



การปรับปรุงการออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กชนิดเบต้า  
โดยใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์

Design improvement of a small beta-type Stirling engine  
using Artificial immune system

นายจเรศักดิ์ พลเสนา รหัส 53361825  
นายประกายทอง พองงาม รหัส 53362075  
นายภาณุเดช สงชัย รหัส 53362136

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 20 ก.ค. 2558
เลขทะเบียน..... 1691 4066
เลขเรียกหนังสือ..... 210
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 185

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ปีการศึกษา 2556



## ใบรับรองโครงการงาน

ชื่อหัวข้อโครงการงาน : การปรับปรุงการออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก  
ชนิดเบต้าโดยใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์  
Design improvement of a small beta-type Stirling  
engine using Artificial immune system

ผู้ดำเนินโครงการงาน : นายจรศักดิ์ พลเสนา รหัสนิสิต 53361825  
นายประกายทอง พ่องงาม รหัสนิสิต 53362075  
นายภาณุเดช สงชัย รหัสนิสิต 53362136

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ขวัญชัย ไกรทอง  
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา : 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะกรรมการสอบโครงการงาน

..... ประธานกรรมการ  
(ผศ. ดร. ขวัญชัย ไกรทอง)

..... กรรมการ  
(ดร. นินนาท ราชประดิษฐ์)

..... กรรมการ  
(ผศ. ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

หัวข้อโครงการ	: การปรับปรุงการออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก ชนิดเบต้าโดยใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ Design improvement of a small beta-type Stirling engine using Artificial immune system
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายจรศักดิ์ พลเสนา รหัสนิสิต 53361825 นายประกายทอง พองงาม รหัสนิสิต 53362075 นายภาณุเดช สงชัย รหัสนิสิต 53362136
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	: ผศ. ดร. ขวัญชัย ไกรทอง
สาขาวิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	: 2556

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อการปรับปรุงการออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกันปานกลางเพื่อเพิ่มค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ชนิด Second-order ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Quasi Steady Flow ร่วมกับการหาจุดออกแบบที่เหมาะสมด้วยวิธีภูมิคุ้มกันประดิษฐ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB และทำการวิเคราะห์ชุดพารามิเตอร์ที่ได้จากการหาค่าจุดออกแบบที่เหมาะสมด้วยวิธีภูมิคุ้มกันประดิษฐ์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตัวแปรเพื่อตรวจสอบผล

ผลการคำนวณค่ากำลังจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สภาพการทำงานของเครื่องยนต์ที่ทำงานโดยใช้สารทำงานเป็นอากาศดัดนี้ ทำงานที่ความดันเฉลี่ย 7 bar ได้รับความร้อนจากภายนอกในส่วนให้ความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ  $500^{\circ}\text{C}$  และส่วนระบายความร้อนใช้น้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับ  $35^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 360 rpm ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ โดยค่าทำนายของกำลังบ่งชี้เท่ากับ 131.3 W และสามารถนำมาคำนวณค่ากำลังเพลเท่ากับ 105.04 W โดยคิดค่าประสิทธิภาพทางกลเท่ากับ 0.8 เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดย Sripakagorn and Srikam [2] ที่ได้ค่ากำลังเพลออกมาเท่ากับ 95.4 W จากการหาค่าความเหมาะสมที่สุดสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่ได้กำหนดเป็นพารามิเตอร์ออกแบบสำหรับการหาค่าความเหมาะสมที่สุดถูกนำเสนอ ได้แก่ ความยาวของส่วนรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับ 0.0493 m ความยาวของส่วนให้ความร้อนเท่ากับ 0.0457 m ความกว้างของร่องของส่วนให้ความร้อนเท่ากับ 0.0004 m ความกว้างของร่องของส่วนระบายความร้อนเท่ากับ 0.0005 m ความลึกของร่องของส่วน

ให้ความร้อนเท่ากับ 0.0030 m และความลึกของร่องของส่วนระบายความร้อนเท่ากับ 0.0026 m จากการคำนวณพบว่าค่ากำลังบ่งชี้ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 148.19 W และค่ากำลังเพลาท่ากับ 118.55 W โดยคิดค่าประสิทธิภาพทางกลเท่ากับ 0.8 ที่แอนติบอดีรุ่นที่ 22 และพบความสอดคล้องจากผลของการวิเคราะห์ตัวแปรของชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ที่ได้จากการหาค่าจุดออกแบบที่เหมาะสมด้วยวิธีภูมิคุ้มกันประติษฐ์



Project title : Design improvement of a small beta-type Stirling engine using Artificial immune system

Name : Mr. Jaresuk Pholsena ID. 53361825  
Mr. Prakaythong Fongngam ID. 53362075  
Mr. Panudach Songkhai ID. 53362136

Project Adviser : Asst. Prof. Dr. Kwanchai Kraitong

Academic Year : 2013

---

### Abstract

This project aims to improve the design of a small beta-type Stirling engine operating at medium temperature difference for performance achievement of the engine using a second-order one-dimensional mathematical model with quasi steady flow analysis coupled to an optimization method namely Artificial immune system (AIS). All codes were implemented in MATLAB. Moreover, a set of optimal parameters obtained from AIS was analysed by parametric analysis for the accuracy checking process.

The numerical result obtained from a mathematical model simulating the air engine under the working condition such as the average working pressure of 7 bar, the heater temperatures of, the water cooler temperature of 35°C and the engine speed of 360 rpm were compared to the experimental result obtained from the testing rig by Sripakaorn and Srikam [2]. It was found that an acceptable value of the predicted indicated power of 131.3 W that leads to the predicted brake power of 105.04 W where the mechanical efficiency being 0.8 when compared to the experimental result of 95.4 W. From optimisation calculation, six engine parameters defined as the optimal parameters were presented as follows; the length of regenerator being 0.0493 m, the length of heater being 0.0457 m, the width of heater slot being 0.0004 m, the width of cooler slot being 0.0005 m, the depth of heater slot being 0.0030 m and the depth of cooler slot being 0.0026 m. From the

numerical calculation, it showed the maximum indicated power is 148.19 W and the predicted brake power of 118.55 W where the mechanical efficiency being 0.8 at 22<sup>nd</sup> generation. There are the good agreement between the results from the parametric analysis and the results from the AIS optimisation.



## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินโครงการขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ขวัญชัย ไกรทอง ที่ได้ให้คำปรึกษาจนโครงการประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ ดร. นินนาท ราชประดิษฐ์ และ ผศ. ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว

และขอขอบคุณบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ คณะผู้ดำเนินโครงการทั้งหมดขอกราบขอบพระคุณผู้ให้กำเนิดทั้งบิดามารดาที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้ดำเนินงานตลอดมา



นายจเรศักดิ์ พลเสนา  
นายประกายทอง พองงาม  
นายภาณุเดช สงชัย

## สัญลักษณ์

## Symbols

A	พื้นที่ ( $m^2$ )
$C_p$	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ( $J/ kgK$ )
$C_v$	ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ ( $J/ kgK$ )
$N_{pop}$	จำนวนแอนติบอดี
Nu	Nusselt number
$\bar{Nu}$	mean Nusselt number
P	กำลัง (W)
Pr	Prandtl number
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
R	ค่าคงที่ของก๊าซ
Re	Reynolds number
$\bar{Re}$	mean Reynolds number
T	อุณหภูมิ (K)
U	ความเร็ว (m/s)
V	ปริมาตร ( $m^3$ )
W	งาน (J)
$X_{rate}$	อัตราการอยู่รอดของแอนติบอดี
$X_{mutate}$	อัตราการเกิด mutation
$D_h$	Hydraulic diameter (m)
$e_{eff}$	ประสิทธิภาพของรีเจนเนอเรเตอร์ (%)
f	ความถี่ (Hz)
$f_c$	friction factor
$f_r$	Reynolds friction coefficient
g	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ( $m/s^2$ )
h	ประสิทธิภาพการพาความร้อน ( $W/ m^2K$ )
k	ประสิทธิภาพการนำความร้อน ( $W/mK$ )



l	ความยาว (m)
maxvalue	ค่ากำลังบ่งชี้ที่มากที่สุดในแต่ละรุ่นของแอนติบอดี
m	มวล (kg)
ṁ	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
p	ความดัน (Pa)
$\Delta p$	ความดันตกคร่อม (Pa)
t	เวลา (sec)
value	ค่ากำลังบ่งชี้ของแอนติบอดี
lr	ความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์ (m)
Wh	ความกว้างของร่อง slot ของส่วนให้ความร้อน (m)
Wk	ความกว้างของร่อง slot ของส่วนระบายความร้อน (m)
Deeph	ความลึกของร่อง slot ของส่วนให้ความร้อน (m)
Deepk	ความลึกของร่อง slot ของส่วนระบายความร้อน (m)
lh	ความยาวของส่วนให้ความร้อน (m)
lk	ความยาวของส่วนระบายความร้อน (m)

### Subscripts

C	ส่วนระบายความร้อน
D	ลูกสูบดิสเพลสเซอร์
H	ส่วนให้ความร้อน
P	ลูกสูบกำลัง
S	ปริมาตรกวาด
T	total
c	ส่วนอัด
d	ปริมาตรคงที่
e	ส่วนขยาย
free	พื้นที่การไหลอิสระ
g	สารทำงาน
h	พื้นที่การถ่ายเทความร้อน
i	ค่าบ่งชี้

b	เพลลา
l	พื้นที่หน้าตัด
loss, disip	ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการไหลในส่วนของรีเจเนอเรเตอร์
loss, lir	ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการนำความร้อน
m	matrix ในส่วนรีเจเนอเรเตอร์
r	ส่วนรีเจเนอเรเตอร์
0	บรรยากาศ
mech	เชิงกล

### Greek Symbols

$\varphi$	Phase angle
$\mu$	ความหนืดไดนามิก (Pa.s)
$\theta$	มุมก้านสูบ
$\rho$	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )
$\omega$	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
$\gamma$	อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ
$\eta$	ประสิทธิภาพ

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ช
สัญลักษณ์	ซ
สารบัญ	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ตารางระยะเวลาการปฏิบัติงาน	2
1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน	3
1.7 อุปกรณ์ที่ใช้	3
1.8 งบประมาณ	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	4
2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine)	4
2.2 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน (Physical model)	7
2.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ	9
2.4 ภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ (Artificial immune system)	21

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 แผนการดำเนินงาน	28
3.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	28
3.2 การหาจุดออกแบบที่เหมาะสม	28
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	34
4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	34
4.2 การหาจุดออกแบบที่เหมาะสม	35
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	41
5.1 สรุปผล	41
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	
Artificial immune system MATLAB code	46
ประวัติผู้จัดทำโครงการ	53

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟา	5
รูปที่ 2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า	5
รูปที่ 2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา	6
รูปที่ 2.4 T-s and P-v diagrams ของวัฏจักรสเตอร์ลิง	6
รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าขนาดเล็ก	8
รูปที่ 2.6 ผังการไหลของสารทำงานของแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ	10
รูปที่ 2.7 การประสานงานของเซลล์บี เซลล์ที และแอนติเจน	23
รูปที่ 2.8 การจับคู่กันของแอนติเจนกับแอนติบอดี	24
รูปที่ 2.9 การแสดงหลักเลือกโคลนอล	25
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมแบบภูมิคุ้มกันประดิษฐ์	29
รูปที่ 4.1 ค่าที่มากที่สุดของค่ากำลังบ่งชี้ในแต่ละรุ่นของแอนติบอดี	35
รูปที่ 4.2 ค่ากำลังบ่งชี้กับความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์	37
รูปที่ 4.3 ค่ากำลังบ่งชี้กับความกว้างของร่อง slot ในส่วนให้ความร้อน	37
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังบ่งชี้กับความลึกของร่อง slot ในส่วนให้ความร้อน	38
รูปที่ 4.5 ค่ากำลังบ่งชี้กับความลึกของร่อง slot ในส่วนระบายความร้อน	38
รูปที่ 4.6 ค่ากำลังบ่งชี้กับความกว้างของร่อง slot ในส่วนระบายความร้อน	39
รูปที่ 4.7 ค่ากำลังบ่งชี้กับความยาวของส่วนให้ความร้อน	39

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 รายการปฏิบัติงาน	3
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเฉพาะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กชนิดเบนต้า	9
ตารางที่ 2.2 Nusselt numbers and friction factors for fully developed laminar flow in tubes of differing cross section.	17
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติงาน	35
ตารางที่ 4.2 ค่าจุดออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบนต้า ทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกันกลาง	36



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล ซึ่งพลังงานความร้อนนั้นได้มาจากแหล่งพลังงานหลายแหล่งได้แก่ พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ เชื้อเพลิงปิโตรเลียมและพลังงานความร้อนจากพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล ทำให้หลายปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยสนใจในการวิจัยและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกทดแทนพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม เพื่อใช้แก้ปัญหาวิกฤติพลังงานในปัจจุบัน ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานของประเทศในอัตราที่มากขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงหลายปีที่ผ่านมา

