การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่งด้วยการปรับลำดับการลงจอด

กรณีศึกษา สนามบินสุวรรณภูมิ

Developing Mathematical Model for Improving Runway's Capacity Using Landing Re-sequencing

Case of Suvarnabhumi Airport

โดยนายณัฏฐาวุฑฒิ์ จิรธัมมวัฒน์ และ ดร.สราวุธ จันทร์สุวรรณ

สาขาการจัดการโลจิสติกส์ คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อดีต

- สายการบินหลัก
- การแข่งขันด้านการบริการ
- ระยะทางไกล
- ชั่วโมงบินยาว
- แบบเครื่องขนาดใหญ่
- การจราจรแออัดตามเส้นทางบิน

ปัจจุบัน

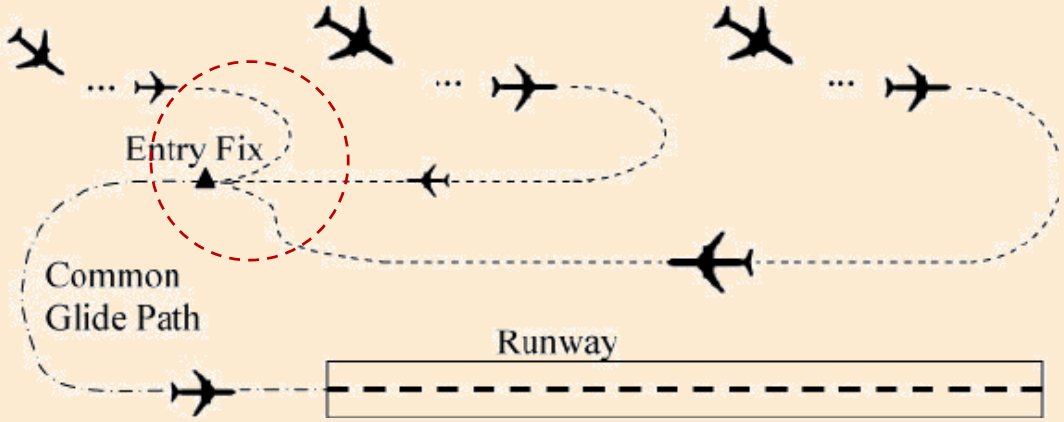
- สายการบินหลัก + สายการบินต้นทุนต่ำ
- การแข่งขันด้านราคา
- ระยะทางสั้น
- ชั่วโมงบินสั้นลง
- แบบเครื่องขนาดกลาง - ใหญ่
- การจราจรแออัดพื้นที่ประชิดสนามบิน

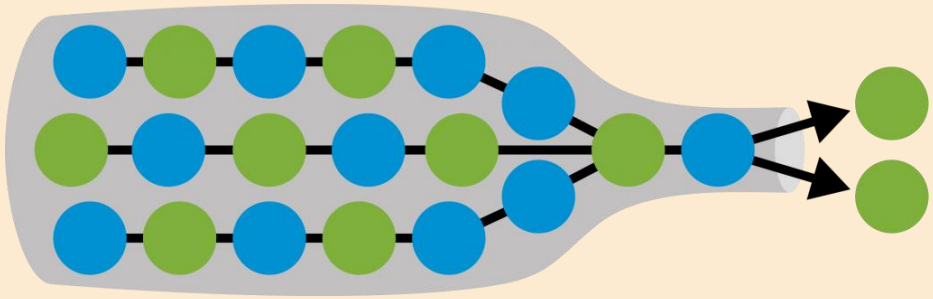
ที่มา : www.airliners.net

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาล่าช้าในการลงจอดของอากาศยาน

- เครื่องเข้ามาจากทุกทิศทาง
- แต่มีเส้นทางเดียวที่เข้าสู่ทางวิ่งได้
- เกิดเป็นสภาวะคอขวด
- อากาศยานที่ต้องรอเกิดการล่าช้า
- และเกิดการล่าช้าสะสมในที่สุด



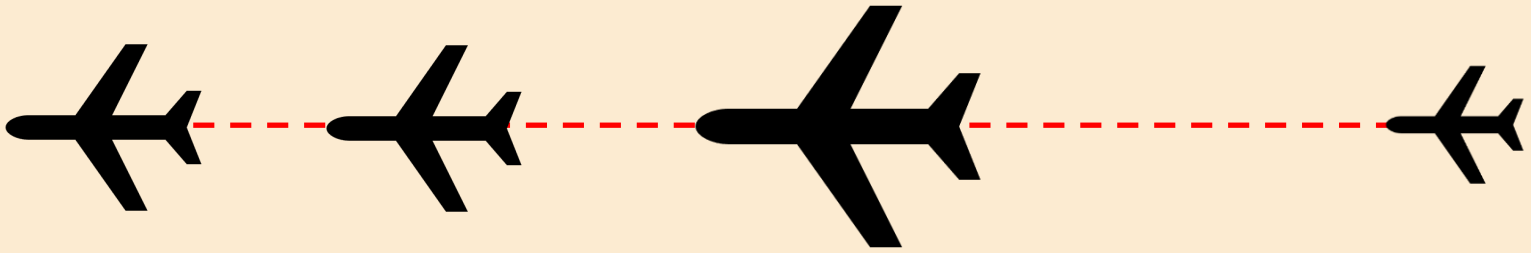


ที่มา : A Ripple-Spreading Genetic Algorithm for the Aircraft Sequencing Problem, Xiao-Bing Hu, 2011

