,2,3,...,500

## Content Resolution

❖  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  แย่งกันใช้ R ร่วมกัน

- ❖ ห้ามใช้ R พร้อมกัน
- ❖ แต่ละ Q มีวิธีเข้าใช้ R อย่างไร ทุก Q ถึงได้ใช้ R ?
- ❖ หมายเหตุ :  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  ไม่คุยกัน



## Content Resolution : Las Vegas



...



```
while(true) {
  ...
  access( R );
  ...
}
```

...

```
while(true) {
  ...
  access( R );
  ...
}
```

```
access( R ) {
  if ( R.available() ) {
    if ( random(0,1) ≤ p ) {
      use( R )
    }
  }
}
```

$p = ?$

## Content Resolution : $p = ?$

- ❖ ให้แต่ละ  $Q$  ต้องการใช้  $R$  ในรอบที่  $t$  ด้วยความน่าจะเป็น  $p$
- ❖ ให้  $S(i, t)$  คือเหตุการณ์ที่
  - ❖  $Q_i$  ต้องการใช้  $R$  ในรอบที่  $t$  และได้ใช้ในรอบที่  $t$

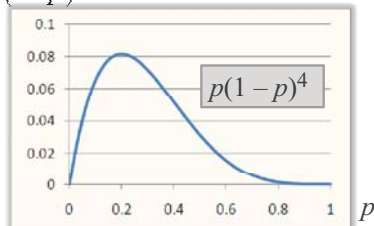
$$\Pr[S(i, t)] = p(1-p)^{n-1}$$

$$0 = (1-p)^{n-1} - p(n-1)(1-p)^{n-2}$$

$$(1-p)^{n-1} = p(n-1)(1-p)^{n-2}$$

$$(1-p) = p(n-1)$$

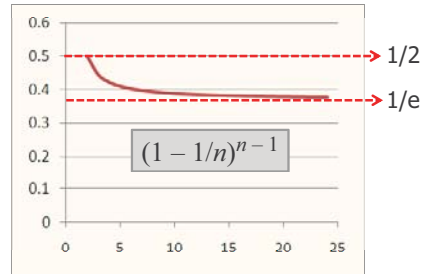
$$p = \frac{1}{n}$$



## โอกาสที่ได้ใช้ R

- ❖ ให้แต่ละ Q ต้องการใช้ R ในรอบที่ t ด้วยความน่าจะเป็น  $p = 1/n$
- ❖ ให้  $S(i, t)$  คือเหตุการณ์ที่
  - ❖  $Q_i$  ต้องการใช้ R ในรอบที่ t และได้ใช้ในรอบที่ t

$$\begin{aligned} \Pr[S(i, t)] &= p(1-p)^{n-1} \\ &= \frac{1}{n} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \\ \frac{1}{en} &\leq \Pr[S(i, t)] \leq \frac{1}{2n} \end{aligned}$$



## โอกาสที่ไม่ได้ใช้ R

- ❖ ให้  $F(i, t)$  คือเหตุการณ์ที่
  - ❖  $Q_i$  ต้องการใช้ R ในรอบที่ 1 ถึง t, แต่ไม่ได้ใช้เลย

$$\begin{aligned} \Pr[F(i, t)] &= (1 - \Pr[S(i, t)])^t \\ (1 - (en)^{-1})^{en} &\leq \left(1 - \frac{1}{en}\right)^t & \frac{1}{en} \leq \Pr[S(i, t)] \leq \frac{1}{2n} \\ (1 - x^{-1})^x \leq e^{-1} &\leq e^{-1} & \text{เมื่อ } t = en \\ &\leq e^{-c \ln n} & \text{เมื่อ } t = (en)(c \ln n) \\ &= n^{-c} \end{aligned}$$

## จำนวนรอบที่มั่นใจว่าได้ใช้ R

ให้  $F(t)$  คือเหตุการณ์ที่มีอย่างน้อย 1 งานที่ไม่ได้ใช้ R ใน  $t$  รอบ

$$\Pr[F(i,t)] \leq n^{-c} \quad \text{เมื่อ } t = (en)(c \ln n)$$

$$\Pr[F(t)] = \sum_{i=1}^n \Pr[F(i,t)]$$

$$\leq n \left(1 - \frac{1}{en}\right)^t$$

$$\leq n \cdot n^{-2} \quad \text{เมื่อ } t = (en)(2 \ln n)$$

$$= \frac{1}{n}$$

สรุป : ถ้าแต่ละงานเข้าใช้ R ด้วยความน่าจะเป็น  $1/n$   
เมื่อผ่านไป  $\lceil 2en \ln n \rceil$  รอบ ทุกงานได้ใช้ R อย่างน้อย 1 ครั้ง  
ด้วยความน่าจะเป็นอย่างน้อย  $1 - n^{-1}$

## Randomized N-Queen

```

LV-NQueen( col[1..n] ) {
  for ( i = 1; i <= n; i++) col[i] = i;
  while ( Randomized-NQueen(col) == false ) {}
  print( col )
}
Randomized-NQueen(col[1..n]) {
  shuffle( col )
  for(k = 2; k <= n; k++) {
    j = k + 1
    while (!isValid(col, k)) {
      if (j > n) return false
      col[k] ↔ col[j];
      j++
    }
  }
  return true
}