เทคโนโลยีระบบรางพาราโบลา (Parabolic trough system) เป็นระบบที่ทำการรวมแสงอาทิตย์เพื่อส่งถ่ายความร้อนให้กับของไหลร้อน ซึ่งสามารถผลิตของไหลร้อนได้อุณหภูมิสูงถึง  $400^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพียงพอต่อการนำมาใช้ในการให้ความร้อนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างปานกลาง อย่างไรก็ตามการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้มีประสิทธิภาพที่ดีต้องคำนึงถึงเทอร์โมไดนามิกส์ การไหลของสารทำงาน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจึงจะส่งผลให้เครื่องยนต์มีสมรรถนะที่สูง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการปรับปรุงการออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างปานกลางเพื่อเพิ่มค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ แบบ Second-order Stirling engine model แบบ Quasi Steady Flow model ที่ถูกนำเสนอโดย Kraitong [1] ร่วมกับการหาจุดออกแบบที่เหมาะสมด้วยวิธีภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ (Artificial Immune System)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อปรับปรุงการออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าขนาดเล็กทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างปานกลางโดยการหาค่าการออกแบบที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ (Artificial Immune System) ร่วมกับการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 หาค่าการออกแบบที่เหมาะสมของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง SEB-100 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ขนาดเล็กแบบเบต้าที่ถูกสร้าง พัฒนาและทดสอบที่อุณหภูมิการทำงานแตกต่างปานกลาง  $350^{\circ}\text{C}$  โดย Sripakagorn and Srikam [2] โดยใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ แบบ Second-order Stirling engine model แบบ Quasi Steady Flow model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่แนะนำให้เสนอโดย Kraitong [1]

1.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ แบบ Second-order Stirling engine model แบบ Quasi Steady Flow model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่แนะนำให้เสนอโดย Kraitong [1] และโปรแกรมระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ถูกเขียนโดยโปรแกรม MATLAB

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ค่าออกแบบที่เหมาะสมของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า ที่อุณหภูมิการทำงานแตกต่างปานกลางจากการโดยใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ แบบ Second-order Stirling engine model แบบ Quasi Steady Flow model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่แนะนำให้เสนอโดย Kraitong [1]

## 1.5 ตารางระยะเวลาการปฏิบัติงาน

1.5.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบภูมิคุ้มกันประดิษฐ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติที่แนะนำให้เสนอโดย Kraitong [1]



1.5.2 พัฒนาโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติที่ถูกลำเสนอโดย Kraitong [1] ร่วมกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์

1.5.3 สรุปผลโครงการงาน

1.5.4 จัดทำรูปเล่ม

ตารางที่ 1.1 รายการปฏิบัติงาน

รายการการปฏิบัติงาน	2556							
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
รวมกลุ่มหาหัวข้อ Project จากอาจารย์ที่ปรึกษา								
ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบภูมิคุ้มกันประดิษฐ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติ								
พัฒนาโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณการหาค่าเหมาะสมที่สุด								
สรุปผลการทดสอบโครงการงาน								
จัดทำรูปเล่มโครงการงาน								

1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน

1.6.1 อาจารย์วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 อุปกรณ์ที่ใช้

1.7.1 เครื่องคอมพิวเตอร์

1.8 งบประมาณ

1.8.1 ค่าทำรูปเล่มรายงาน 3,000 บาท

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ซึ่งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 แบบคือ แอลฟา เบต้า และแกมมา และลักษณะทางกายภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า ที่ทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างปานกลางซึ่งใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นแบบสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์

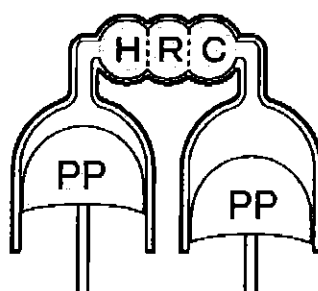
#### 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine)

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องต้นกำลังชนิดหนึ่งที่ได้รับการสนใจในการวิจัยและพัฒนาเนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนได้หลากหลาย เช่น เชื้อเพลิงปิโตรเลียม เชื้อเพลิงไฮโดรเจนหรือก๊าซไอเสียจากโรงงาน ทำให้มีความสนใจในการวิจัยและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานทางเลือกต่างๆ ได้แก่ พลังงานชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์

โครงสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ แอลฟา เบต้า และแกมมา ซึ่งจะแบ่งลักษณะตามการเรียงตัวของลูกสูบ และยังสามารถแบ่งได้ตามระดับผลต่างของอุณหภูมิใช้งานของด้านร้อนและด้านเย็น ( $\Delta T$ ) คือ ผลต่างอุณหภูมิต่ำ ( $\Delta T < 150$ ) ผลต่างอุณหภูมิปานกลาง ( $150 < \Delta T < 400$ ) ผลต่างอุณหภูมิสูง ( $\Delta T > 400$ ) D.Mills[3] เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ซึ่งมี 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนให้ความร้อน (heater) ส่วนระบายความร้อน (cooler) และส่วนรีเจนเนอเรเตอร์ (regenerator) ส่วนขยาย (expansion space) ส่วนอัด (compression space) และ กลไกการขับเคลื่อน

##### 2.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟา (Alpha-type Stirling engine)

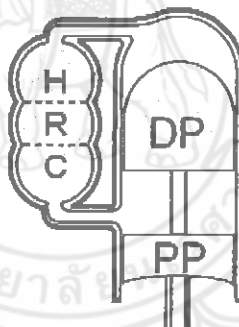
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟา (Alpha-type Stirling engine) เป็นเครื่องยนต์ที่มีสองกระบอกสูบ (Cylinder) โดยกระบอกสูบร้อนตั้งอยู่ในด้านอุณหภูมิสูงและกระบอกสูบเย็นในด้านล่าง อุณหภูมิต่ำต่อเข้ากับเพลาค้อเหวี่ยงร่วมกันเมื่อกระบอกสูบร้อนได้รับความร้อนจะทำให้ก๊าซภายในขยายตัวทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไล่ก๊าซไปยังลูกสูบเย็นและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchange) ทำให้ก๊าซเย็นลงและหดตัวทำให้ลูกสูบถูกดันกลับไปแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุณหภูมิที่แตกต่างกันผ่านช่องแคบ (Clearance) เป็นวัฏจักรตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟา[4]

### 2.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า (Beta-type Stirling engine)

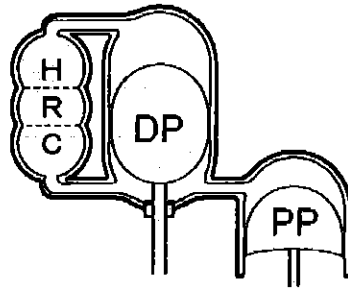
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า (Beta-type Stirling engine) เป็นเครื่องยนต์ที่มีแกนของลูกสูบกำลัง (Power piston) และดีสเพลสเซอร์ (Displacer piston) เป็นแกนเดียวกันซึ่งมีส่วนประกอบหลักสำคัญดังนี้ ลูกสูบกำลังที่มีหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากสารทำงาน ดีสเพลสเซอร์มีหน้าที่แยกส่วนอัด (Compression space) และส่วนขยาย (Expansion space) ออกจากกัน และมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ทำให้สารทำงานเย็นตัวลง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า[4]

### 2.1.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา (Gamma-type stirling engine)

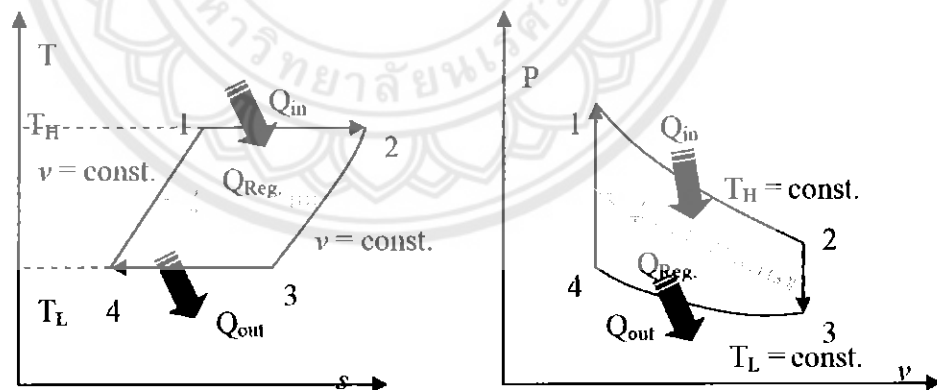
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา (Gamma-type stirling engine) รูปแบบการทำงานจะเหมือนกับแบบเบต้าแต่แยกกระบอกสูบออกมาเป็น 2 กระบอกสูบ ต่อข้อเหวี่ยงร่วมกันแตกต่างกันที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้าจะมีกระบอกสูบ 1 กระบอกสูบ แต่มีลูกสูบ 2 อันต่อข้อเหวี่ยงร่วมกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา[4]

#### 2.1.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

หลักการสำคัญของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นระบบที่ใช้เพียงความร้อนหรือความแตกต่างกันของอุณหภูมิ อาศัยคุณสมบัติของสารทำงานในสถานะก๊าซและหลักการถ่ายความร้อน คือ เมื่อสารทำงานในสถานะก๊าซได้รับความร้อนสารทำงานในสถานะก๊าซจะขยายตัวทำให้เกิดแรงดัน พยายามดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลูกสูบติดกับก้านสูบส่งพลังงานไปยังล้อช่วยแรง (Fly wheel) เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ สารทำงานในสถานะก๊าซร้อนจะถ่ายเทไปยังส่วนที่มีสารทำงานในสถานะก๊าซเย็นกว่าไหลกลับไปมา เป็นวัฏจักรบวกกับแรงเฉื่อยจากล้อช่วยแรง ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างสม่ำเสมอ สามารถแสดง T-s และ P-v diagram ได้ดังรูปที่ 2.4

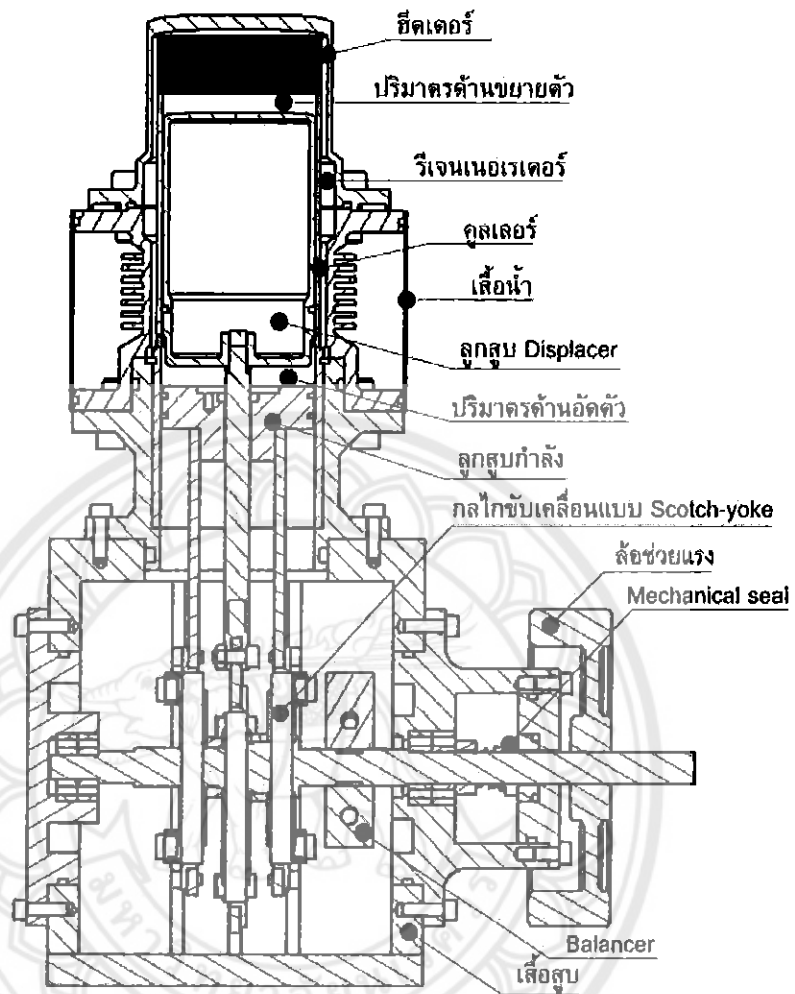


รูปที่ 2.4 T-s and P-v diagrams ของวัฏจักรสเตอร์ลิง[5]

ขั้นที่ 1	Isothermal expansion process	การรับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนภายนอก
ขั้นที่ 2	Constant volume heat transfer process	การถ่ายโอนความร้อนภายในจากของไหลทำงานไปยังรีเจนเนอเรเตอร์
ขั้นที่ 3	Isothermal compression process	การคายความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อนภายนอก
ขั้นที่ 4	Constant volume heat transfer process	การถ่ายโอนความร้อนภายในจากส่วนรีเจนเนอเรเตอร์กลับไปยังของไหลทำงาน