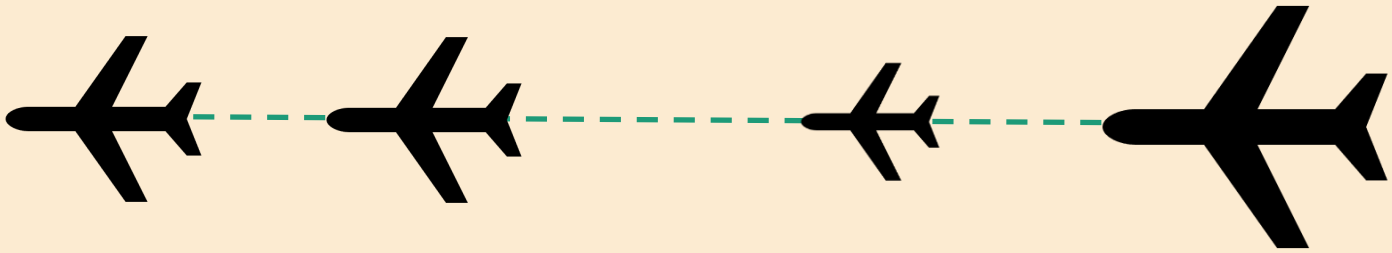
ที่มาและความสำคัญของปัญหา

นโยบายการจัดลำดับลงจอดอากาศยาน

First Come First Serve

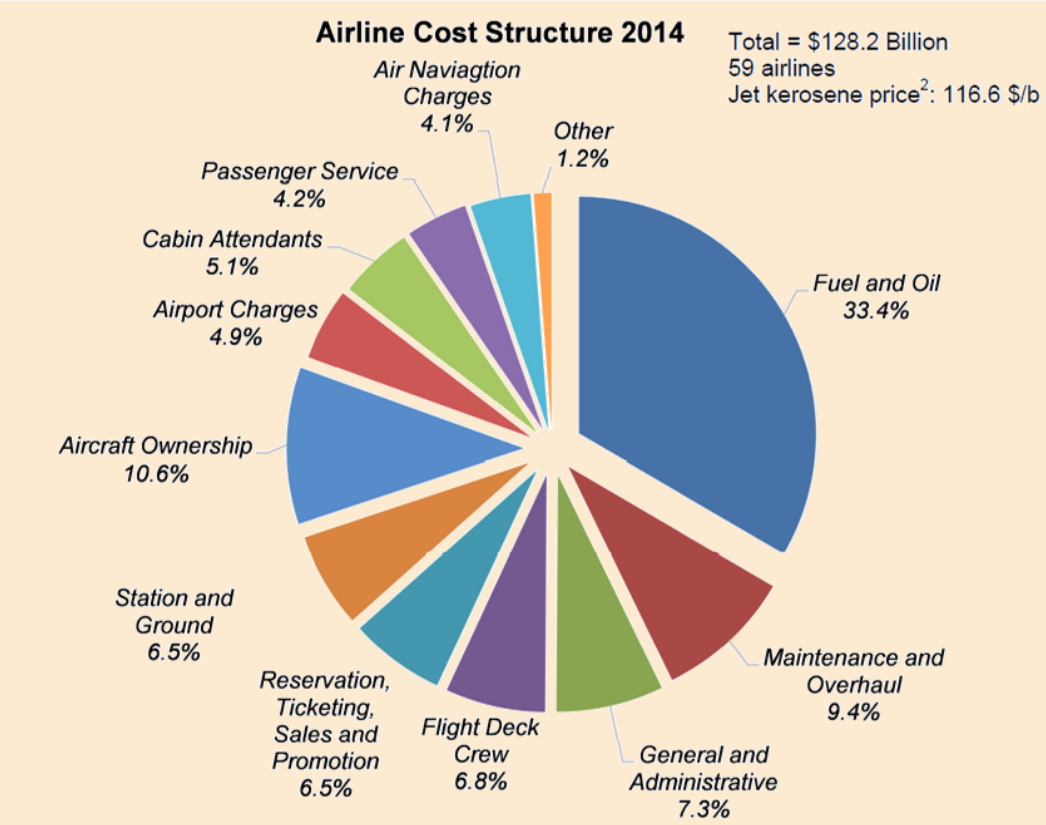


Optimized landing sequence



ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาต่อเนื่องจากการลงจอดล่าช้า

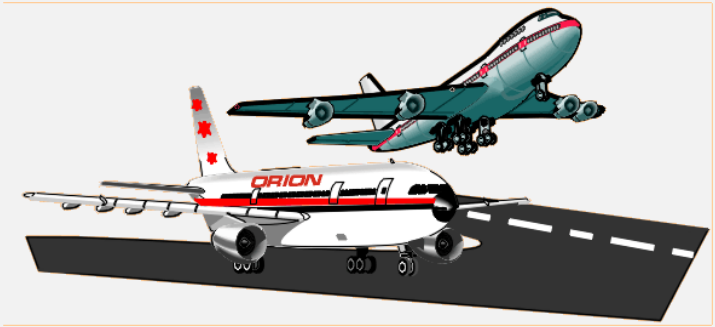


ที่มา : Standard Inputs for EUROCONTROL Cost-Benefit Analyses (2014)

- ปัญหาต้นทุนค่าใช้จ่าย
  - ด้านเชื้อเพลิง
  - ค่าเช่าหรือผ่อนอากาศยาน
  - ด้านค่าธรรมเนียมสนามบิน
  - ค่าใช้จ่ายด้านค่าจ้างพนักงาน
  - ด้านค่าซ่อมบำรุงรักษา
- ปัญหาความไม่มีประสิทธิภาพในการทำงานของหน่วยสนับสนุนการบินต่าง ๆ
- ปัญหามลภาวะ