```

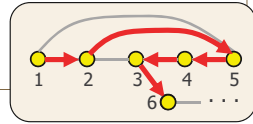
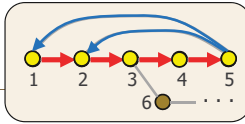


## Hamiltonian Path : Randomized

```

Randomized-HamiltonianPath(  $G=(V,E)$  ) {
  u = ปมหนึ่ง (เลือกอย่างสุ่ม) ของ V
  path = < u >
  while ( |path| < |V| ) {
    v = ปมปลายของ path
    if (มีปมที่ติดกับ v ที่ไม่อยู่ใน path) {
      u = ปมที่ติดกับ v ที่ไม่อยู่ใน path (เลือกแบบสุ่ม)
      path.append( u )
    } else if (มีปมที่ติดกับ v) {
      u = ปมที่ติดกับ v (เลือกแบบสุ่ม)
      rotatePath( path, u )
    } else {
      return FAIL
    }
  }
}

```



## Hamiltonian Path : Las Vegas

```

LV-HamiltonianPath(  $G=(V,E)$  ) {
  do {
    path = Randomized-HamiltonianPath( G )
  } while( path == FAIL )
  return path
}

```

# การจับคู่สตริง

สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล

## หัวข้อ

นิยามปัญหา

Brute-force (naïve)

Rabin-Karp

Finite-automaton

Knuth-Morris-Pratt

Boyer-Moore

Horspool

## Exact String Matching

You are the fairest of your sex,  
Let me be your hero;  
I love you as one over  $x$ ,  
As  $x$  approaches zero.  
Positively.



Input

You are the fairest of **you** sex,  
Let me be **you** hero;  
I love **you** as one over  $x$ ,  
As  $x$  approaches zero.  
Positively.

Output

## Approximate String Matching

You are the fairest of your sex,  
Let me be your hero;  
I love you as one over  $x$ .  
As  $x$  approaches zero.  
Positively.



Input

You are the fairest of your sex,  
Let me be your **heero**;  
I love you as one over  $x$ ,  
As  $x$  approaches **zero**.  
Positively.

Output

# ปัญหา String Matching

## ❖ Finite alphabet : $\Sigma$

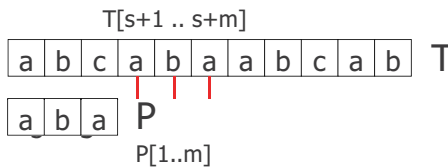
- ❖  $\Sigma = \{a, b, c, \dots, z\}$
- ❖  $\Sigma = \{0, 1\}$
- ❖  $\Sigma = \{A, C, G, T\}, \dots$