## 2.2 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน (Physical model)

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า เป็นเครื่องยนต์ที่ถูกพัฒนาโดย Sripakagorn and Srikam [2] ซึ่งมีแกนของลูกสูบกำลัง (Power piston) และดีสเพลสเซอร์ (Displacer piston) เป็นแกนเดียวกันซึ่งมีส่วนประกอบหลักสำคัญดังนี้ ลูกสูบกำลังที่มีหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากสารทำงาน ดีสเพลสเซอร์มีหน้าที่แยกส่วนอัด (Compression space) และส่วนขยาย (Expansion space) ออกจากกัน ส่วนให้ความร้อน (Heater) เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอกเข้ามาสู่สารทำงานภายในเครื่องยนต์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่รับและส่งความร้อนระหว่างสารทำงานกับวัสดุพูน (Matrix) ส่วนระบายความร้อน (Cooler) มีหน้าที่ส่งถ่ายความร้อนจากสารทำงานออกสู่แหล่งรับความร้อนโดยแสดงภาพตัดของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 2.5 และค่าเฉพาะของเครื่องยนต์แสดงในตารางที่ 2.1 น้ำถูกใช้เป็นตัวรับความร้อนซึ่งบรรจุใน (Water jacket) ส่วนส่งกำลังซึ่งในเครื่องต้นแบบได้ออกแบบใช้เป็นแบบ Scotch Yoke (Scotch Yoke mechanism) ใช้ส่งกำลังจากลูกสูบกำลังไปสู่เพลลา



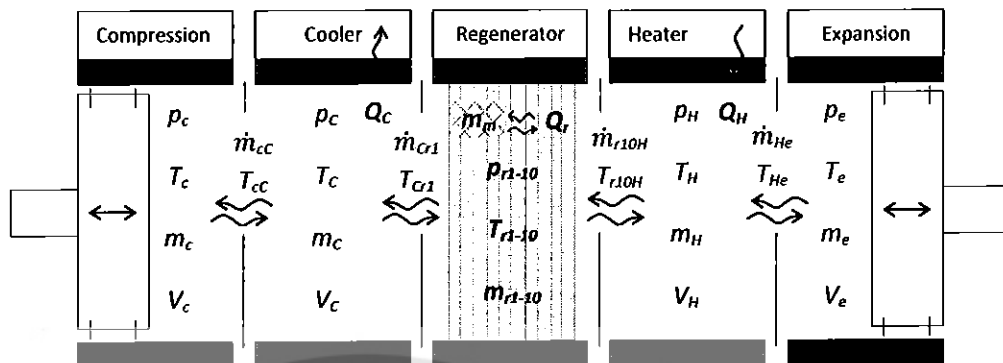
รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าขนาดเล็กที่ได้ถูกพัฒนาโดย Sripakagorn and Srikam [2]

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเฉพาะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าขนาดเล็กที่ได้ถูกพัฒนาโดย Sripakagorn and Srikam [2]

Parameters	Value
Engine type	Beta
Working gas	Air
Maximum change pressure	7 bar
Displacer : swept volume	165 cc
Displacer : bore / stroke	74 mm / 37 mm
Power piston : swept volume	165 cc
Power piston : bore / stroke	74 mm / 37 mm
Heater section dead volume	20 cc
Heater : design / surface area Slot	877.8 cm <sup>2</sup>
Cooler : section dead volume	16.5 cc
Cooler : design / surface area Slot	708.4 cm <sup>2</sup>
Regenerator matrix	#80 Stainless steel mesh
Regenerator porosity	75%
Regenerator section dead volume	47 cc
Compression ratio	16.1
Cooling method	Water jacket

### 2.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ แบบ (Second-order Stirling engine model)

แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ แบบ Second-order Stirling engine model แบบ Quasi Steady Flow model เป็นแบบจำลองที่สร้างสมการคณิตศาสตร์ในแต่ละส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงซึ่งแบ่งเป็น 5 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนการอัด ส่วนระบายความร้อน รีเจนเนอเรเตอร์ ส่วนให้ความร้อน ส่วนการขยาย ชุดสมการอนุรักษ์มวลและพลังงานของแต่ละส่วนจะถูกสร้างขึ้นโดยรวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ และการคำนึงถึงค่าความสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ ได้แก่การสูญเสียทางความร้อน การสูญเสียความดัน สุดท้ายวิธีทางคณิตศาสตร์จะถูกนำมาใช้ในการหาค่าจากชุดสมการอนุพันธ์ที่ถูกสร้างขึ้น สำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการวิจัยนี้จะพัฒนาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอโดย Kraitong [1] ซึ่งมีการแบ่งส่วนย่อยในรีเจนเนอเรเตอร์อีก 10 ส่วน ผังการไหลของสารทำงานของแบบจำลองคณิตศาสตร์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผังการไหลของสารทำงานของแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ Kraitong [1]

ปริมาตรของส่วนอัดตัว (compression space) และส่วนขยายตัว (expansion space) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_c = V_{d-c} + \frac{V_{s-p}}{2} (1 + \cos(\theta - \varphi)) + \frac{V_{s-d}}{2} (1 - \cos \theta) \quad (2.1)$$

$$V_e = V_{d-e} + \frac{V_{s-d}}{2} (1 + \cos \theta) \quad (2.2)$$

อนุพันธ์ของปริมาตร คือ

$$\frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_{s-p}}{2} \omega \sin(\theta - \varphi) + \frac{V_{s-d}}{2} \omega \sin \theta \quad (2.3)$$

$$\frac{dV_e}{dt} = -\frac{V_{s-d}}{2} \omega \sin \theta \quad (2.4)$$

อุณหภูมิของสารทำงานระหว่างส่วนอัดกับส่วนระบายความร้อนสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$T_{c-c} = T_c \quad \text{ถ้า} \quad \dot{m}_{c-c} > 0$$

$$T_{c-c} = T_c \quad \text{ถ้า} \quad \dot{m}_{c-c} \leq 0$$

เมื่อ  $\dot{m}_{c-c}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานระหว่างส่วนอัดกับส่วนระบายความร้อน (kg/s),  $T_{c-c}$  คือ อุณหภูมิของสารทำงานระหว่างส่วนอัดกับส่วนระบายความร้อน (K),  $T_c$  คือ อุณหภูมิของส่วนระบายความร้อน (K),  $T_c$  คือ อุณหภูมิของส่วนอัด (K)



อุณหภูมิของสารทำงานระหว่างส่วนระบายความร้อนกับส่วนแรกของรีเจนเนอเรเตอร์สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$T_{Cr1} = T_C \quad \text{ถ้า} \quad \dot{m}_{C-r1} > 0$$

$$T_{Cr1} = T_{r-c} \quad \text{ถ้า} \quad \dot{m}_{C-r1} \leq 0$$

เมื่อ  $\dot{m}_{C-r1}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานระหว่างส่วนระบายความร้อนกับส่วนแรกของรีเจนเนอเรเตอร์ (kg/s),  $T_{Cr1}$  คือ อุณหภูมิของสารทำงานระหว่างส่วนระบายความร้อนกับส่วนแรกของรีเจนเนอเรเตอร์ (K),  $T_{r-c}$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวระหว่างส่วนระบายความร้อนกับส่วนแรกของรีเจนเนอเรเตอร์ (K) ซึ่งสามารถหาได้จาก  $T_{r-c} = (3T_{r1} - T_{r2})/2$

อุณหภูมิของรีเจนเนอเรเตอร์ส่วนที่สองถึงส่วนที่เก้าสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$T_{r(i)-(i+1)} = (T_{r(i)} + T_{r(i+1)})/2$$

เมื่อ  $T_{r(i)}$  และ  $T_{r(i+1)}$  เป็นอุณหภูมิของสารทำงานในส่วนที่ (i)th และส่วนที่ (i+1)th ของ รีเจนเนอเรเตอร์ (K) โดยกำหนด  $i = 2 - 9$

อุณหภูมิของสารทำงานระหว่างส่วนที่สิบของรีเจนเนอเรเตอร์กับส่วนให้ความร้อนสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$T_{r10-H} = T_{r-H} \quad \text{ถ้า} \quad \dot{m}_{r10-H} > 0$$

$$T_{r10-H} = T_H \quad \text{ถ้า} \quad \dot{m}_{r10-H} \leq 0$$

เมื่อ  $\dot{m}_{r10-H}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานระหว่างส่วนที่สิบของรีเจนเนอเรเตอร์กับส่วนให้ความร้อน (kg/s),  $T_{r10-H}$  คือ อุณหภูมิของสารทำงานระหว่างส่วนที่สิบของรีเจนเนอเรเตอร์กับส่วนให้ความร้อน (K),  $T_{r-H}$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวระหว่างส่วนที่สิบของรีเจนเนอเรเตอร์กับส่วนให้ความร้อน (K) ซึ่งสามารถหาได้จาก  $T_{r-c} = (3T_{r10} - T_{r9})/2$

อุณหภูมิของสารทำงานระหว่างส่วนขยายตัวกับส่วนให้ความร้อนสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$T_{H-e} = T_H \quad \text{ถ้า} \quad \dot{m}_{H-e} > 0$$

$$T_{H-e} = T_e \quad \text{ถ้า} \quad \dot{m}_{H-e} \leq 0$$

เมื่อ  $\dot{m}_{H-e}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานระหว่างส่วนขยายกับส่วนให้ความร้อน (kg/s) ,  $T_{H-e}$  คือ อุณหภูมิของสารทำงานระหว่างส่วนขยายกับส่วนให้ความร้อน (K) ,  $T_H$  คือ อุณหภูมิของส่วนให้ความร้อน (K) ,  $T_e$  คือ อุณหภูมิของส่วนขยาย (K)

### 2.3.1 สมการอนุรักษ์พลังงาน (The energy conservation equations)

สมการอนุรักษ์พลังงานในส่วนด้านอัด ส่วนด้านระบายความร้อน และส่วนแรกของรีเจนเนอเรเตอร์แสดงได้ดังนี้

$$C_v \frac{d(m_c T_c)}{dt} = -\dot{m}_{c-c} C_p T_{c-c} - \frac{dW_c}{dt} \quad (2.5)$$

$$C_v \frac{d(m_c T_c)}{dt} = dQ_c - dQ_{\text{loss, disp-c}} + \dot{m}_{c-c} C_p T_{c-c} - \dot{m}_{c-r1} C_p T_{c-r1} \quad (2.6)$$

$$C_v \frac{d(m_{r1} T_{r1})}{dt} = dQ_{r1} - dQ_{\text{loss, disp-r1}} + \dot{m}_{c-r1} C_p T_{c-r1} - \dot{m}_{r1-r2} C_p T_{r1-r2} \quad (2.7)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานของรีเจนเนอเรเตอร์ส่วนที่สองถึงส่วนที่เก้าแสดงได้ดังนี้

$$C_v \frac{d(m_{r(i)} T_{r(i)})}{dt} = dQ_{r(i)} - dQ_{\text{loss, disp-r(i)}} + \dot{m}_{r(i-1)-r(i)} C_p T_{r(i-1)-r(i)} - \dot{m}_{r(i)-r(i+1)} C_p T_{r(i)-r(i+1)} \quad (2.8)$$

กำหนด  $i = 2 - 9$

สมการอนุรักษ์พลังงานของรีเจนเนอเรเตอร์ส่วนที่ 10 แสดงได้ดังนี้

$$C_v \frac{d(m_{r10} T_{r10})}{dt} = dQ_{r10} - dQ_{\text{loss, disp-r10}} + \dot{m}_{r9-r10} C_p T_{r9-r10} - \dot{m}_{r10-h} C_p T_{r10-h} \quad (2.9)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานในส่วนให้ความร้อนและส่วนขยายแสดงได้ดังนี้

$$C_v \frac{d(m_H T_H)}{dt} = dQ_H - dQ_{\text{loss, disp-H}} + \dot{m}_{r10-H} C_p T_{r10-H} - \dot{m}_{H-e} C_p T_{H-e} \quad (2.10)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานในส่วนให้ความร้อนและส่วนขยายแสดงได้ดังนี้

$$C_v \frac{d(m_e T_e)}{dt} = \dot{m}_{H-e} C_p T_{H-e} - \frac{dW_e}{dt} \quad (2.11)$$

จากสมการข้างต้น  $m_c$  และ  $m_H$  คือมวลของสารทำงานในส่วนระบายความร้อนและส่วนให้ความร้อนตามลำดับ (kg) ,  $Q_{\text{loss,disp-c}}$  เป็นความร้อนสูญเสียจากแรงเสียดทานการไหลของด้านระบายความร้อน (W) ,  $Q_{\text{loss,disp-r}(i)}$  คือความร้อนสูญเสียจากแรงเสียดทานการไหลของรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่ง  $i=2-9$  (W) ,  $Q_{\text{loss,disp-r10}}$  คือความร้อนสูญเสียจากแรงเสียดทานการไหลในส่วนที่สิบของ รีเจนเนอเรเตอร์ (W) ,  $Q_{\text{loss,disp-H}}$  คือความร้อนสูญเสียจากแรงเสียดทานการไหลของด้านให้ความร้อน (W)

งานที่เกิดจากสารทำงานในส่วนอัดและส่วนขยายนั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{dW_c}{dt} = p_c \frac{dV_c}{dt} \quad \text{และ} \quad \frac{dW_e}{dt} = p_e \frac{dV_e}{dt}$$

สมการ Ideal gas  $PV = mRT$  และคุณสมบัติของก๊าซหาจาก  $R = C_p - C_v$  และ  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ .