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

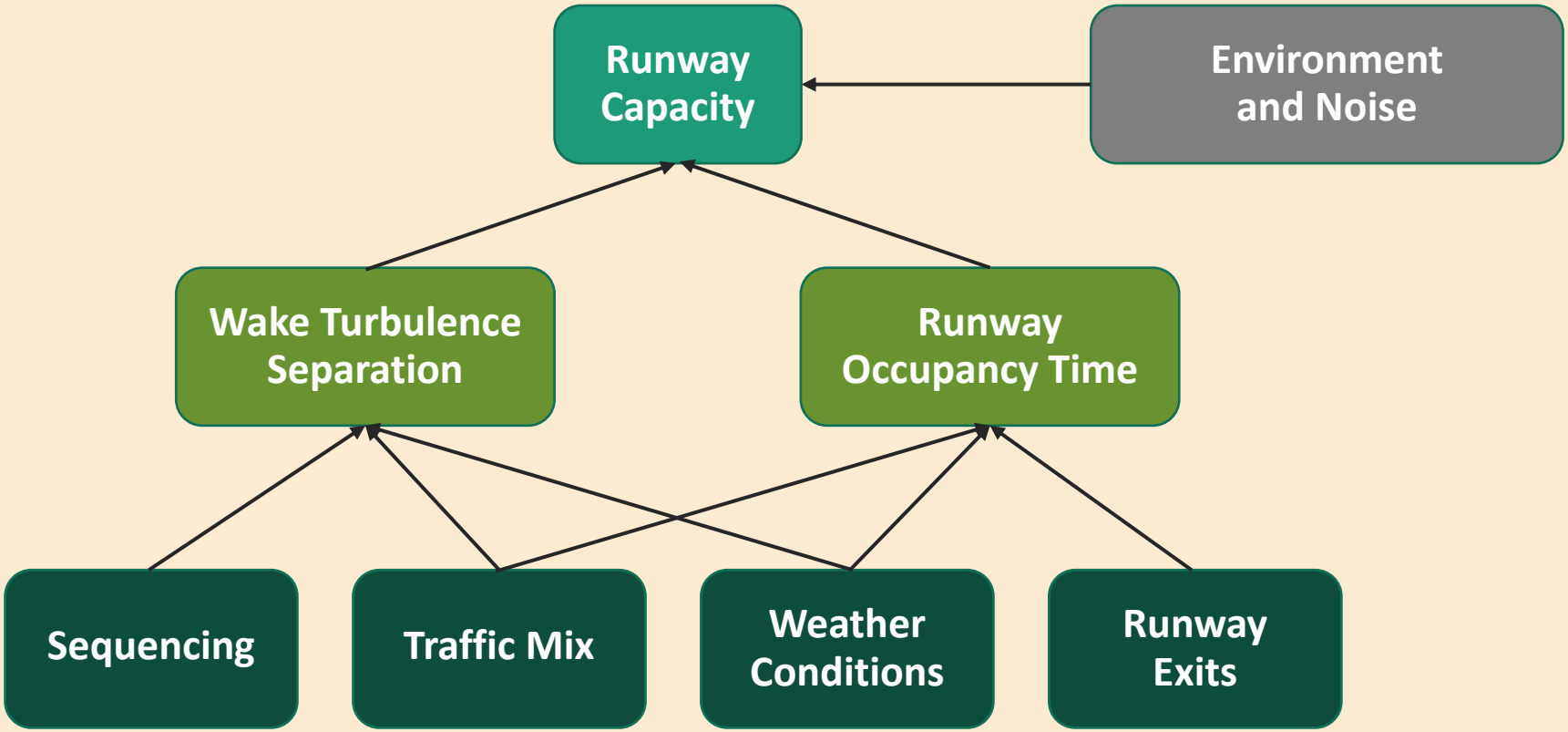
พัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในกาจัดลำดับการลงจอดเพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่ง



ประยุกต์เป็นเครื่องมือสำหรับช่วยเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศจัดลำดับอากาศยาน

ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

ปัจจัยที่มีผลต่อความจุของทางวิ่ง

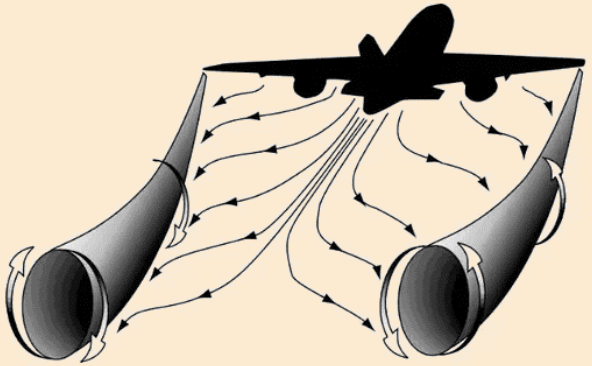


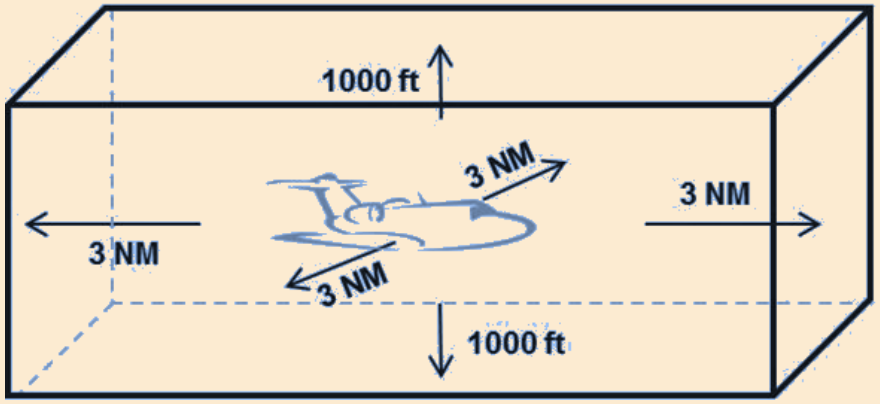
ที่มา : The Influence of Runway Occupancy Time and Wake Vortex Separation Requirements on Runway Throughput, Tamas Kolos-Lakatos, 2011

ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

การจัดระยะห่างขั้นต่ำระหว่างอากาศยานพิจารณาจากกระแสอากาศปั่นป่วน (Wake Turbulence Separation)

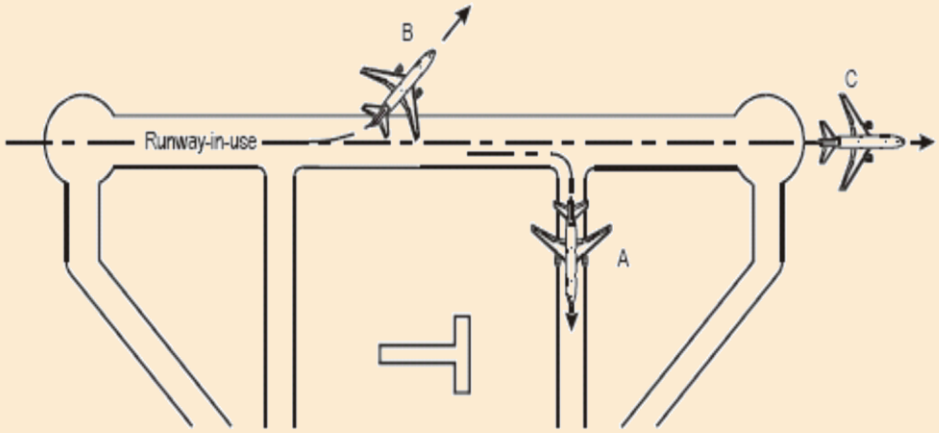
ประเภทของอากาศยานพิจารณาจากมวลสูงสุดที่วิ่งขึ้นได้		ระยะห่าง (ไมล์ทะเล)
อากาศยานตามหลัง	อากาศยานนำหน้า	
หนัก (H)	หนัก (H)	4
กลาง (M)	หนัก (H)	5
เบา (L)	หนัก (H)	6
เบา (L)	กลาง (M)	5
หนัก (H)	หนักมาก (S)	6
กลาง (M)	หนักมาก (S)	7
เบา (L)	หนักมาก (S)	8
นอกเหนือจากกรณีที่กล่าวมา		3