ต้องการหา  
all valid shifts  
first valid shift  
last valid shift

## ❖ Text : $T[1..n]$

$$0 \leq s \leq n - m$$

## ❖ Pattern : $P[1..m]$

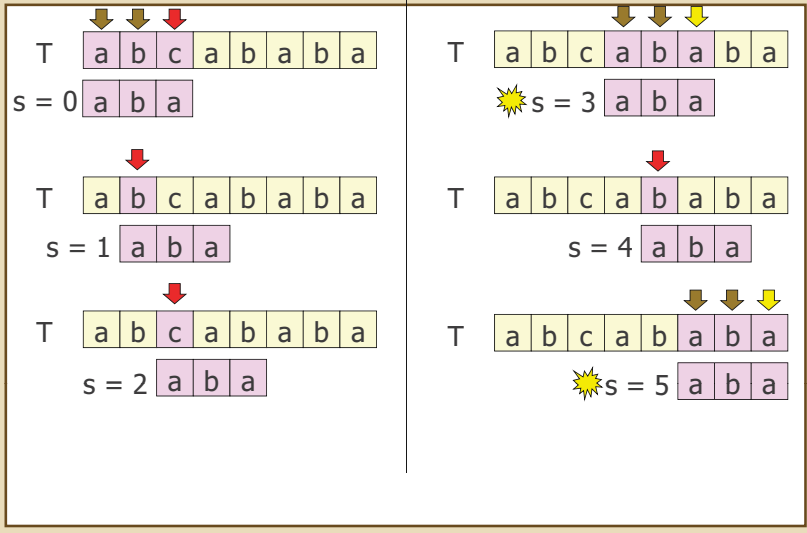


s เป็น valid shift เมื่อ  $P[1..m] = T[s+1 .. s+m]$

## อัลกอริทึมการเทียบสตริงแบบแมนตรง

- ❖ Brute Force algorithm
- ❖ Deterministic Finite Automaton algorithm
- ❖ Rabin-Karp algorithm
- ❖ Shift Or algorithm
- ❖ Morris-Pratt algorithm
- ❖ Knuth-Morris-Pratt algorithm
- ❖ Simon algorithm
- ❖ Colussi algorithm
- ❖ Galil-Giancarlo algorithm
- ❖ Apostolico-Crochemore algorithm
- ❖ Boyer-Moore algorithm
- ❖ Turbo BM algorithm
- ❖ Apostolico-Giancarlo algorithm
- ❖ Reverse Colussi algorithm
- ❖ Horspool algorithm
- ❖ Quick Search algorithm
- ❖ Tuned Boyer-Moore algorithm
- ❖ Zhu-Takaoka algorithm
- ❖ Berry-Ravindran algorithm
- ❖ Smith algorithm
- ❖ Raita algorithm
- ❖ Reverse Factor algorithm
- ❖ Turbo Reverse Factor algorithm
- ❖ Forward Dawg Matching algorithm
- ❖ Backward Nondeterministic Dawg Matching algorithm
- ❖ Backward Oracle Matching algorithm
- ❖ Galil-Seiferas algorithm
- ❖ Two Way algorithm
- ❖ String Matching on Ordered Alphabets algorithm
- ❖ Optimal Mismatch algorithm
- ❖ Maximal Shift algorithm
- ❖ Skip Search algorithm
- ❖ KMP Skip Search algorithm
- ❖ Alpha Skip Search algorithm
- ❖ ...

## Brute Force (Naive) Algorithm



## Brute Force (Naive) Algorithm

```

Naive-String-Matching( T[1..n], P[1..m] ) {
  for( s = 0 to n-m ) { ←  $\Theta(n-m)$ 
    for( i = 1 to m ) {
      if (T[s+i] ≠ P[i]) break; ←  $O(m)$ 
    }
    if (i > m) print( s )
  }
}

```

$O(nm)$

worst case :  $T = \text{AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAZ}$   
 $P = \text{AAAAZ}$

average # of comparisons : (random text and random pattern)

$d = |\Sigma|$

$$\frac{1-d^{-m}}{1-d^{-1}}(n-m+1) < 2(n-m+1)$$

## Random T&P : Avg #Cmps

$$\begin{array}{l}
 \text{ตัวที่ 1 ไม่เหมือน} \quad \left(\frac{d-1}{d}\right) \times 1 \\
 \text{ตัวแรกเหมือน} \\
 \text{ตัวที่ 2 ไม่เหมือน} \quad \left(\frac{1}{d}\right)^1 \left(\frac{d-1}{d}\right) \times 2 \\
 \text{สองตัวแรกเหมือน} \\
 \text{ตัวที่ 3 ไม่เหมือน} \quad \left(\frac{1}{d}\right)^2 \left(\frac{d-1}{d}\right) \times 3 \\
 \dots \\
 m-1 \text{ ตัวแรกเหมือน} \\
 \text{ตัวที่ } m \text{ ไม่เหมือน} \quad \left(\frac{1}{d}\right)^{m-1} \left(\frac{d-1}{d}\right) \times m \\
 \dots \\
 \text{เหมือนกันทั้ง } m \text{ ตัว} \quad \left(\frac{1}{d}\right)^m \times m
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \dots \\ \dots \end{array}} \right\} \sum_{k=1}^m \frac{k}{d^{k-1}} \left(\frac{d-1}{d}\right)$$

$$\left. \vphantom{\begin{array}{l} \dots \\ \dots \end{array}} \right\} + \frac{m}{d^m}$$

## Random T&P : Avg #Cmps

$$\frac{m}{d^m} + \sum_{k=1}^m \frac{k}{d^{k-1}} \left(\frac{d-1}{d}\right) = \frac{m}{d^m} + \left(1 - \frac{1}{d}\right) \sum_{k=1}^m \frac{k}{d^{k-1}} = ?$$

$$\sum_{k=0}^m x^k = \frac{1-x^{m+1}}{1-x}$$

$$\sum_{k=1}^m kx^{k-1} = \frac{-(1-x)(m+1)x^m + (1-x^{m+1})}{(1-x)^2}$$

$$= \frac{1 - (m+1)x^m + mx^{m+1}}{(1-x)^2}$$

$$= \frac{1-x^m + mx^m(x-1)}{(1-x)^2}$$

## Random T&P : Avg #Cmps

$$\frac{m}{d^m} + \left(1 - \frac{1}{d}\right) \sum_{k=1}^m \frac{k}{d^{k-1}} = \frac{1-d^{-m}}{1-d^{-1}}$$

$$\sum_{k=1}^m kx^{k-1} = \frac{1-x^m + mx^m(x-1)}{(1-x)^2}$$

$$mx^m + (1-x) \sum_{k=1}^m kx^{k-1} = mx^m + (1-x) \left( \frac{1-x^m + mx^m(x-1)}{(1-x)^2} \right)$$

$$= mx^m + \left( \frac{1-x^m + mx^m(x-1)}{(1-x)} \right)$$

$$= \frac{1-x^m}{1-x} \rightarrow \text{ให้ } x = d^{-1}$$

## Random T&P : Avg #Cmps

```

Naive-String-Matching( T[1..n], P[1..m] ) {
  for( s = 0 to n-m ) {
    for( i = 1 to m ) {
      if (T[s+i] ≠ P[i]) break;
    }
    if (i > m) print( s )
  }
}

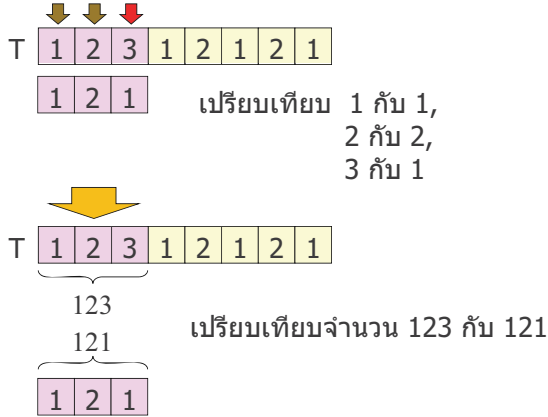
```