อัตราการไหลของสารทำงานระหว่างปริมาตรควบคุมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{m}_{cc} = -\frac{1}{RT_{cc}} \left( p_c \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c dp}{\gamma dt} \right) \quad (2.12)$$

$$\dot{m}_{cr1} = \frac{1}{RT_{cr1}} \left( \frac{R}{C_p} dQ_c - \frac{R}{C_p} dQ_{\text{loss,disp-c}} - \frac{V_c dp}{\gamma dt} + R\dot{m}_{cc} T_{cc} \right) \quad (2.13)$$

$$\dot{m}_{r1r2} = \frac{1}{RT_{r1r2}} \left( \frac{R}{C_p} dQ_{r1} - \frac{R}{C_p} dQ_{\text{loss,disp-r1}} - \frac{V_{r1} dp}{\gamma dt} + R\dot{m}_{cr1} T_{cr1} \right) \quad (2.14)$$

อัตราการไหลของสารทำงานระหว่างปริมาตรควบคุมของรีเจนเนอเรเตอร์ส่วนที่สองถึงส่วนที่เก้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{m}_{r(i)-r(i+1)} = \frac{1}{RT_{r(i)-r(i+1)}} \left( \frac{R}{C_p} dQ_{r(i)} - \frac{R}{C_p} dQ_{\text{loss,disp-r}(i)} - \frac{V_{r(i)}}{\gamma} \frac{dp}{dt} + R\dot{m}_{r(i-1)-r(i)} T_{r(i-1)-r(i)} \right) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $i$  คือจำนวนส่วนของรีเจนเนอเรเตอร์ (2...9)

$$\dot{m}_{r_{10h}} = \frac{1}{RT_{r_{10h}}} \left( \frac{R}{C_p} dQ_{r_{10}} - \frac{R}{C_p} dQ_{\text{loss,disp-r}_{10}} - \frac{V_{r_{10}}}{\gamma} \frac{dp}{dt} + R\dot{m}_{r_{9r_{10}}} T_{r_{9r_{10}}} \right) \quad (2.16)$$

$$\dot{m}_{\text{He}} = \frac{1}{RT_{\text{He}}} \left( \frac{R}{C_p} dQ_{\text{H}} - \frac{R}{C_p} dQ_{\text{loss,disp-H}} - \frac{V_{r_{10}}}{\gamma} \frac{dp}{dt} + R\dot{m}_{r_{10H}} T_{r_{10H}} \right) \quad (2.17)$$

อนุพันธ์ของความดันสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{C_v V_T} \left( R(dQ_{\text{H}} + \sum dQ_r + dQ_c - \sum dQ_{\text{loss,disp}}) - C_p \left( p_c \frac{dV_c}{dt} + p_e \frac{dV_e}{dt} \right) \right) \quad (2.18)$$

นอกจากนี้ สมการอนุรักษ์พลังงานของรีเจนเนอเรเตอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{m}_m C_p \frac{dT_m}{dt} = -dQ_r \quad (2.19)$$

เพราะฉะนั้น อนุพันธ์ของอุณหภูมิในแต่ละส่วนของรีเจนเนอเรเตอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dT_{m(i)}}{dt} = \frac{1}{\dot{m}_{m(i)} C_p} (-dQ_{r(i)}) \quad (2.20)$$

เมื่อ  $i = 1 - 10$

### 2.3.2 สมการอนุรักษ์มวล (The mass conservation equations)

สมการอนุรักษ์มวลของสารทำงานสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dm_c}{dt} = -\dot{m}_{c-c} \quad (2.21)$$

$$\frac{dm_c}{dt} = \dot{m}_{c-c} - \dot{m}_{c-1} \quad (2.22)$$

$$\frac{dm_{r1}}{dt} = \dot{m}_{c-1} - \dot{m}_{r1-r2} \quad (2.23)$$

สำหรับในส่วนที่สองถึงส่วนที่เก้าของรีเจนเนอเรเตอร์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{dm_{r(i)}}{dt} = \dot{m}_{r(i-1)-r(i)} - \dot{m}_{r(i)-r(i+1)} \quad (2.24)$$

$$\frac{dm_{r10}}{dt} = \dot{m}_{r9-r10} - \dot{m}_{r10-H} \quad (2.25)$$

$$\frac{dm_H}{dt} = \dot{m}_{r10-H} - \dot{m}_{H-e} \quad (2.26)$$

$$\frac{dm_e}{dt} = \dot{m}_{H-e} \quad (2.27)$$

### 2.3.3 สมการสถานะของก๊าซ (The state equation of the ideal gas)

สมการต่อไปนี้เป็นสมการที่ใช้ในการหาอุณหภูมิของทุก ๆ ส่วนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$T_c = \frac{p_c V_c}{Rm_c} \quad (2.28)$$

$$T_c = \frac{p_c V_c}{Rm_c} \quad (2.29)$$

$$T_{r(i)} = \frac{P_{r(i)} V_{r(i)}}{Rm_{r(i)}} \quad (2.30)$$

$$T_H = \frac{p_H V_H}{Rm_H} \quad (2.31)$$

$$T_e = \frac{p_e V_e}{Rm_e} \quad (2.32)$$

ในการคำนวณข้างต้นค่าความดันตกคร่อม (pressure drop) ที่เกิดในรีเจนเนอเรเตอร์ ส่วนให้ความร้อนและส่วนระบายความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ถูกนำเข้ามาคำนวณด้วย

สำหรับการไหลของของไหลภายในท่อของส่วนให้ความร้อนและส่วนระบายความร้อนที่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลทิศทางเดียวที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย [6] แม้การไหลในเครื่องยนต์ที่เป็นการไหลแบบกลับไปกลับมา ซึ่งสมการที่ถูกให้ไว้ใน F.P.Incropera [7] ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ

$$\Delta p = \frac{2f_i \mu U V}{A_{free} D_h^2} \quad (2.33)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $D_h$  คือ Hydraulic diameter (m) ;  $A_c$  คือพื้นที่หน้าตัด ( $m^2$ )  $P$  คือเส้นรอบวง (m)

$$Re_{D_h} = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (2.35)$$












$$f_i = f_c Re / 4 \quad (2.36)$$

เมื่อ  $f_c$  เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของส่วนให้ความร้อนและส่วนระบายความร้อน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ถ้า } Re < 2300$$

สามารถหา  $f_c$  จากความสัมพันธ์ในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 Nusselt numbers and friction factors for fully developed laminar flow in tubes of differing cross section. [7]

Cross Section	$\frac{b}{a}$	$Nu_D = \frac{hD_h}{k}$		$f Re_{D_h}$
		(Uniform $q_w$ )	(Uniform $T_w$ )	
	---	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62
	3.0	4.79	3.96	69
	4.0	5.33	4.44	73
	8.0	6.49	5.60	82
	$\infty$	8.23	7.54	96
	$\infty$	5.39	4.86	96
	$\infty$	5.39	4.86	96
	---	3.11	2.40	53

Used with permission from W. M. Kays and M. F. Crawford, *Convective Heat and Mass Transfer*, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1993.

ถ้า  $2300 < Re < 20000$

$$f_c = 0.316 Re^{-0.25} \quad (2.37)$$

ถ้า  $Re > 20000$

$$f_c = 0.184 Re^{-0.2} \quad (2.38)$$

สำหรับการหาความดันตกคร่อมในส่วนของรีเจนเนอเรเตอร์นั้น จำนวนของความสัมพันธ์ที่ได้วิเคราะห์การทดลองการไหลผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ได้รับการตีพิมพ์ ซึ่ง Thomas and Pittman [8] เสนอการประเมินผลของความสัมพันธ์ที่แตกต่างสำหรับการคำนวณหาแรงเสียดทานการไหลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของรีเจนเนอเรเตอร์ มันแสดงให้เห็นว่าค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นจากการใช้ความสัมพันธ์ของ Gedeon and Wood ดังนั้น  $f_c$  ของรีเจนเนอเรเตอร์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$f_c = \frac{129}{Re} + \frac{2.91}{Re^{0.103}} \quad (2.39)$$

การกระจายพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานของการไหลถูกศึกษาโดย Tlili et al [9] และ Timoumi et al [10] และสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{\text{loss,disp}} = \frac{\Delta p m}{\rho} \quad (2.40)$$

ความดันของสารทำงานปริมาตรควบคุมแต่ละส่วนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$p_c = p_c + \frac{\Delta p_c}{2} \quad (2.41)$$

เมื่อ  $\Delta p_c$  เป็นความดันตกคร่อมในส่วนระบายความร้อน (Pa)

$$p_{r_i} = p_c + \frac{\Delta p_c}{2} + \frac{\Delta p_{r_i}}{2}; \quad (2.42)$$

ความดันตกคร่อมในส่วนที่สองถึงส่วนที่สิบของรีเจนเนอเรเตอร์แสดงได้ดังนี้

$$p_{r(i)} = p_{r(i-1)} + \frac{\Delta p_{r(i-1)}}{2} + \frac{\Delta p_{r(i)}}{2} \quad (2.43)$$

เมื่อ  $i = 2 - 10$

$$p_H = p_{r_{10}} + \frac{\Delta p_{r_{10}}}{2} + \frac{\Delta p_H}{2} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $\Delta p_H$  คือความดันตกคร่อมที่ออกจากส่วนให้ความร้อน (Pa)



$$p_e = p_H + \frac{\Delta p_H}{2} \quad (2.45)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$dQ_H = h_H A_{h-H} (T_H - T_e) - dQ_{\text{loss},lr-H} \quad (2.46)$$

$$dQ_C = h_C A_{h-C} (T_C - T_c) - dQ_{\text{loss},lr-C} \quad (2.47)$$

เมื่อ  $Q_{\text{loss},lr-H}$  เป็นความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนจากส่วนที่ร้อนไปสู่ส่วนที่เย็นของส่วนให้ความร้อน (W) ,  $Q_{\text{loss},lr-C}$  เป็นความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนจากส่วนที่ร้อนไปสู่ส่วนที่เย็นของส่วนระบายความร้อน (W)

ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (h) ใน unidirectional flow (F.P. Incropera [7]) สามารถประยุกต์มาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของส่วนให้ความร้อนและส่วนระบายความร้อนคำนวณได้ดังนี้

สำหรับการไหลราบเรียบ ( $Re < 2300$ ) จะใช้ความสัมพันธ์จากตาราง 2.2 เพื่อหาค่า Nusselt numbers

สำหรับการไหลปั่นป่วน ( $Re > 2300$ ) ค่า Nusselt numbers สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Nu = 0.0243 Re_D^{4/5} Pr^{0.4} \text{ สำหรับส่วนให้ความร้อน} \quad (2.48)$$

$$Nu = 0.0265 Re_D^{4/5} Pr^{0.3} \text{ สำหรับส่วนระบายความร้อน} \quad (2.49)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$h = \frac{kNu}{D_h} \quad (2.50)$$

เมื่อ h คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^2 \cdot K$ ) และ  $D_h$  คือ Hydraulic diameter (m)

อัตราการถ่ายเทความร้อนของรีเจนเนอเรเตอร์ในทุก ๆ ส่วนสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$dQ_{r(i)} = e_{ef} h_{m(i)} A_{h-m(i)} (T_{m(i)} - T_{r(i)}) - dQ_{\text{loss},lr-r(i)} \quad (2.51)$$

เมื่อ  $Q_{\text{loss},lr-r(i)}$  เป็นความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนจากส่วนที่ร้อนไปสู่ส่วนที่เย็นของรีเจนเนอเรเตอร์ (W) และ  $i = 1 - 10$  เป็นจำนวนส่วนของรีเจนเนอเรเตอร์

ความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อนถูกกำหนดมาจากการถ่ายเทความร้อนเนื่องมาจากการนำความร้อนจากด้านร้อนไปด้านเย็นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สมการการนำความร้อนในหนึ่งมิติตามความยาวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$dQ_{\text{loss},lr} = \frac{kA_l}{l} \Delta T \quad (2.52)$$

เมื่อ  $k$  คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/mK);  $A_l$  คือพื้นที่หน้าตัด ( $m^2$ );  $l$  คือความยาว (m);  $\Delta T$  คือผลต่างอุณหภูมิ (K)