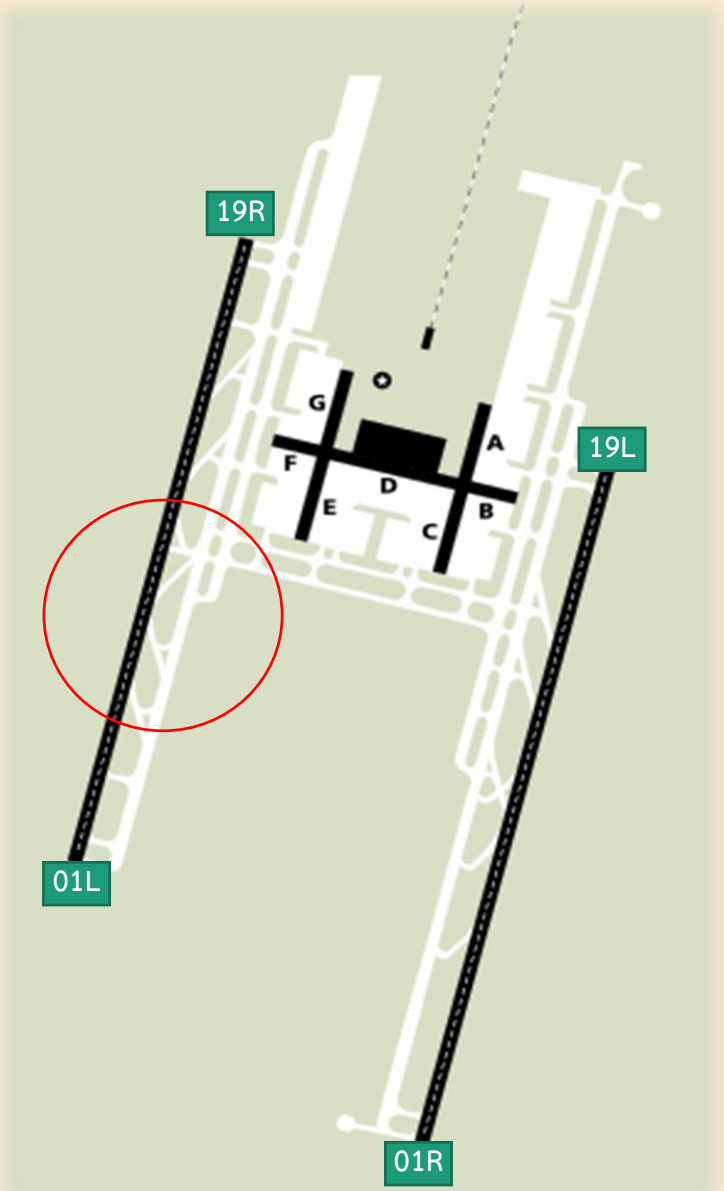


ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

ระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่ง (Runway Occupancy Time)