$$\frac{1-d^{-m}}{1-d^{-1}}(n-m+1) < 2(n-m+1)$$

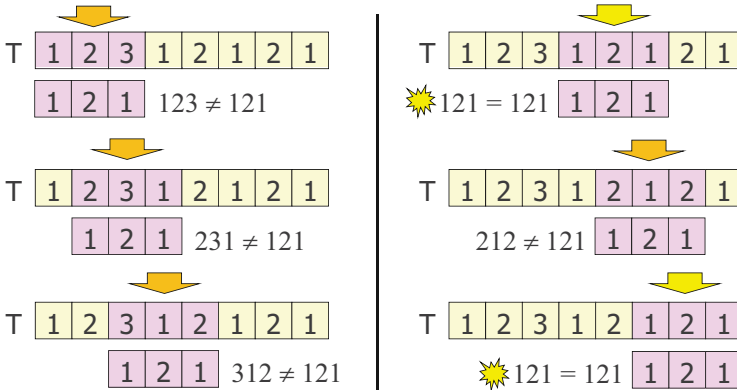
$$\frac{1-d^{-m}}{1-d^{-1}} < \frac{1}{1-d^{-1}}, d \geq 2$$

$$\leq \frac{1}{1-2^{-1}} = 2$$

## Rabin-Karp Matcher



## Rabin-Karp Algorithm



ถ้า pattern เป็นตัวอักษร หรือ  
ถ้าเป็นตัวเลข แต่มีขนาดใหญ่เกิน int เกิน long } จะทำอย่างไร ?



# Hashing

T a b c a b a b a  
 $h("abc") \rightarrow 348 \neq 78$

T a b c a b a b a  
 $h("bca") \rightarrow 519 \neq 78$

T a b c a b a b a  
 $h("cab") \rightarrow 13 \neq 78$

T a b c a b a b a  
 $h("aba") \rightarrow 78 = 78$  ✨

P a b a  
 $h("aba")$   
 78

T a b c a b a b a  
 $h("bab")$   
 78 = 78

spurious hit

ดังนั้น ถ้า hit ต้อง  
 เที่ยบแต่ละ char ด้วย

อีกปัญหา : การคำนวณ  $h(p)$   
 ที่ใช้เวลาตามขนาดของ  $p$

## การคำนวณค่า h : incremental

- ❖  $h(s)$  = (มอง  $s$  เป็นจำนวน ในระบบเลขฐาน)
- ❖  $h("abc") = (1 \times 37^2 + 2 \times 37^1 + 3 \times 37^0) = 1446$
- ❖  $h("bce") = (2 \times 37^2 + 3 \times 37^1 + 5 \times 37^0) = 2853$

$$= 37 \times (\cancel{1 \times 37^2} + 2 \times 37^1 + 3 \times 37^0) + 5 \times 37^0$$

$$= 37 \times (h("abc") - 1 \times 37^2) + 5 \times 37^0$$



$$h("...e") = 37 \times (h("a...") - 1 \times 37^{m-1}) + 5 \times 37^0$$



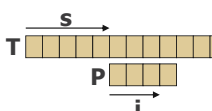
## Rabin-Karp Algorithm

```

Rabin-Karp-Matching( T[1..n], P[1..m], d ) {
  ht = 0; hp = 0
  for ( i = 1 to m ) {
    ht = d*ht + T[i]
    hp = d*hp + P[i]
  }
  for ( s = 0 to n - m ) {
    if ( ht == hp ) {
      for ( i = 1 to m )
        if ( T[s+i] ≠ P[i] ) break
      if ( i > m ) print( s )
    }
    if ( s < n-m ) {
      ht = d*(ht - T[s+1]*dm-1) + T[s+m+1]
    }
  }
}

```

$d = |\Sigma|$



ถ้า  $m$  มีค่ามาก ขนาดของ  $ht$  และ  $hp$  ก็ใหญ่

$h(\dots e) = 37 \times (h(\dots a) - 1 \times 37^{m-1}) + 5 \times 37^0$

## Rabin-Karp Algorithm

```

Rabin-Karp-Matching( T[1..n], P[1..m], d, q ) {
  ht = 0; hp = 0; dml = dm-1 % q
  for ( i = 1 to m ) {
    ht = (d*ht + T[i]) % q
    hp = (d*hp + P[i]) % q
  }
  for ( s = 0 to n - m ) {
    if ( ht == hp ) {
      for ( i = 1 to m )
        if ( T[s+i] ≠ P[i] ) break
      if ( i > m ) print( s )
    }
    if ( s < n-m ) {
      ht = (d*(ht - T[s+1]*dml) + T[s+m+1]) % q
    }
  }
}

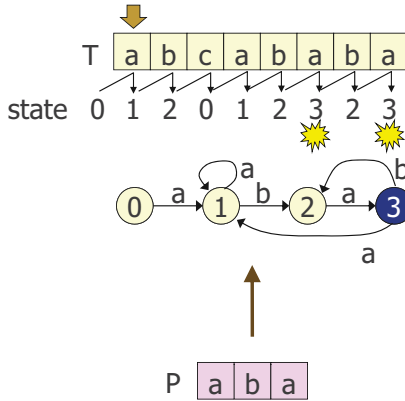
```