ค่างานบ่งชี้ของวัฏจักร (Cyclic indicated work) สามารถคำนวณได้จาก

$$W_i = \oint \left( \frac{dW_i}{dt} \right) dt = \int_0^{\tau} \left( \frac{dW_c}{dt} + \frac{dW_e}{dt} \right) dt = \int_0^{\tau} \left( p_c \frac{dV_c}{dt} + p_e \frac{dV_e}{dt} \right) dt \quad (2.54)$$

และกำลังบ่งชี้ของวัฏจักร (Cyclic indicated power) สามารถหาได้โดย

$$P_i = W_i f \quad (2.55)$$

และค่ากำลังเพลลา (Brake power) สามารถหาได้โดยกำหนดค่าประสิทธิภาพทางกลเท่า 0.8 ซึ่งเป็นค่าประมาณของประสิทธิภาพทางกลของระบบส่งกำลังในเครื่องยนต์ [11]

$$P_o = P_i \eta_{\text{mech}}$$

เมื่อ  $\eta_{\text{mech}} = 0.8$

## 2.4 ระบบภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ (Artificial Immune System)

ระบบภูมิคุ้มกันชีวภาพหรือระบบภูมิคุ้มกันของสิ่งมีชีวิต เป็นระบบป้องกันตัวเองจากเชื้อโรค และสิ่งแปลกปลอมจากภายนอกที่บุกรุกเข้ามาในร่างกาย แม้ว่ารายละเอียดของการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันนี้ยังไม่แน่ชัดว่าเป็นอย่างไร แต่จากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์ในเบื้องต้นทราบว่า ระบบภูมิคุ้มกันมีวิธีป้องกันร่างกายจากสิ่งแปลกปลอมภายนอกหลายระดับ

สำหรับระบบภูมิคุ้มกันแล้ว การทำงานของระบบเป็นการป้องกันตัวเอง ระบบมีแอนติบอดี (Antibody) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่คอยจับกับแอนติเจน (Antigen) ซึ่งเป็นเชื้อโรคหรือสิ่งแปลกปลอมที่บุกรุกเข้าสู่ร่างกาย การจับตัวระหว่างแอนติเจนกับแอนติบอดีนั้นเรียกว่าการจับคู่ (Matching) เมื่อเกิดการจับคู่แล้วแอนติเจนจะถูกทำให้หมดฤทธิ์หรือถูกทำให้สูญสลายไป โดยแอนติบอดีแต่ละตัวจะมีความสามารถในการจำแนกชนิดของสิ่งแปลกปลอม เพื่อทำการกำจัดสิ่งแปลกปลอมนั้นอย่างเหมาะสม

### 2.4.1 ระบบภูมิคุ้มกันชีวภาพ

แอนติบอดี หรือมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อิมมูโนโกลบูลิน (Immunoglobulin) มีหน้าที่ตรวจจับและทำลายฤทธิ์ของสิ่งแปลกปลอม แอนติบอดีแต่ละชนิดจะจดจำโมเลกุลเป้าหมายที่จำเพาะของแอนติเจนได้ ซึ่ง แอนติเจนก็คือสารที่จับตัวอยู่กับสิ่งแปลกปลอม หรือเป็นสารที่ไม่มีอยู่ในร่างกายอยู่แล้ว เมื่อมีสิ่งแปลกปลอมเข้าสู่ร่างกาย แอนติเจนจะกระตุ้นให้เกิดการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันแบบจำเพาะ (Specific Immune Response) โดยการทำให้เกิดการสร้างแอนติบอดีที่สามารถทำปฏิกิริยากับแอนติเจนนั้นโดยตรง

#### 1. เซลล์ที่ทำหน้าที่ภูมิคุ้มกัน

เซลล์ที่มีความสำคัญในการทำหน้าที่ภูมิคุ้มกันเป็นเซลล์เม็ดเลือดขาว ซึ่งมี 2 ชนิดคือ เซลล์ที (T-cells) เซลล์บี (B-cells) เซลล์ทั้งสองชนิดเกิดจากไขกระดูก แต่เซลล์ที่จะถูกส่งไปยังต่อมไทมัส (Thymus) เพื่อการพุ่มพักก่อนที่มันจะกระจายตัวไปทั่วร่างกายผ่านทางหลอดเลือดและหลอดน้ำเหลือง (Lymphatic Vessels)

เซลล์ที (T-cells) มี 3 ชนิด ชนิดแรกคือเซลล์ทีเฮลเปอร์ (Helper T-cells) ซึ่งมีส่วนสำคัญในการกระตุ้นเซลล์บี ชนิดที่สองคือเซลล์ทีคิลเลอร์ (Killer T-cells) เป็นเซลล์ที่จับตัวและทำลายผู้บุกรุก และชนิดที่สามคือเซลล์ที่ซัพเพรสเซอร์ (Suppressor T-cells) เซลล์นี้ทำหน้าที่ยับยั้งการทำงานของเซลล์ภูมิคุ้มกันไม่ให้จับกับเซลล์ตัวเอง (Self-cells) เพื่อป้องกันการทำลายตัวเอง (Autoimmune)

เซลล์บี (B-cells) มีหน้าที่ในการผลิตและหลั่งสารแอนติบอดี สารแอนติบอดีนี้จะเป็นสารที่จำเพาะเจาะจงกับแอนติเจนชนิดที่มันต้องการจะจับตัว เมื่อมีการตรวจพบแอนติเจนที่จับตัวกับสิ่งแปลกปลอมที่บุกรุกเข้ามาในร่างกายแอนติบอดีจะเข้าไปจับคู่ (Matching) กับแอนติเจนและจะทำลายเซลล์สิ่งแปลกปลอมนั้น

## 2. กลไกของระบบภูมิคุ้มกัน

การป้องกันสิ่งแปลกปลอมที่รุกร้าเข้ามาในร่างกายมนุษย์เป็นการทำงานที่ประสานงานกันหลายระดับระบบภูมิคุ้มกันประกอบด้วยเครื่องป้องกันทางกายภาพ เช่น ผิวหนัง ระบบขับเหงื่อ เครื่องป้องกันทางสรีรวิทยา เช่น เอนไซม์ กรดในกระเพาะอาหาร และระบบภูมิคุ้มกัน ซึ่งในระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 2 อย่างคือ อินเนทอิมมูนิตี (Innate Immunity) หรือภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะเจาะจง (Non-specific Immune Response) และอะแดปทีฟอิมมูนิตี (Adaptive Immunity) หรือภูมิคุ้มกันแบบจำเพาะเจาะจง (Specific Immune Response) ซึ่งภูมิคุ้มกันทั้งสองประเภทนี้จะทำงานประสานกันและมีอิทธิพลต่อกัน สำหรับอะแดปทีฟอิมมูนิตีนั้นสามารถแบ่งได้อีก 2 ชนิดคือ ฮิวโมรอลอิมมูนิตี (Humoral Immunity) และเซลล์มีดิเอตอิมมูนิตี (Cell Mediated Immunity)

อินเนทอิมมูนิตีหรือภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะเจาะจง เป็นภูมิคุ้มกันที่มีมาแต่กำเนิด ภูมิคุ้มกันนี้มีการกำจัดสิ่งแปลกปลอมออกจากร่างกายโดยวิธีการง่าย ๆ การกำจัดจะมีขั้นตอนเริ่มจากการที่ระบบนี้เป็นเครื่องขัดขวางตามธรรมชาติอยู่แล้ว ได้แก่ ผิวหนัง เยื่อเมือกซึ่งบุตามอวัยวะต่าง ๆ และขนอ่อน (Cilia) ถ้ามีสิ่งแปลกปลอมสามารถผ่านเครื่องขัดขวางนี้ไปได้ สิ่งแปลกปลอมนั้นจะถูกร่างกายกำจัดโดยการกิน โดยเซลล์ที่ทำหน้าที่ในการกินจะเคลื่อนตัวไปใกล้แล้วประกบติด (Attachment) ต่อมาจะกลืนและทำการย่อยแล้วจึงขับสิ่งแปลกปลอมที่ถูกทำลายแล้วออกจากร่างกาย

อะแดปทีฟอิมมูนิตีหรือภูมิคุ้มกันแบบจำเพาะเจาะจง เป็นระบบที่มีการกำจัดสิ่งแปลกปลอมด้วยวิธีที่ยู่ยากกว่าอินเนทอิมมูนิตี เกิดขึ้นเมื่อร่างกายไม่สามารถใช้อินเนทอิมมูนิตีกำจัดสิ่งแปลกปลอมหรือแอนติเจนออกไปได้ เซลล์ที่ทำหน้าที่กำจัดสิ่งแปลกปลอมในระบบนี้คือ เม็ดเลือดขาวลิมโฟไซต์ (Lymphocytes) การตอบสนองดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

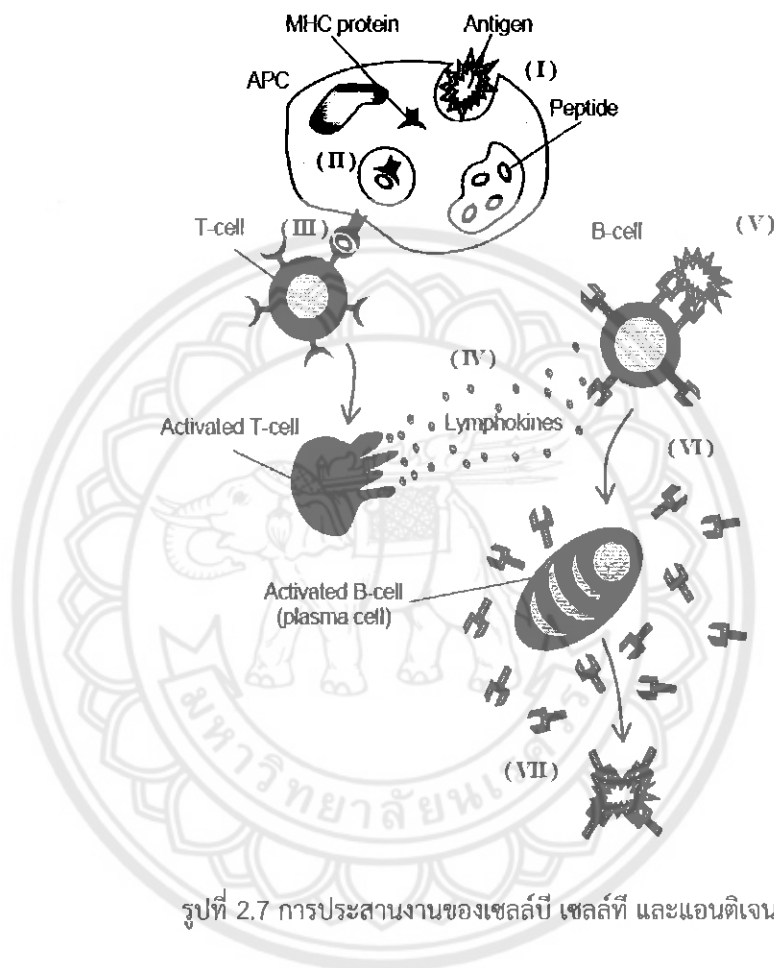
ฮิวโมรอลอิมมูนิตี คือการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันโดยแอนติบอดีที่เป็นสารน้ำซึ่งประกอบอยู่กับของเหลวในร่างกาย จะทำงานร่วมกับเซลล์บีที่มีแหล่งกำเนิดจากไขกระดูก และย้ายไปที่เนื้อเยื่อน้ำเหลือง (Lymphoid Tissue) เพื่อพัฒนาเป็นเม็ดเลือดขาว บี-ลิมโฟไซต์ (B-Lymphocytes) เมื่อเจริญเต็มที่แล้วจะถูกปล่อยเข้ามาในกระแสเลือด และเนื้อเยื่อน้ำเหลือง เข้าสู่กระแสเลือดทั่วร่างกาย เมื่อมีแอนติเจนเซลล์บีจะทำการตอบสนองด้วยการเปลี่ยนแปลงตนเองเป็นเซลล์พลาสมาเพื่อทำหน้าที่สร้างแอนติบอดี แล้วเคลื่อนตัวกับแอนติเจน เมื่อแอนติเจนหรือสิ่งแปลกปลอมนั้นถูกเคลือบแล้วก็จะถูกขับออก

เซลล์มีดิเอตอิมมูนิตี เซลล์ที่ทำหน้าที่ในการตอบสนองต่อหน้าที่นี้คือเซลล์ที (T-Lymphocytes) ซึ่งมีต้นกำเนิดที่ไขกระดูกเช่นเดียวกับเซลล์บี โดยการฟุ่มฟักตัวเองผ่านต่อมไทมัส (Thymus Gland) ให้เป็นเซลล์ที่สมบูรณ์ แล้วทำหน้าที่ในการฆ่าเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัสและเซลล์ที่เป็นเนื้องอก

## 3. การทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน

ระบบภูมิคุ้มกันทางชีวภาพสามารถมองได้เป็นหลายชั้น ซึ่งการป้องกันแต่ละชั้นจะมีกลไกการป้องกันที่แตกต่างกันออกไป ประกอบด้วยการตรวจจับ (Detection) การรู้จัก (Recognition)