อากาศยานลำหน้าจะต้องพ้นจากทางวิ่ง
โดยวิธีใดวิธีหนึ่งจาก 3 วิธีข้างต้น

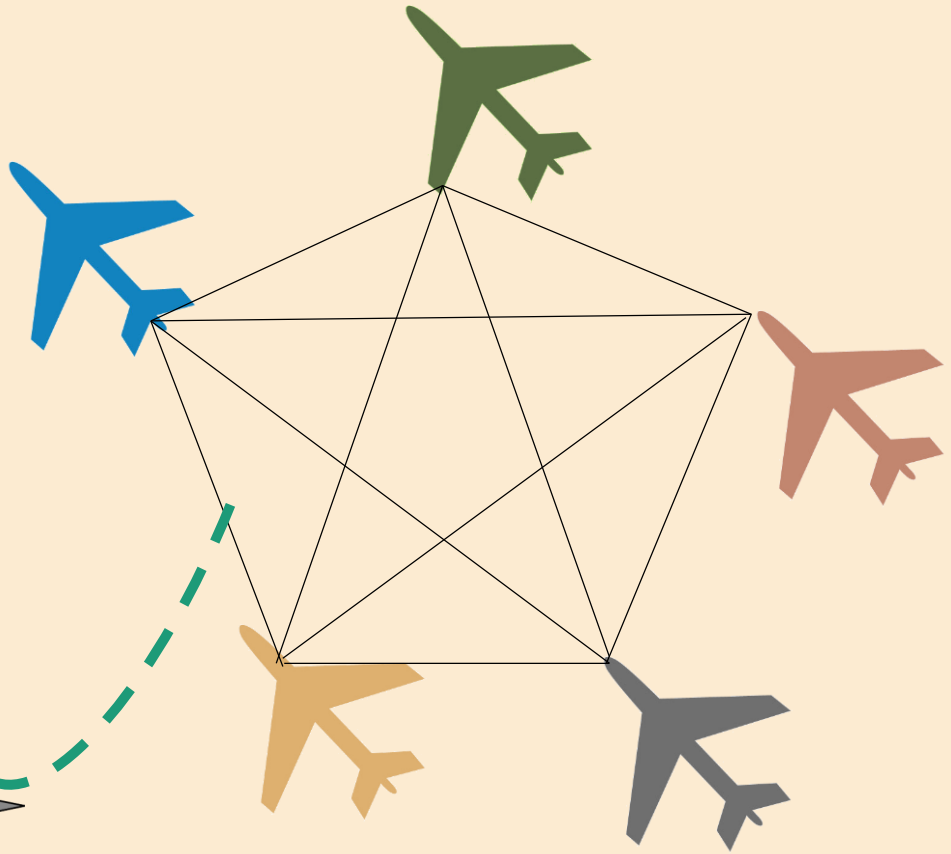


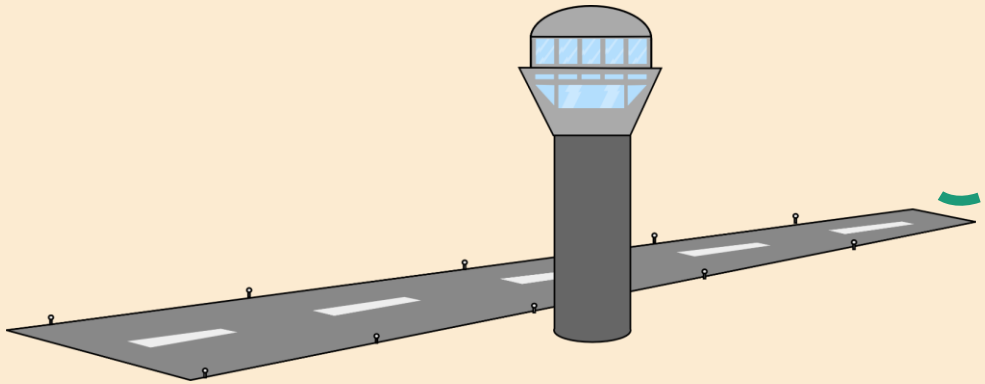
ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย

(Travelling Salesman Problem)

City/City	1	2	3	4	5	6
1	0	10	100	50	33	66
2	10	0	22	86	952	3
3	100	22	0	6	86	2
4	50	86	6	0	5	4
5	33	952	86	5	0	9
6	66	3	2	4	9	0





งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	ประเด็นที่ศึกษา
Psaraftis (1978)	A Dynamic Programming Approach to the Aircraft Sequencing Problem	- ใช้การจัดลำดับโดยกำหนดให้อากาศยานทุกลำอยู่ในสถานะพร้อมที่จะลงจอด
Luenberger (1988)	A Traveling-Salesman-Based Approach to Aircraft Scheduling in the Terminal Area	- ใช้ Open TSP ในการจัดลำดับอากาศยาน
H. Lee and H. Balakrishnan (2008)	Fuel Cost, Delay and Throughput Tradeoffs in Runway Scheduling	- จัดลำดับการลงจอดเพื่อลดต้นทุน
Kolos-Lakatos (2011)	The Influence of Runway Occupancy Time and Wake Vortex Separation Requirements on Runway Throughput	- เปรียบเทียบอิทธิพลระหว่างการจัดระยะห่างจากกระแสลมวนกับระยะเวลาการครอบครองทางวิ่ง
Mesgarpour, Potts, Bennell (2010)	Models for Aircraft Landing Optimization	- จัดลำดับอากาศยานลงจอดเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์หลายเป้าหมาย

การศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวแปรอิสระ (Variables)

SLT_i **เวลาในการลงจอดของอากาศยาน i**

X_{ij} **มีค่าเป็น 1 ในกรณีที่อากาศยาน i ลงจอดก่อนอากาศยาน j (ไม่จำเป็นต้องเป็นลำดับที่ต่อเนื่องกัน) และมีค่าเป็น 0 หากเป็นอย่างอื่น**

Set

n จำนวนอากาศยานขาเข้าที่จะได้รับการจัดลำดับ

A ชุดของอากาศยานขาเข้าที่จะได้รับการจัดลำดับ โดย $A = \{1, \dots, n\}$

ตัวแปรควบคุม (Parameters)

SLT_j เวลาในการลงจอดของอากาศยานที่ลงต่อจากอากาศยาน i ในทันที

TLT_i เวลาคาดหมายว่าจะได้ลงจอดของอากาศยาน i ตามที่ระบุไว้ในแผนการบิน

D_i ระยะเวลาลงจอดล่าช้าของอากาศยาน i (เกินกว่า TTL_i)

T_{ij} ระยะห่างขั้นต่ำที่ปลอดภัยในการลงจอดระหว่างอากาศยาน i และอากาศยาน j ในหน่วยวินาที

S_{ij} ระยะห่างขั้นต่ำที่ปลอดภัยระหว่างอากาศยาน i และอากาศยาน j พิจารณาจากกระแสอากาศปั่นป่วนในหน่วยวินาที

ROT_i ระยะเวลาครอบครองทางวิ่งของอากาศยาน i นับจากเวลาที่อากาศยานข้ามจุดเริ่มต้นของทางวิ่ง (Runway Threshold) กระทั่งเลี้ยวออกพ้นจุดรอบนทางขับ (Runway Holding Point)

V_i เวลาในช่วงสุดท้ายเข้าสู่ทางวิ่ง (Final Approach Speed) ของอากาศยาน i

V_j เวลาในช่วงสุดท้ายเข้าสู่ทางวิ่ง (Final Approach Speed) ของอากาศยาน j

r ความยามของช่วงสุดท้ายเข้าสู่ทางวิ่ง (Final Approach Length)

EF_i ปริมาณการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยาน i เมื่ออากาศยาน i ในระยะเวลาลงจอดล่าช้าของอากาศยาน i

FB_i อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยาน i ในระยะเวลาลงจอดล่าช้าของอากาศยาน i ในหน่วยลิตรต่อวินาที

ER อัตราการปล่อย CO_2 ของกากาศยานในหน่วยกิโลกรัม/ลิตร (เชื้อเพลิง)

ET_i ระยะเวลาที่อากาศยาน i สามารถทำการบินอยู่ได้ภายหลังจากที่เวลาล่วงเลย TTL_i มาแล้ว โดยพิจารณาจากปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่

PT ระยะเวลาที่ล่าช้าที่สุดที่จะอนุญาตให้อากาศยานลงจอดได้ซึ่งเป็นนโยบายของเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศ

C_{t1} ต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานที่ต้องขาดรายได้จากการรองรับจำนวนเที่ยวบินได้ลดลงต่อหน่วยเวลา 1 วินาที

C_{t2} ต้นทุนส่วนเกินที่สายการบินจะต้องจ่ายเพิ่มขึ้นเมื่ออากาศยานลงจอดช้ากว่าเวลาที่วางแผนไว้ต่อหน่วยเวลา 1 วินาที

C_{em} ค่าปรับที่สายการบินจะต้องจ่ายในกรณีที่มีการปล่อย CO_2 มากขึ้นจากการลงจอดล่าช้าต่อหน่วยกิโลกรัม

สมการเป้าหมาย

$$Min\ Z = W_1 \cdot C_{t1} \cdot \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} SLT_i + \quad W_2 \cdot C_{t2} \cdot \sum_{i=1}^{n} D_i + \quad W_3 \cdot C_{em} \cdot \sum_{i=1}^{n} D_i \cdot FB_i \cdot ER$$