worst case  $\Theta(nm)$

avg case  $O(n + m)$

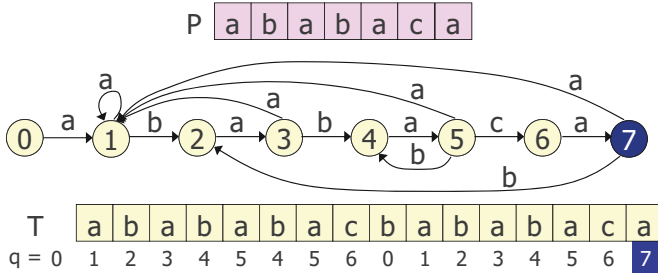
$h(\dots e) = 37 \times (h(\dots a) - 1 \times 37^{m-1}) + 5 \times 37^0$

# Finite Automaton Matcher



สร้าง state transition diagram จาก pattern

# Finite Automaton Matcher



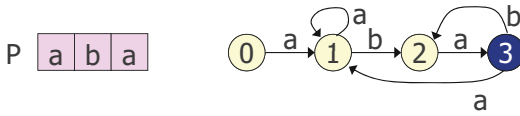
```

Finite-Automaton-Matching(T[1..n],  $\delta$ , m) {
  q = 0
  for( i = 1 to n ) {
    q =  $\delta$ (q, T[i])
    if (q == m) print( i-m )
  }
}
    
```

สร้าง transition function อย่างไร ?

$\Theta(n)$

# Transition Function



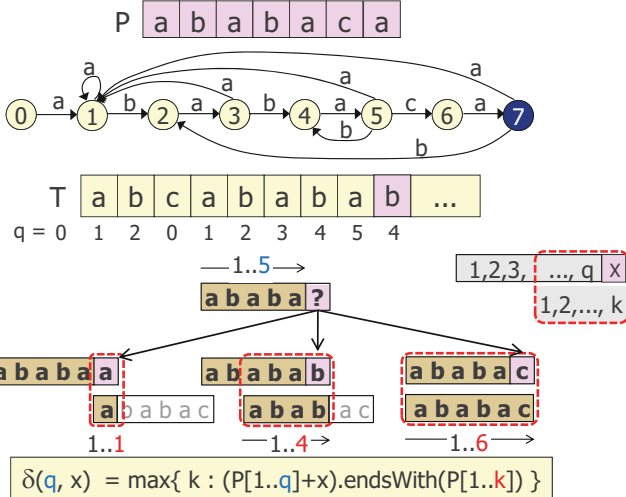
$\Sigma = \{a, b, c\}$

ตารางมีขนาด  
(m+1)| $\Sigma$ |

state	input		
	a	b	c
0	1	0	0
1	1	2	0
2	3	0	0
3	1	2	0

$\delta(\text{state}, \text{input})$

# Transition Function



## ตัวอย่าง Transition Function

$$\delta(q, x) = \max\{ k : (P[1..q]+x).endsWith(P[1..k]) \}$$

state	a	b	c
0	1	0	0
1	1	2	0
2	3	0	0
3	1	4	0
4	5	0	0
5	1	4	6
6	7	0	0
7	1	2	0

P a b a b a c a

$$\delta(5, "b") = 4$$

$$P[1..5] + "b" = ababab$$

P[1..k] {  
~~a~~  
 ab  
~~aba~~  
 abab P[1..4]  
~~ababa~~  
~~ababac~~  
~~ababaca~~