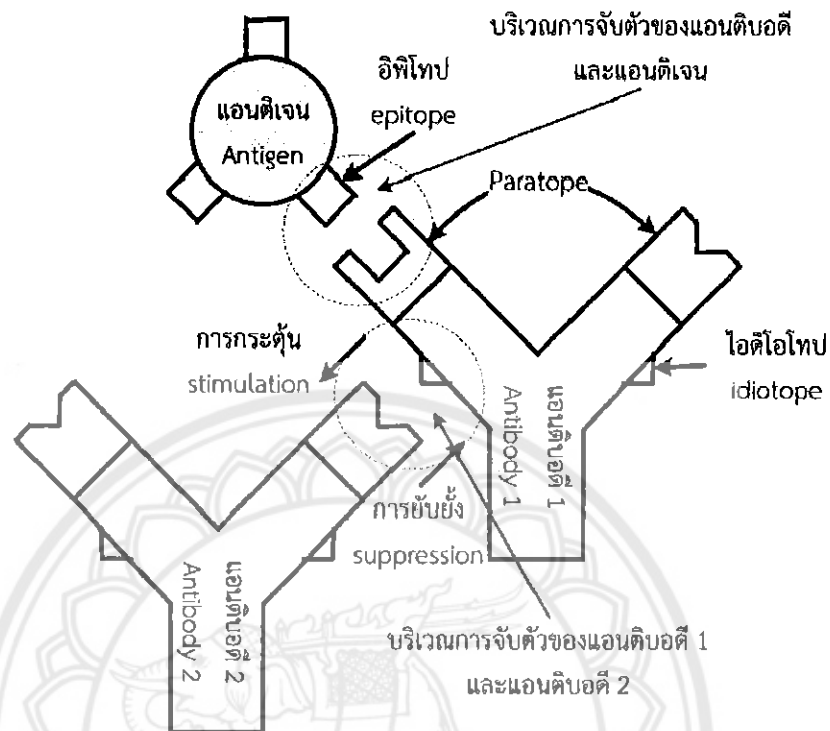
และการตอบสนอง (Response) เมื่ออะแดฟท์ที่พหิมุนิตีรู้จักการปรากฏตัวของผู้บุกรุก มันจะกระตุ้น ฮุมรอลิมมูนิตีและเซลล์มีติเอ็ดอิมมูนิตีจัดการต่อผู้บุกรุกอย่างเป็นลำดับขั้น อินเนทอิมมูนิตีจะตอบโต้ โดยตรงต่อผู้บุกรุกถ้าผู้บุกรุกหรือสิ่งแปลกปลอมสามารถผ่านอินเนทอิมมูนิตีนี้ไปได้ ร่างกายจะกระตุ้น ให้อะแดฟท์ที่พหิมุนิตีออกมาตอบโต้กับสิ่งแปลกปลอมตามชนิดของผู้ที่มาบุกรุกเข้ามา



รูปที่ 2.7 การประสานงานของเซลล์บี เซลล์ที และแอนติเจน[12]

จากรูปที่ 2.7 เป็นที่แสดงวิธีการที่ระบบภูมิคุ้มกันแบบอะแดฟท์ที่พหิมุนิตีทำการตอบโต้กับ สิ่งแปลกปลอมหรือแอนติเจนที่บุกรุกเข้ามาในร่างกาย ในขั้นตอนที่ I และ II แสดงการที่แอนติเจนบุกรุกเข้ามาในร่างกายและกระตุ้นการทำงานของเซลล์ที ขั้นตอน III และ IV เป็นขั้นตอนที่เซลล์ทีส่ง ข้อมูลไปกระตุ้นเซลล์บี ขั้นตอน V เป็นการจับคู่กับแอนติเจน ขั้นตอน VI เป็นการสร้างแอนติบอดี และขั้นตอน VII เป็นการทำลายแอนติเจนโดยแอนติบอดี

เซลล์ที่มีบทบาทสำคัญของอะแดฟท์ที่พหิมุนิตี คือ เซลล์บีและเซลล์ที ซึ่งพื้นผิวของเซลล์ เหล่านี้มีโมเลกุลของโปรตีนที่เรียกว่า รีเซพเตอร์ (Receptor) รีเซพเตอร์ของเซลล์บีสามารถจับคู่กับ แอนติเจนได้ที่เข้าคู่กับมันได้ การจับคู่นั้นจะทำให้แอนติเจนหมดฤทธิ์ตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การจับคู่กันของแอนติเจนกับแอนติบอดี[12]

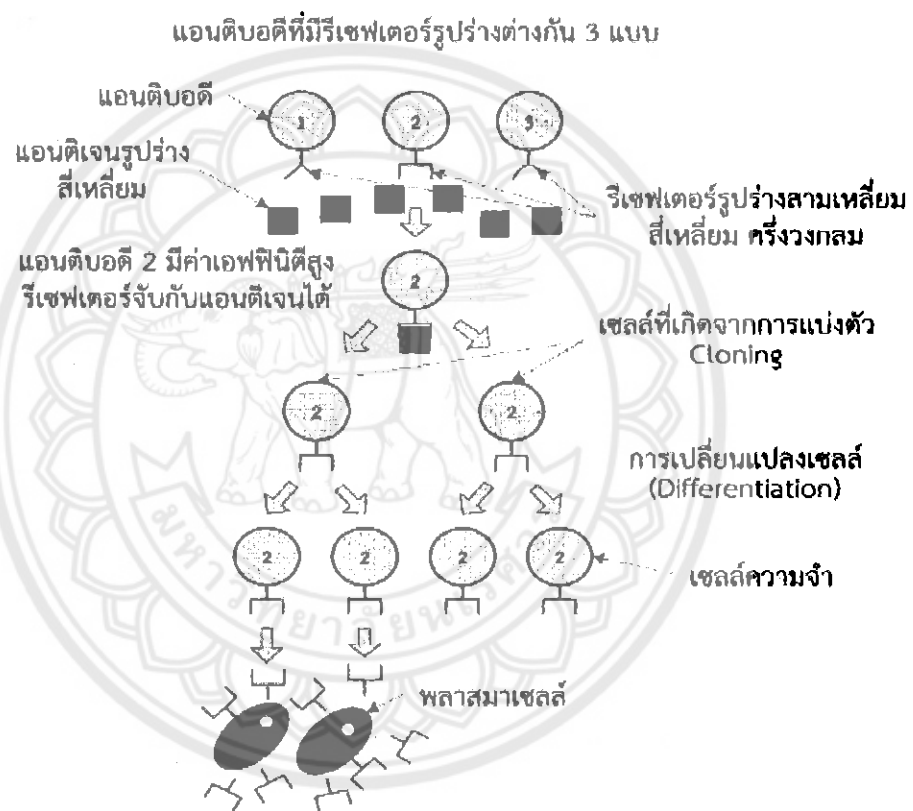
#### 2.4.2 หลักการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันที่เหมาะสมแบบภูมิคุ้มกันประติษฐ์

หลักการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันประติษฐ์นั้นสามารถแบ่งออกได้ทั้งหมด 3 แบบ เพื่อตอบสนองต่อความเหมาะสมในการเลือกไปใช้งานกับการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ

##### 2.4.2.1 หลักการเลือกโคลนอล (Clonal Selection Principle)

ตามหลักการเลือกโคลนอล ระบบภูมิคุ้มกันต่อสู้กับสิ่งแปลกปลอมหรือแอนติเจนด้วยวิธีต่าง ๆ 3 ขั้นตอน คือ กระบวนการเลือกโคลนอล กระบวนการแบ่งตัวอย่างรวดเร็ว (Proliferation) และกระบวนการมาช้าเรชั่น (Maturation) เมื่อเชื้อโรคเข้าสู่ร่างกาย แอนติเจนของเชื้อโรคนั้นจะถูกกำจัดโดยเซลล์ภูมิคุ้มกัน ด้วยการที่เซลล์ภูมิคุ้มกันที่มีรีเซพเตอร์หรือพาราโทปที่สามารถตรวจจับมันได้และเข้าไปจับคู่กับเชื้อโรคที่เรียกว่าแอฟฟินิตี (Affinity) ดังรูปที่ 2.9 จากนั้นเซลล์ภูมิคุ้มกันจะถูกกระตุ้นให้เกิดการแบ่งตัวคือเซลล์บี สำหรับเซลล์บีที่จะจับคู่กับแอนติเจนได้จะต้องมีค่าหรือรูปร่างของรีเซพเตอร์ใกล้เคียงกับรีเซพเตอร์ของแอนติเจน ยิ่งรูปร่างเหมือนกันเท่าไร ค่าแอฟฟินิตีกับแอนติเจนก็จะสูงขึ้นเท่านั้น แล้วเซลล์บีจะถูกกระตุ้นให้จับแอนติเจน โดยแต่ละเซลล์จะหลั่งสารแอนติบอดีเพียงชนิดเดียวที่สามารถต่อสู้กับแอนติเจนชนิดนั้นเท่านั้น จากนั้นเซลล์บีก็จะจับตัวกับแอนติเจนด้วย

รีเซพเตอร์และถูกกระตุ้นให้แบ่งตัวอย่างรวดเร็ว และเซลล์เหล่านี้จะเติบโตไปเป็นเซลล์ที่ไม่สามารถขยายตัวได้อีกเรียกว่าเซลล์พลาสมา (Plasma cells) กระบวนการนี้เรียนว่ามาชัวเรชัน (Maturation) เม็ดเลือดขาวที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นพลาสมาเซลล์แล้วบางส่วนยังมีการเปลี่ยนแปลงเซลล์ (Differentiation) ไปเป็นเซลล์ความจำ (Memory cells) ที่มีอายุยืนเซลล์ความจำนี้จะไหลไปตามกระแสเลือด น้ำเหลือง และเนื้อเยื่อ เมื่อเจอกับแอนติเจนใหม่มันจะเปลี่ยนตัวเองเป็นเม็ดเลือดขาวขนาดใหญ่ที่มีความสามารถในการผลิตแอนติบอดีที่มีแอฟฟินิตีสูงสำหรับการตอบโต้กับแอนติเจนชนิดใหม่ที่เข้ามา



รูปที่ 2.9 การแสดงหลักเลือกโคลนอล[12]

#### 2.4.2.2 อัลกอริธึมการเลือกเชิงลบ (Negative Selection)

การเลือกเชิงลบ (Negative Selection) เป็นกลไกที่ใช้กำจัดลิมโฟไซต์คือเม็ดเลือดขาวที่ทำปฏิกิริยาต่อเซลล์ตัวเอง (Self-cells) การเลือกเชิงลบมีจุดประสงค์เพื่อทำให้เม็ดเลือดขาวที่อยู่ในระบบภูมิคุ้มกันประดิษฐ์สามารถตรวจจับแอนติเจนที่เป็นสิ่งแปลกปลอม โดยไม่มีปฏิกิริยาต่อเซลล์ตัวเอง ในระหว่างการสร้างเซลล์ที่ยืนที่กำหนดคุณสมบัติในการจับคู่กับแอนติเจนจะถูกสร้างอย่างสุ่ม

ที่ต่อมไทมัส (Thymus) โดยเซลล์ที่ทำปฏิกิริยาต่อตัวเองจะถูกทำลาย ส่วนเซลล์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือเซลล์ที่สามารถจับคู่กับแอนติเจนได้จะถูกนำไปใช้ตามส่วนต่างๆของร่างกาย

หลักการดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมครั้งแรกโดยการออกแบบอัลกอริธึมสำหรับสร้างระบบดักจับไวรัสที่บุกรุกเข้ามาในคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดหลักการสำคัญสามอย่างดังนี้

1. อัลกอริธึมสำหรับการตรวจสอบ (Detection) ใช้ได้กับเอกสารหนึ่งฉบับเท่านั้น การตรวจสอบไวรัสแต่ละส่วนจะเป็นไปอย่างอิสระ
2. การตรวจสอบความน่าจะเป็น (Probability) หมายความว่าไวรัสที่บุกรุกเข้าไปในระบบใดระบบหนึ่งสำเร็จมีความเป็นไปได้ที่จะบุกรุกเข้าอีกระบบอื่นๆสำเร็จ
3. ระบบที่มีความมั่นคงจะต้องสามารถป้องกันการรุกรานจากสิ่งแปลกปลอมทุกชนิดได้ อัลกอริธึมเชิงลบจะแบ่งได้สองส่วนคือ
  - 3.1 การสร้างชุดของผู้ตรวจสอบ (Detectors) โดยให้ชุดผู้ตรวจสอบสตริงไม่สามารถจับคู่ (Match) กับข้อมูลที่ต้องการป้องกันได้ เรียกขั้นตอนนี้ว่าเซนเซอร์ (Censoring)
  - 3.2 การติดตาม (Monitor) ป้องกันข้อมูลโดยการเปรียบเทียบ (Compare) ข้อมูลที่ต้องการป้องกันกับชุดผู้ตรวจสอบที่ได้จากส่วนแรก