ด้านการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับทางวิ่ง

$$Average\ Landing\ Time = W_1 \cdot C_{t1} \cdot \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} SLT_i$$

ด้านการลดปัญหาการล่าช้าของการลงจอด

$$\text{Total Delay } \left(\sum_{i=1}^{n} D_i\right) = W_2 \cdot C_{t2} \cdot \sum_{i=1}^{n} D_i$$

ด้านการลดปัญหามลพิษอันเกิดจากการลงจอดที่ล่าช้า

$$Excess\ Fuel\ Pollution\ (EF_i) = W_3 \cdot C_{em} \cdot \sum_{i=1}^{n} D_i \cdot FB_i \cdot ER$$

ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการข้อจำกัด

$$X_{ij} + X_{ji} = 1 \ \forall i, j \in A, i \neq j$$

ข้อจำกัดเพื่อแก้ปัญหาการจัดลำดับซ้ำซ้อน

$$X_{ij} \in \{0,1\}, i \neq j$$

ข้อจำกัดด้านการเลือกลำดับอากาศยาน

$$ELT_i \leq SLT_i \leq TLT_i$$

ข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการลงจอด

$$D_i = SLT_i - ELT_i \leq \min[ET_i, PT]$$

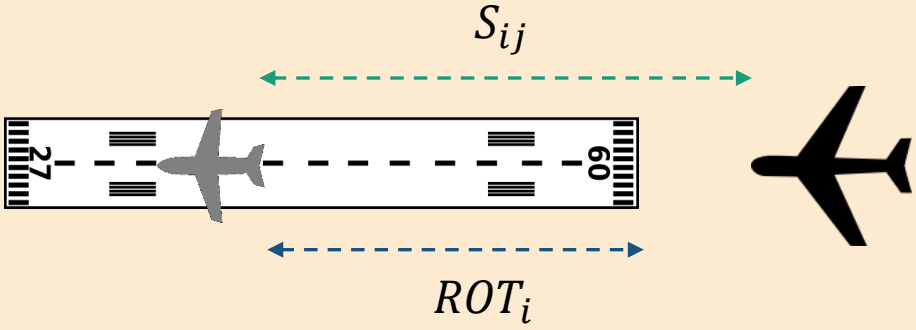
ข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการลงจอดล่าช้า

ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

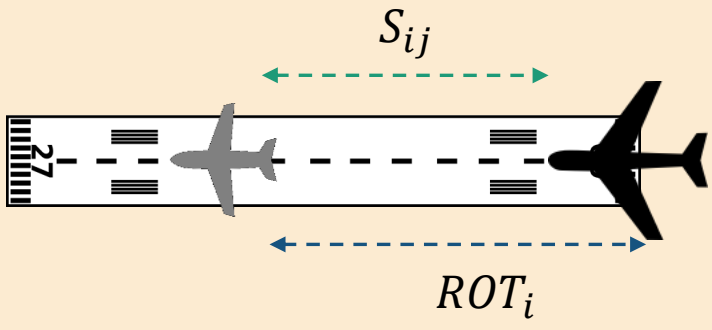
ข้อจำกัดเพื่อการจัดระยะห่างที่ปลอดภัยในการลงจอดของอากาศยาน

$$SLT_i + T_{ij} \leq SLT_j + M(1 - X_{ij}) \;\; \forall i, j \in A, i \neq j, M \geq 0$$

$v_i > v_j$



$v_i \leq v_j$



$$T_{ij} = \begin{cases} max\left[\frac{r + S_{ij}}{v_j} - \frac{r}{v_i}, ROT_i\right] \; when \; v_i > v_j \\ max\left[\frac{S_{ij}}{v_j}, ROT_i\right] \; when \; v_i \leq v_j \end{cases}$$

ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

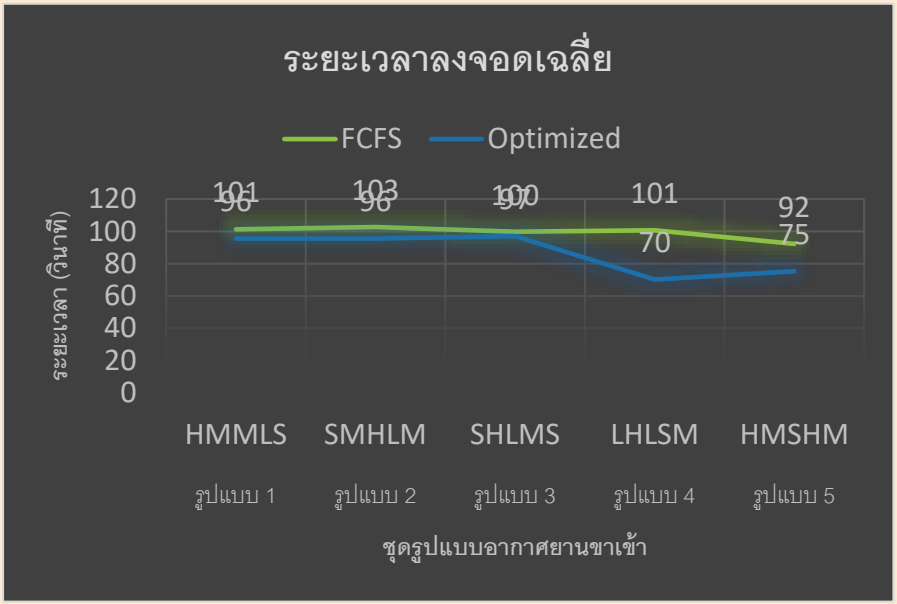
	ลำดับที่ 1	ลำดับที่ 2	ลำดับที่ 3	ลำดับที่ 4	ลำดับที่ 5
รูปแบบ 1	H	M	M	L	S
รูปแบบ 2	S	M	H	L	M
รูปแบบ 3	M	S	H	L	S
รูปแบบ 4	L	H	L	S	M
รูปแบบ 5	H	M	S	H	M

	ลำดับที่ 1	ลำดับที่ 2	ลำดับที่ 3	ลำดับที่ 4	ลำดับที่ 5
เวลาลงจอดคาดหมาย	0	60	90	120	150
นโยบายการล่าช้า	≤480	≤480	≤480	≤480	≤480