สร้างแบบตรงไปตรงมาใช้เวลา  $O(m^3|\Sigma|)$

มีวิธีสร้างที่ใช้เวลา  $O(m|\Sigma|)$

รวมการค้นด้วย ใช้เวลา  $O(n + m|\Sigma|)$

## Knuth-Morris-Pratt Matcher

### ❖ ของเดิม (transition function)

$$\delta(q, x) = \max\{ k : (P[1..q]+x).endsWith(P[1..k]) \}$$

❖ ตารางมีขนาด  $(m+1)|\Sigma|$

1,2,3, ..., q | x

❖ ใช้เวลาสร้าง  $O(m|\Sigma|)$

1,2,...,k

### ❖ ของใหม่ (prefix function)

$$\pi(q) = \max\{ k : k < q \text{ and } (P[1..q]).endsWith(P[1..k]) \}$$

❖ match มาได้ q ตัว แต่ mismatch ตัวที่ q+1 ให้ทำต่อที่  $P[\pi(q)+1]$

❖ ตารางมีขนาด m

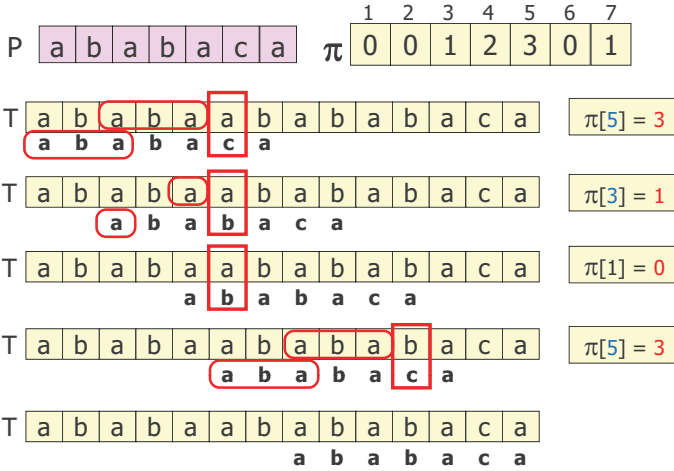
1,2,3, ..., q

❖ ใช้เวลาสร้าง  $\Theta(m)$

1,2,...,k

### ❖ สร้าง $\pi$ และค้น ใช้เวลารวม $\Theta(n+m)$

# การใช้ Prefix Function

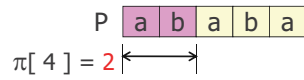
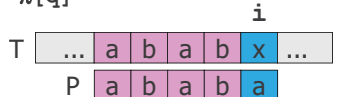


# KMP-Matcher

```

KMP-Matcher( T[1..n], P[1..m] ) {
     $\pi$  = Compute-Prefix-Function(P) //  $\Theta(m)$ 
    q = 0
    for ( i = 1 to n ) {
        while ( q > 0 AND P[q+1]  $\neq$  T[i] ) {
            q =  $\pi$ [q]
        }
        if ( P[q+1] == T[i] ) q++
        if ( q == m ) {
            print( i - m )
            q =  $\pi$ [q]
        }
    }
}
    
```

$\Theta(n + m)$



$$\pi(q) = \max\{ k : k < q \text{ and } (P[1..q]).\text{endsWith}(P[1..k]) \}$$

q = 1	a	b	a	b	a	c	a	$\pi[1] = 0$
		a	b	a	b	a	c	a
q = 2	a	b	a	b	a	c	a	$\pi[2] = 0$
		a	b	a	b	a	c	a
q = 3	a	b	a	b	a	c	a	$\pi[3] = 1$
		a	b	a	b	a	c	a
q = 4	a	b	a	b	a	c	a	$\pi[4] = 2$
		a	b	a	b	a	c	a
q = 5	a	b	a	b	a	c	a	$\pi[5] = 3$
		a	b	a	b	a	c	a
q = 6	a	b	a	b	a	c	a	$\pi[6] = 0$
		a	b	a	b	a	c	a
q = 7	a	b	a	b	a	c	a	$\pi[7] = 1$
		a	b	a	b	a	c	a

**P[1..q]**
**P[1..k], k < q**

$$\pi(q) = \max\{ k : k < q \text{ and } (P[1..q]).\text{endsWith}(P[1..k]) \}$$

a	t	c	a	c	a	t	c	a	t	c	a	$\pi[1] = 0$
a	t	c	a	c	a	t	c	a	t	c	a	$\pi[2] = 0$
a	t	c	a	c	a	t	c	a	t	c	a	$\pi[3] = 0$
a	t	c	a	c	a	t	c	a	t	c	a	
a	t	c	a	c	a	t	c	a	t	c	a	

```

Compute-Prefix-Function( P[1..m] ) {
  pi[1] = 0; k = 0
  for ( q = 2 to m ) {
    ...
    if ( P[k+1] == P[q] ) k++
    pi[q] = k
  }
  return pi
}
    
```

$$\pi(q) = \max\{ k : k < q \text{ and } (P[1..q]).\text{endsWith}(P[1..k]) \}$$

a t c a c a t c a t c a	$\pi[4] = 1$
a t c a c a t c a t c a	
a t c a c a t c a t c a	$\pi[5] = 0$
a a t c a c a t c a t c a	
a t c a c a t c a t c a	$\pi[6] = 1$
a t c a c a t c a t c a	

```

Compute-Prefix-Function( P[1..m] ) {
   $\pi[1] = 0$ ; k = 0
  for ( q = 2 to m ) {
    while ( k > 0 and P[k+1]  $\neq$  P[q] ) {
      k =  $\pi[k]$ 
    }
    if ( P[k+1] == P[q] ) k++
     $\pi[q] = k$ 
  }
  return  $\pi$ 
}
    
```

$$\pi(q) = \max\{ k : k < q \text{ and } (P[1..q]).\text{endsWith}(P[1..k]) \}$$

a t c a c a t c a t c a	$\pi[7] = 2$
a t c a c a t c a t c a	
a t c a c a t c a t c a	$\pi[8] = 3$
a t c a c a t c a t c a	
a t c a c a t c a t c a	$\pi[9] = 4$
a t c a c a t c a t c a	

```

Compute-Prefix-Function( P[1..m] ) {
   $\pi[1] = 0$ ; k = 0
  for ( q = 2 to m ) {
    while ( k > 0 and P[k+1]  $\neq$  P[q] ) {
      k =  $\pi[k]$ 
    }
    if ( P[k+1] == P[q] ) k++
     $\pi[q] = k$ 
  }
  return  $\pi$ 
}
    
```



$$\pi(q) = \max\{ k : k < q \text{ and } (P[1..q]).\text{endsWith}(P[1..k]) \}$$

a t c a c a t c a t c a

a t c a c a t c a t c a

$\pi[9] = 4 \rightarrow P[1..4] = P[6..9] \rightarrow$  ทดสอบ  $P[4+1] = P[10]$  ?