การจับคู่ (Match) ของสตริงเป็นการนำสตริงสองชุดมาเปรียบเทียบกันถ้าสตริงเหมือนกันจะสามารถจับคู่กันได้ถ้าไม่สามารถจับคู่ได้จะถูกยกเลิกไปและสุ่มตัวสตริงใหม่แทนที่ นั่นคือ ระบบจะทำการจับคู่โดยมีเซลล์สตริงตัวเองและมีสตริงสุ่มเลือกมาจับคู่กับเซลล์สตริงตัวเองถ้าเซลล์ที่สุ่มมาสามารถแมทช์กับเซลล์ตัวเองได้จะถือว่าเป็นเซลล์ตัวเองแต่ถ้าไม่สามารถจับคู่ได้จะถูกพิจารณาว่าเป็นไวรัสและจะถูกส่งไปยังชุดตรวจสอบ คือ ชุดสตริงสะสมที่แมทช์กับเซลล์ตัวเอง หรือเรียกว่า เรเพอร์ทัวร์ (Repertoire)

#### 2.4.2.3 โครงข่ายภูมิคุ้มกัน (Immune network)

ความยากของการทำงานในระบบภูมิคุ้มกันก็คือ ในบางครั้งแอนติบอดีสามารถรู้จำและทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะที่มันอาศัยอยู่ ซึ่งเป็นการทำร้ายตัวเองที่เนื่องมาจากการจับคู่กันของแอนติบอดีและเซลล์ของร่างกายหรือเซลล์ของตัวเอง เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาดังกล่าว ระบบภูมิคุ้มกันจะต้องกำจัดหรือยับยั้งแอนติบอดีตัวที่จะก่อให้เกิดปัญหาพื้นที่มันถูกผลิตออกมา การที่จะทำเช่นนี้ได้ระบบภูมิคุ้มกันจะต้องทราบว่าแอนติบอดีนั้นมีระบบการรู้จำที่เป็นการรู้จำตนเองหรือไม่ใช่เซลล์ของตัวเอง (Self and Non self-Cell Recognition) เพื่อที่จะให้ระบบกำจัดแอนติบอดีที่มีการรู้จำแบบเซลล์ตัวเองออกได้ถูกตัว วิธีนี้เป็นวิธีที่ร่างกายป้องกันการทำลายตัวเองด้วยการควบคุมอัลกอริธึมของการเลือกเชิงลบดังที่กล่าวมาแล้วนั้นเป็นวิธีการกำจัดแอนติบอดีที่มีการรู้จำแบบเซลล์ตัวเองแบบหนึ่ง วิธีการควบคุมอีกวิธีหนึ่งในการป้องกันการทำลายตัวเองคือ โมเดลโครงข่ายภูมิคุ้มกัน (Immune Network Models)

การทำงานของโครงข่ายภูมิคุ้มกัน จากทฤษฎีนี้ถูกนำเสนอโดยเจอร์เน่ (Jerne,1974) โดยมีสมมุติฐานว่าระบบภูมิคุ้มกันจะรักษาโครงข่ายไอดีโอไทปิก (Idiotypic Network) ที่เชื่อมต่อกัน



ภายในของเซลล์บีเพื่อการรู้จำแอนติเจนเซลล์เหล่านี้จะมีการกระตุ้น (Stimulation) และการยับยั้ง (Suppression) ซึ่งกันและกันด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสถียรของโครงข่าย เมื่อเซลล์ บี 2 ตัวจะเชื่อมต่อกัน ถ้าหากว่าค่าความมั่นคงของการจับคู่กันที่เรียกว่าแอฟฟินิตี (Affinity) ของพวกมันมีค่ามากกว่าค่าธรสโฮลด์ (Threshold) ที่กำหนด

1. การจับคู่กันของแอนติบอดีและแอนติเจน (Antibody and Antigen Binding) แอนติบอดีจะมีพาราโทป 2 อันที่ใช้สำหรับการเลือก (Selection) และการจับคู่ (Matching) กับโมเลกุลอื่น การเลือกและการจับคู่นี้จะเป็นกระบวนการเดียวกัน โดยที่พาราโทปนี้จะจับคู่กับอีพิโทปที่มีรูปร่างเข้ากันได้เท่านั้น ดังรูปที่ 2.8 ความมั่นคงของการจับตัวกันขึ้นอยู่กับว่าพาราโทปเข้ากันได้สนิทแค่ไหน ยิ่งเข้ากันได้สนิทเท่าไรความมั่นคงของการเกาะติดก็จะมีมากเท่านั้น และการรู้จำกันก็จะดีมากขึ้นด้วย

2. การกระตุ้นเซลล์บี (B-cell Stimulation) ที่บริเวณพื้นผิวของเซลล์บีที่เป็นแอนติบอดีนั้น เมื่อแอนติบอดีของเซลล์บีจับตัวกับแอนติเจน เซลล์บีจะถูกกระตุ้น ระดับของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับว่าเซลล์บีนั้นจับคู่กับแอนติเจนได้ดีแค่ไหน นอกจากนั้น เซลล์ที่เฮลเปอร์ก็มีผลต่อเซลล์บีเช่นกัน พาราโทปของเซลล์บีจะต่างจากเซลล์บีที่สามารถรู้จำเศษ (Fraction) ของแอนติเจนด้วย เศษของแอนติเจนนี้เกิดจากการที่พาราโทปและอีพิโทปจับกันไม่สนิทเพราะรูปร่างของโมเลกุลพาราโทปและอีพิโทปมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โมเลกุลเหล่านี้เรียกว่า เอ็มเอชซี (MHC: Major Histocompatibility Complex) ในขณะที่เซลล์บีไหลเวียนไปตามร่างกาย เซลล์ที่เฮลเปอร์เหล่านี้จะทำการตรวจจับเซลล์ต่างๆในร่างกายเพื่อหาแอนติเจน เมื่อเซลล์ที่เฮลเปอร์จับคู่กับของเหลวแอนติเจนได้ เซลล์บีนี้จะช่วยกระตุ้นเซลล์บีอีกแรงหนึ่ง ถ้าการกระตุ้นของเซลล์บีถึงจุดธรสโฮลด์ เซลล์บีก็จะแปลงเป็นเซลล์ตัวอ่อน (Blast Cell) เซลล์ตัวอ่อนเหล่านี้จะเกิดการแบ่งตัวอย่างรวดเร็วด้วยการโคลนตัวมันเองเป็นผลให้เซลล์บีใหม่คัดลอกคุณสมบัติของพาราโทปของเซลล์บีเดิมไว้ กระบวนการนี้เปรียบเสมือนหนึ่งของกระบวนการรู้จำของเซลล์บี

3. กลไกของโครงข่ายภูมิคุ้มกัน (Immune Network Mechanism) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ระดับของการกระตุ้นนี้จะขึ้นอยู่กับความมั่นคงในการยึดเกาะกันของเซลล์บีในระบบภูมิคุ้มกัน ซึ่งการยึดเกาะกันนี้ทำให้เกิดโครงข่ายเซลล์บีที่รู้จำเซลล์บีตัวอื่นๆในระบบโครงข่ายเหล่านี้จะเป็นแบบเซลล์ออกาโนส การอยู่รอดของโครงข่ายขึ้นอยู่กับ การจับคู่กันของพวกมันกันเอง และการมีกลไกการป้อนกลับ (Feedback) ซึ่งทั้งสองดังกล่าวเป็นตัวสะท้อนความมั่นคง ยิ่งเซลล์บีมีเซลล์ข้างเคียง (Neighborhood) มากขึ้นเท่าไร การกระตุ้นกันที่ได้จากโครงข่ายก็จะมีมากขึ้นเท่านั้น การอยู่รอดของเซลล์บีขึ้นอยู่กับความมั่นคงของการยึดเกาะกับแอนติเจนที่มันจับตัวอยู่ด้วยที่นอกจากเซลล์ข้างเคียงที่มีอยู่ในโครงข่ายภูมิคุ้มกันอยู่แล้ว เซลล์บีใหม่มีการพัฒนาวิธีการจับคู่กับแอนติเจนและจะแบ่งตัวทำให้มันสามารถอยู่รอดนานกว่าเซลล์บีเดิมได้ ด้วยการทำงานตามกระบวนการข้างต้นซ้ำแล้วซ้ำอีกในลักษณะป้อนกลับดังกล่าว ทำให้ระบบภูมิคุ้มกันเรียนรู้วิธีการจับคู่กับแอนติเจนที่ดีที่สุด

## บทที่ 3

### แผนการดำเนินงาน

บทนี้จะแสดงแผนการดำเนินงานสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประติพันธ์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า ที่ถูกสร้างโดย Sripakagorn and Srikam [2] ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่ทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างปานกลาง

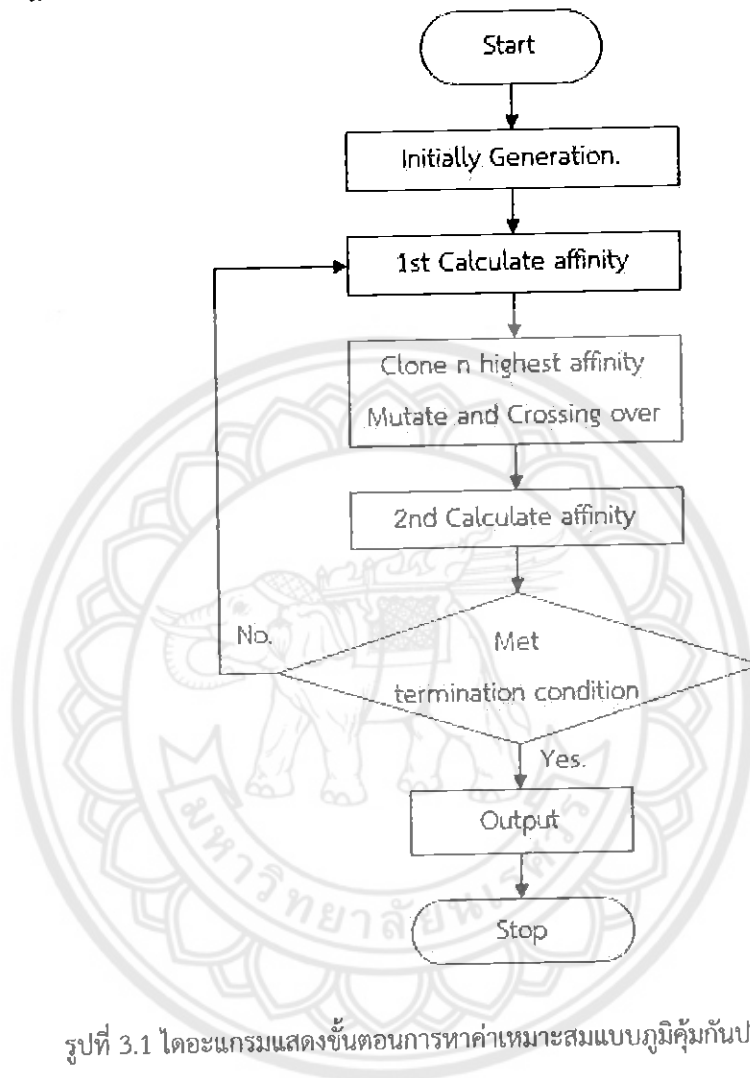
#### 3.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังบ่งชี้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติ Second-order Stirling engine model แบบ Quasi Steady Flow model ที่พัฒนาขึ้นโดย Kraitong [1] และค่ากำลังเพลจากการคำนวณด้วยค่าประสิทธิภาพเชิงกลมีค่าเท่ากับ 0.8 กับค่ากำลังเพลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเครื่องยนต์ต้นแบบเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า ทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างปานกลาง ได้รับความร้อนจากภายนอกในส่วนให้ความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ  $500^{\circ}\text{C}$  และส่วนระบายความร้อนใช้น้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับ  $35^{\circ}\text{C}$  ในการรับความร้อนออกไปทั้ง ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 360 rpm ที่ความดันเฉลี่ย 7 bar

#### 3.2 การหาจุดออกแบบที่เหมาะสม

ระเบียบวิธีหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบภูมิคุ้มกันประติพันธ์จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อหาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของชุดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า ซึ่งวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบภูมิคุ้มกันประติพันธ์เป็นการหาค่าความเหมาะสมแบบสุ่มซึ่งอาศัยหลักการการป้องกันตัวเองเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอม (Antigen) ที่บุกรุกเข้ามาออกจากร่างกาย

ซึ่งการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นจะใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกัน ประดิษฐ์แบบหลักการเลือกของโคลนอล (Clonal selection principle)



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมแบบภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ [13]

จากรูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการสามารถถูกอธิบายโดยย่อได้ดังนี้