ขนาดอากาศยาน	ระยะเวลาครอบครองทางวิ่ง (วินาที)	ความเร็ว (Kts)	อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิง (kg/s)
S	50	180	1
H	45	170	0.8
M	45	160	0.5
L	40	150	0.3

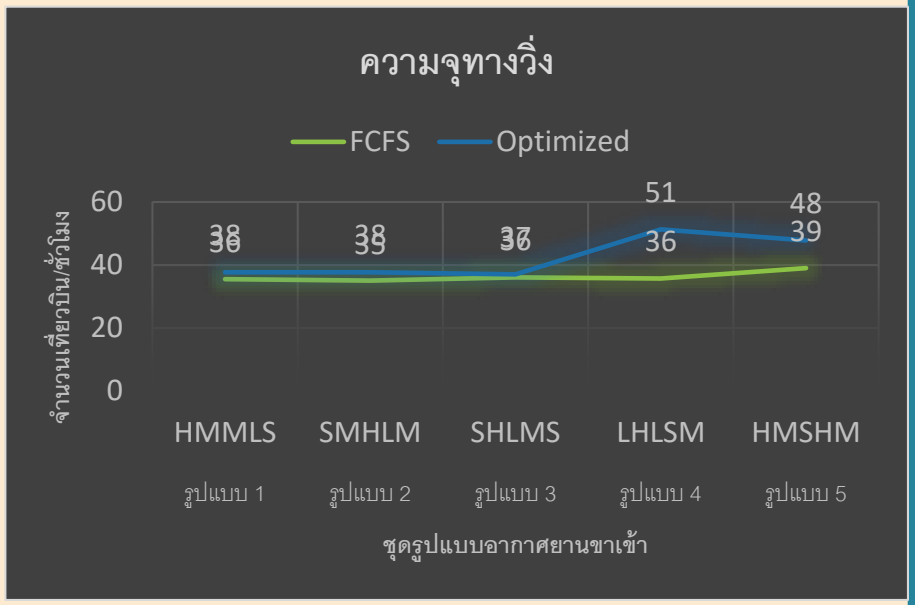
Setting

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



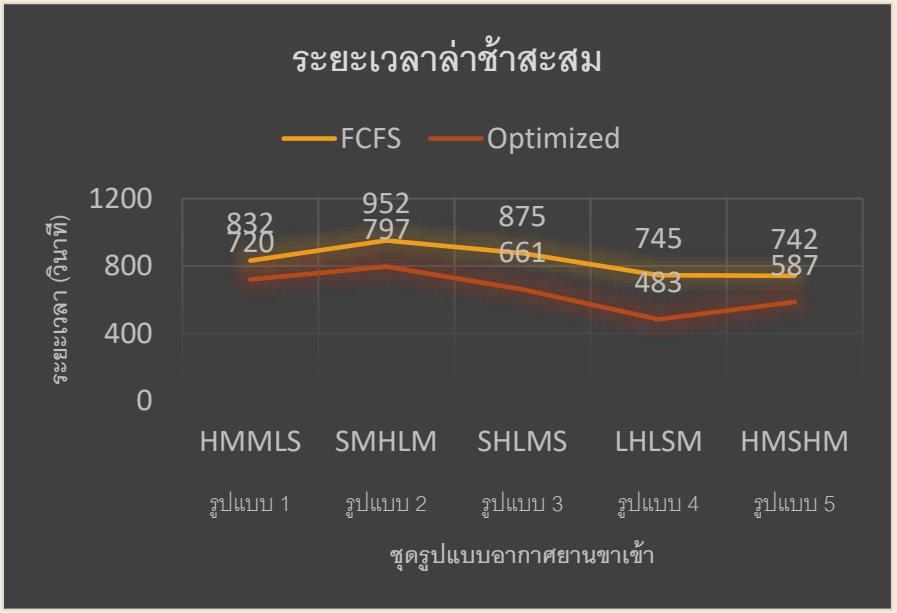
การจัดลำดับอากาศยานใหม่ทำให้ระยะห่างระหว่างอากาศยานแต่ละลำลดลง

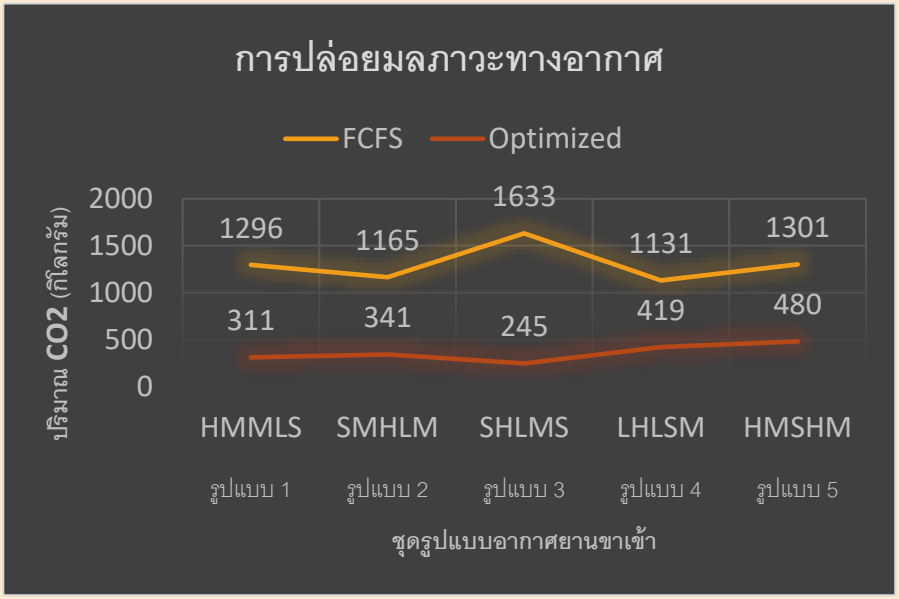
Maximize Capacity by
Minimize Average Landing Time



การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

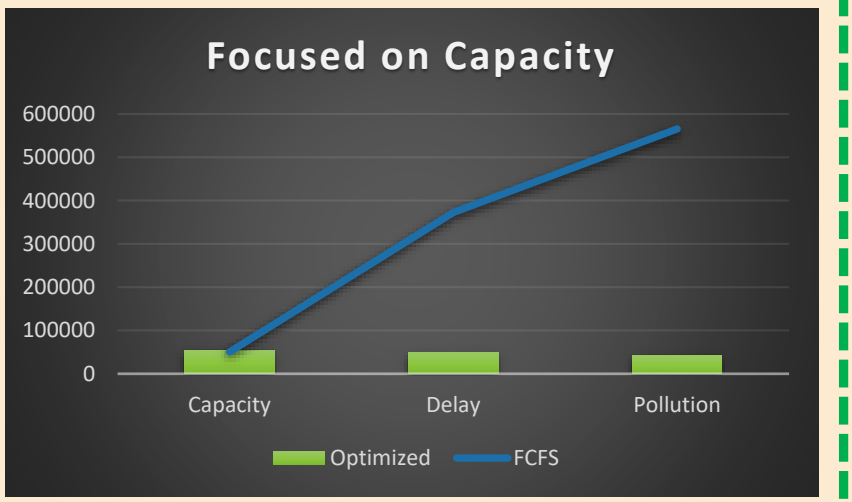
อากาศยานทุกลำมีโอกาสล่าช้า
แต่การล่าช้าโดยรวมลดลง

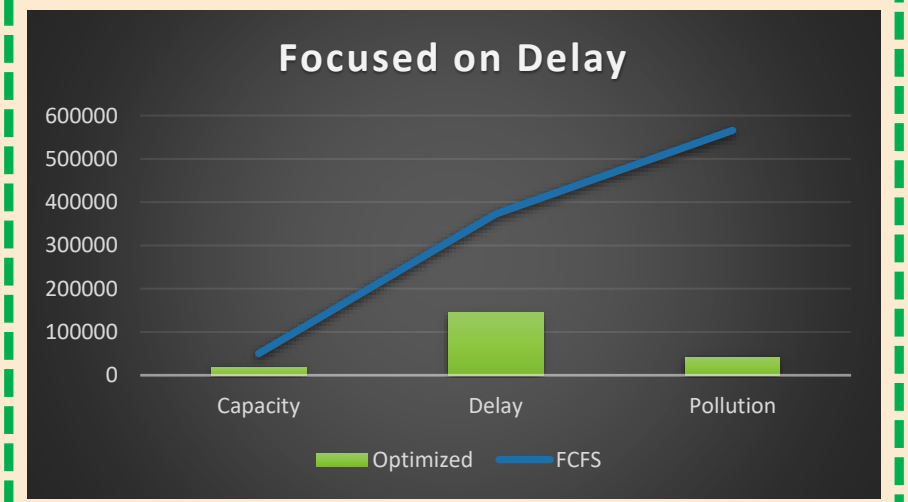


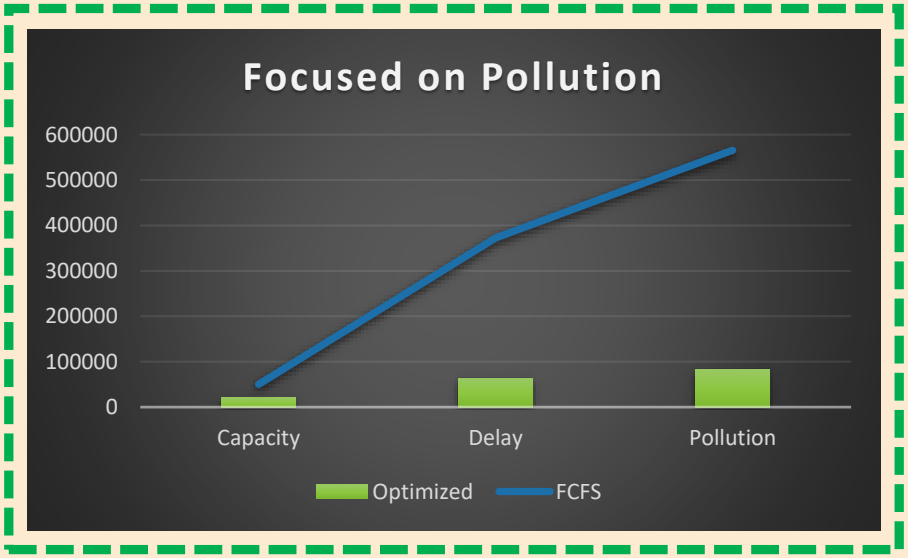


การปล่อยมลภาวะอากาศแปรผันตรงกับ
ระยะเวลาล่าช้า และแปรผันตามขนาด
อากาศยาน

เปรียบเทียบค่าถ่วงน้ำหนักในลักษณะต่าง ๆ





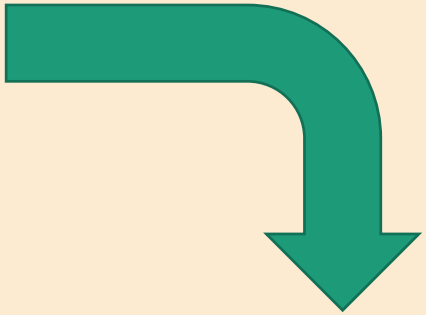


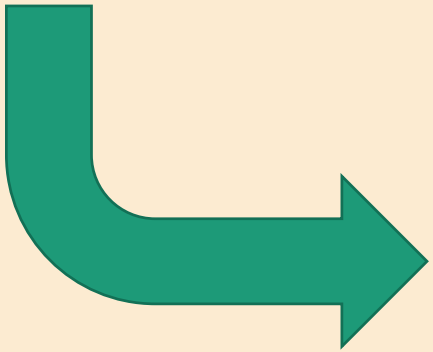
การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่งด้วยการปรับลำดับการลงจอด
กรณีศึกษา สนามบินสุวรรณภูมิ

สรุปผลการศึกษา

ความสำเร็จในปัจจุบัน

- พิสูจน์ได้ว่า First Come First Serve ไม่ใช่นโยบายที่ดีที่สุดในการจัดลำดับอากาศยานลงจอด
- การจัดลำดับอากาศยานลงจอดใหม่ สามารถเพิ่มความจุของทางวิ่งได้ รวมถึงสามารถช่วยอนุรักษ์ทรัพยากร คือ ต้นทุน เวลา และทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ





การพัฒนาต่อไปในอนาคต

- ใช้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น
- เพิ่มความสามารถในการคำนวณโดยใช้โปรแกรมที่มีศักยภาพ
- พัฒนาให้เกิดความต่อเนื่องกระทั่งสามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้