$\pi[4] = 1 \rightarrow P[1..1] = P[4..4] \rightarrow$  ทดสอบ  $P[1+1] = P[10]$  ?

a t c a c a t c a t c a

$\pi[10] = 2$

a t c a c a t c a t c a

```

Compute-Prefix-Function( P[1..m] ) {
   $\pi[1] = 0$ ; k = 0
  for ( q = 2 to m ) {
    while ( k > 0 and P[k+1]  $\neq$  P[q] ) {
      k =  $\pi[k]$ 
    }
    if ( P[k+1] == P[q] ) k++
     $\pi[q] = k$ 
  }
  return  $\pi$ 

```

$$\pi(q) = \max\{ k : k < q \text{ and } (P[1..q]).\text{endsWith}(P[1..k]) \}$$

a t c a c a t c a t c a

$\pi[11] = 3$

a t c a c a t c a t c a

a t c a c a t c a t c a

$\pi[12] = 4$

a t c a c a t c a t c a

```

Compute-Prefix-Function( P[1..m] ) {
   $\pi[1] = 0$ ; k = 0
  for ( q = 2 to m ) {
    while ( k > 0 and P[k+1]  $\neq$  P[q] ) {
      k =  $\pi[k]$ 
    }
    if ( P[k+1] == P[q] ) k++
     $\pi[q] = k$ 
  }
  return  $\pi$ 

```

$\Theta(m)$

# Boyer-Moore Matcher

## Knuth-Morris-Pratt (left-to-right)

A STRING SEARCHING EXAMPLE CONSISTING OF ...  
 ... STING

## Boyer Moore (right-to-left)

A STRING SEARCHING EXAMPLE CONSISTING OF ...  
 ... STING

# Boyer-Moore : Two heuristics

T a b a b a **b** a c b d c a c a  
 P a **b** a a c a c

### Bad character

bad-character แนะนำให้  
เลื่อน 3 ตำแหน่ง

T a b a b a **b** a c b d c a c a  
 P a **b** a a c a c

เลือกตัวมาก

### Good suffix

good-suffix แนะนำให้  
เลื่อน 2 ตำแหน่ง

T a b a b a b a c b d c a c a  
 P a b a a c a c

## Bad-Character Heuristics

T a b a b a **b** a c b d c a c a a c a

P a **b** a a c a c

1 2 3 4 5 6 7

bad-character แนะนำให้เลื่อน  $5 - 2 = 3$  ตำแหน่ง

T a b a b a **b** a c b d c a c a a c a

P a **b** a a c a c

$\lambda['b'] = 2$

$\lambda[x] = P[1..m].lastIndexOf(x)$

$\Sigma$	a	b	c	d
$\lambda$	6	2	7	0

## Bad-Character Heuristics

T a b a b a **b** a c b d c a c a a c a

P a **b** a a c a c

1 2 3 4 5 6 7

bad-character แนะนำให้เลื่อน  $5 - 2 = 3$  ตำแหน่ง

T a b a b a b a c b **d** c a c a a c a

เลื่อน 3 ช่อง P a b a a c a c

1 2 3 4 5 6 7

bad-character แนะนำให้เลื่อน  $6 - 0 = 6$

T a b a b a b a c b d c a **c** a c a c

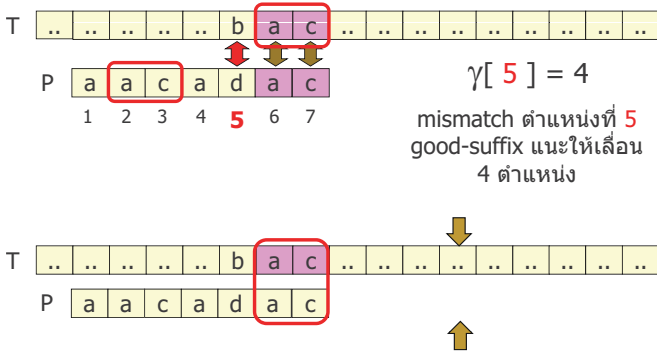
เลื่อน 6 ช่อง P a b a a c a c

1 2 3 4 5 6 7

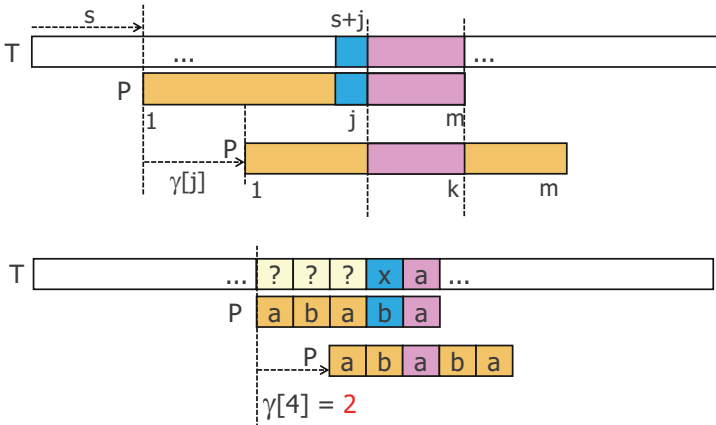
bad-character แนะนำให้เลื่อน  $3 - 7 = -4$  (ignored)

$\Sigma$	a	b	c	d
$\lambda$	6	2	7	0

# Good-Suffix Heuristics

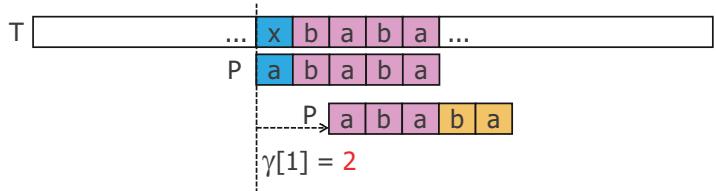
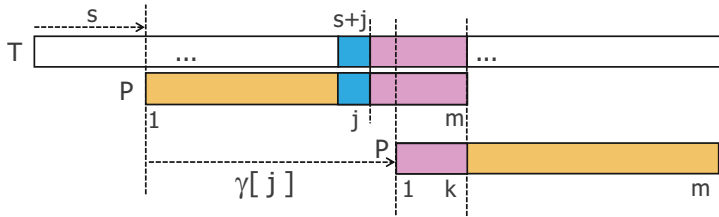


# Good-Suffix Heuristics



$$\gamma[j] = m - \max \{ k : 0 \leq k < m \text{ and } P[1..k].\text{endsWith}(P[j+1..m]) \}$$

# Good-Suffix Heuristics



$$\gamma[j] = m - \max \{ k : 0 \leq k < m \text{ and } P[j+1..m].\text{endsWith}(P[1..k]) \}$$

$$\gamma[j] = m - \max \{ k : 0 \leq k < m \text{ and } P[j+1..m] \sim P[1..k] \}$$

P	A	G	A	G	G	A	G			$\gamma[7] = 1$			
j=6	..	..	..	..	..	A	G	A	G	$\gamma[6] = 7 - 5 = 2$			
j=5	..	..	..	..	A	G	A	G	G	A	G	$\gamma[5] = 7 - 4 = 3$	
j=4	..	..	..	A	G	A	G	G	A	G	$\gamma[4] = 7 - 4 = 3$		
j=3	..	..	A	G	A	G	A	G	A	G	A	G	$\gamma[3] = 7 - 2 = 5$
j=2	..	A	G	A	G	A	G	A	G	A	G	$\gamma[2] = 7 - 2 = 5$	
j=1	A	G	A	G	A	G	A	G	A	G	$\gamma[1] = 7 - 2 = 5$		
j=0	A	G	A	G	A	G	A	G	A	G	$\gamma[0] = 7 - 2 = 5$		

## Boyer-Moore Matcher

```

Boyer-Moore-Matcher(T[1..n], P[1..m], Σ)
λ = LAST-OCCURRENCE(P, m, Σ) // O(|Σ|+m)
γ = GOOD-SUFFIX(P, m) // O(m)
s = 0
while( s ≤ n - m ) {
    j = m
    while( j > 0 and P[j] = T[s+j]) j--
    if (j==0) {
        print( s )
        s = s + γ[0]
    } else {
        s = s + max(γ[j], j - λ[T[s+j]])
    }
}

```

worst :  $O((n - m + 1)m + |\Sigma|)$

best :  $O(n/m + m + |\Sigma|)$

## Boyer-Moore Matcher

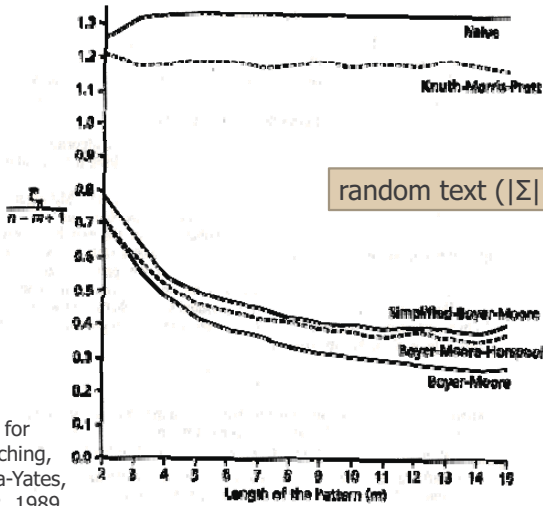
```

Boyer-Moore-Matcher(T[1..n], P[1..m], Σ)
λ = LAST-OCCURRENCE(P, m, Σ)
γ = GOOD-SUFFIX(P, m)
s = 0
while( s ≤ n - m ) {
    j = m
    while( j > 0 and P[j] = T[s+j]) j--
    if (j==0) {
        print( s )
        s = s + γ[0] 1
    } else {
        s = s + max(γ[j], j - λ[T[s+j]]); 1
    }
}
}

```



## ประสิทธิภาพการทำงาน



## ประสิทธิภาพการทำงาน