1. การสร้างสมการจุดประสงค์ (Objective function) โดยกำหนดเป็นค่ากำลังที่ได้จากเครื่องยนต์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นค่าของแอนติบอดี (Antibody) และกำหนดค่าพารามิเตอร์การออกแบบ (Variables) ในแต่ละแอนติบอดี
2. สร้างแอนติบอดีเริ่มต้น (Initial generation) ด้วยการสุ่มเลือก
3. หาค่าแอฟฟินิตี (Affinity) ในแต่ละแอนติบอดีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติที่ถูกพัฒนาขึ้น

4. ทำการโคลนแอนติบอดีที่มีค่าแอฟฟินิตีที่มากกว่าค่าธรสโฮลด์ (Threshold)
5. ทำการ mutation and crossing over กับแอนติบอดีที่โคลนมา
6. ทำการคัดแอนติบอดีที่มีค่าแอฟฟินิตีน้อยออก เหลือเพียงแค่แอนติบอดีที่มีค่าแอฟฟินิตีสูงสุดไว้เพียงตัวเดียวเท่านั้น
7. ทำการแทนที่แอนติบอดีที่ถูกคัดออกด้วยการสุ่มเลือก
8. ตรวจสอบการสิ้นสุดคำตอบโดยการคำนวณจะสิ้นสุดเมื่อการคำนวณมาถึงจำนวนที่มากที่สุดของรุ่น (Maximum generation) ที่ถูกกำหนดไว้หรือมีความแตกต่างของค่าจากที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่นตามที่ได้กำหนดไว้ไม่เช่นนั้นโปรแกรมจะวนกลับไปเริ่มสร้างชุดแอนติบอดีรุ่นถัดไป และจะทำการคำนวณจนกว่าพบกับข้อกำหนดการตรวจสอบ

### 3.2.1 การกำหนดสมการจุดประสงค์สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยที่อัตราส่วนองค์ประกอบของส่วนให้ความร้อนกับส่วนระบายความร้อนมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จะทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีทั้งหมด 6 พารามิเตอร์ จะถูกกำหนดเป็นองค์ประกอบของแอนติบอดี ซึ่งสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังนี้

$$\text{Antibody} = (lr; Wh; Deeph; Deepk; Wk; lh)$$

และกำหนดขอบเขตสูงสุด ต่ำสุดของค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าได้ดังนี้

1.  $0.01 \leq lr \leq 0.07$  ; lr is length of regenerator , m
2.  $0.0002 \leq Wh \leq 0.001$  ; Wh is width of heater slot , m
3.  $0.0015 \leq Deeph \leq 0.0035$  ; Deeph is depth of heater slot , m
4.  $0.0015 \leq Deepk \leq 0.0035$  ; Deepk is depth of cooler slot , m
5.  $0.0002 \leq Wk \leq 0.001$ ; Wk is width of cooler slot, m
6.  $0.01 \leq lh \leq 0.07$  ; lh is length of heater , m

กรณีนี้สามารถหาค่ากำลังบ่งชี้จากสมการจุดประสงค์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติ second-order Stirling engine model ที่ถูกนำเสนอโดย Kraitong [1]

$$\text{Indicated power} = f(\text{antibody}) = f(lr; Wh; Deepk; Deepk; Wk; lh; lk)$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์นั้นค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์อื่น ได้แก่ ความกว้างของส่วนให้ความร้อนและส่วนระบายความร้อนจะส่งผลต่อจำนวนของร่อง slot เมื่อความกว้างเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จำนวนของร่อง slot ลดลงตามไปด้วย และความยาวของส่วนให้ความร้อนกับความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์จะส่งผลต่อความยาวของส่วนระบายความร้อน ซึ่งความยาวของส่วนให้ความร้อน ความยาวของส่วนระบายความร้อน และความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์รวมกันจะต้องมีค่าเท่ากับ 145 mm หรือ 0.145 m ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางกายภาพของเครื่องยนต์ขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า

### 3.2.2 Generation of the initial antibody

การกำหนดจำนวนแอนติบอดีในแต่ละรุ่นนั้นจะทำการกำหนดโดยการสุ่มเลือกค่าพารามิเตอร์ของแต่ละยีนในแอนติบอดีในรูปแบบแมทริกซ์

$$\text{population} = \text{rand}(N_{\text{pop}}, N_{\text{var}})$$

เมื่อ  $N_{\text{pop}}$  คือจำนวนแอนติบอดี และ  $N_{\text{var}}$  คือจำนวนยีนที่ทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์

### 3.2.3 Evaluation

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติ Second-order Stirling engine model ที่ถูกนำเสนอโดย Kraitong [1] นั้นสามารถคำนวณหาค่ากำลังบ่งชี้ออกมาได้ จากการนำเอาค่าพารามิเตอร์ของแอนติบอดีใส่เข้าไปในแบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่จะทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และค่ากำลังบ่งชี้ที่ออกมาในแต่ละแอนติบอดีนั้นจะถูกประเมินผลโดย fitness function ซึ่งเป็นการจัดลำดับของค่าที่คำนวณออกมาจากแบบจำลองในแต่ละรุ่นของแอนติบอดี

$$\text{Fitnessvalue} = \frac{1}{1 + \text{maxvalue} - \text{value}}$$

เมื่อ maxvalue คือค่ากำลังบ่งชี้ที่มากที่สุดในแอนติบอดีรุ่นนั้น ๆ และ value คือค่ากำลังบ่งชี้ของแอนติบอดี

### 3.2.4 Selection process

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากการหาค่า fitness value ของแต่ละแอนติบอดีเพื่อจัดลำดับของแอนติบอดี เพื่อการที่จะหาจำนวนของแอนติบอดีที่อยู่รอดสู่รุ่นต่อไป

$$N_{\text{keep}} = X_{\text{rate}} N_{\text{pop}}$$

เมื่อ  $X_{\text{rate}}$  คืออัตราการอยู่รอดของแอนติบอดี และ  $N_{\text{keep}}$  คือจำนวนการอยู่รอดของแอนติบอดี และ  $N_{\text{pop}}$  คือจำนวนแอนติบอดี

### 3.2.5 Clone and Mutation

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการคัดเลือก ซึ่งจะเป็นการโคลนหรือการแบ่งตัวของแอนติบอดีที่ถูกเลือกออกมา

$$N_{\text{newpop}} = N_{\text{keep}} N_{\text{clone}}$$

เมื่อ  $N_{\text{newpop}}$  คือแอนติบอดีทั้งหมดหลังจากการโคลนแล้ว และ  $N_{\text{clone}}$  คือจำนวนแอนติบอดีที่โคลนออกมา

หลังจากที่ทำการโคลนหรือการแบ่งตัวของแอนติบอดีแล้วจะเป็นการทำกระบวนการกลายพันธุ์ (Mutation process) ซึ่งการทำ mutation นั้นจะช่วยให้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดออกมาไวขึ้น ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนค่ายีนโดยการสุ่มเลือก ซึ่งมีอัตราการเกิด mutation ดังต่อไปนี้

$$n_{\text{mut}} = X_{\text{mutate}} N_{\text{newpop}}$$

เมื่อ  $X_{\text{mutate}}$  คืออัตราการเกิด mutation และ  $n_{\text{mut}}$  คือจำนวนแอนติบอดีที่จะทำ mutation

### 3.2.6 Crossing over

เป็นกระบวนการที่จะทำการสลับตำแหน่งของยีน ซึ่งการจับคู่ระหว่างแอนติบอดีที่จะทำ crossing over และตำแหน่งของยีนที่จะทำการสลับตำแหน่งนั้นมาจากการสุ่มเลือก

### 3.2.7 Convergence check

เป็นกระบวนการตรวจสอบการสิ้นสุดเงื่อนไขของค่าความ โดยขั้นแรกจำนวนรุ่นของแอนติบอดีที่มากที่สุดที่จะเข้ามาคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติ Second-order

Stirling engine model ที่ถูกนำเสนอโดย Kraitong [1] นั้นเท่ากับ 80 รุ่น หรือเท่ากับ 80 generation ส่วนขั้นที่ 2 นั้นจะเป็นการตรวจสอบค่ากำลังบ่งชี้ที่มากที่สุดในแต่ละรุ่นของแอนติบอดี นั้นมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ากำลังบ่งชี้ที่มากที่สุดในแอนติบอดีในรุ่นก่อนหน้านั้น 10 รุ่นซึ่งถ้าสามารถตรวจสอบเจอเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งจากทั้ง 2 เงื่อนไขนี้ โปรแกรมจะหยุดการทำงานทันที และจะทำการแสดงชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิด เบต้าออกมา

### 3.2.8 ผลของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ผลของค่าชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิด เบต้าโดยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประติมากรรม จะถูกแสดงผลเป็นตารางเปรียบเทียบกับชุดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ต้นแบบและแสดงผลเป็นกราฟระหว่างค่ากำลังบ่งชี้ในแต่ละรุ่นของแอนติบอดี



## บทที่ 4

### วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังบ่งชี้และกำลังเพลลาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า ที่ทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกันปานกลาง โดยใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติซึ่งถูกพัฒนาโดย Kraitong [1] และสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์เพื่อใช้ในการยืนยันผลของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์

#### 4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้รับความร้อนจากภายนอกในส่วนให้ความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ  $500^{\circ}\text{C}$  และส่วนระบายความร้อนใช้น้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับ  $35^{\circ}\text{C}$  ในการรับความร้อนออกไปทั้ง ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 360 rpm ชนิดของสารทำงานเป็นอากาศ ทำงานที่ความดันเฉลี่ย 7 bar ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ค่ากำลังบ่งชี้ (Indicated power) ออกมาเท่ากับ 131.3 W และสามารถคำนวณเป็นค่ากำลังเพลลาเท่ากับ 105.04 W โดยใช้ค่าการคำนวณของค่าประสิทธิภาพทางกลเท่ากับ 0.8 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้เมื่อเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดย Sripakagorn and Srikam [2] โดยได้ค่ากำลังเพลลา (Brake power) เท่ากับ 95.4 W ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

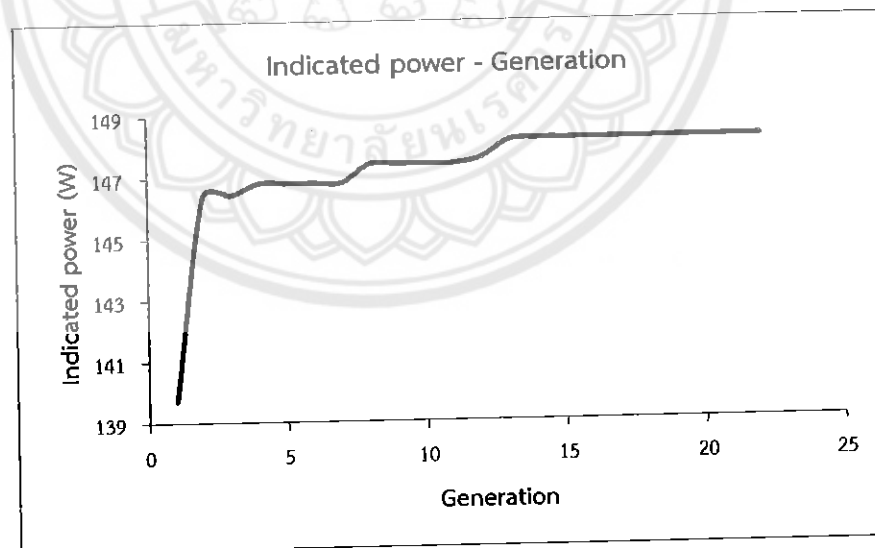


ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Result	Experiment [2]	The developed second-order model	The developed second-order model $\eta_{\text{mech}} = 0.8$
Break power (W)	95.4	-	105.04
Indicated power (W)	-	131.3	-

#### 4.2 การหาค่าจุดออกแบบที่เหมาะสม

การนำเสนอผลจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า ที่ทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกันปานกลาง โดยใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประติมากรรมร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติซึ่งถูกพัฒนาโดย Kraitong [1] ซึ่งเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ 360 rpm ชนิดของสารทำงานเป็นอากาศ ความดันเฉลี่ยในการทำงาน 7 bar ขนาดของประชากรได้ถูกเลือกให้เป็น 30 แอนติบอดีต่อรุ่น อัตราการเกิด mutation ถูกเลือกให้เป็น 0.2



รูปที่ 4.1 ค่าที่มากที่สุดของค่ากำลังบ่งชี้ในแต่ละรุ่นของแอนติบอดี

จากกำลังบ่งชี้ที่มากที่สุดในแต่ละรุ่นของแอนติบอดีกับรุ่นของแอนติบอดีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งในช่วงแรกค่ากำลังบ่งชี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงรุ่นแรก ๆ ของแอนติบอดี และจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ จนโปรแกรมตรวจพบเงื่อนไขในการหยุดการทำงาน ซึ่งค่ากำลังบ่งชี้ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 148.19 W ที่แอนติบอดีรุ่นที่ 22 และชุดค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแอนติบอดีรุ่นที่ 22 ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ดั้งเดิมของเครื่องยนต์ต้นแบบดังแสดงในตารางที่ 4.2

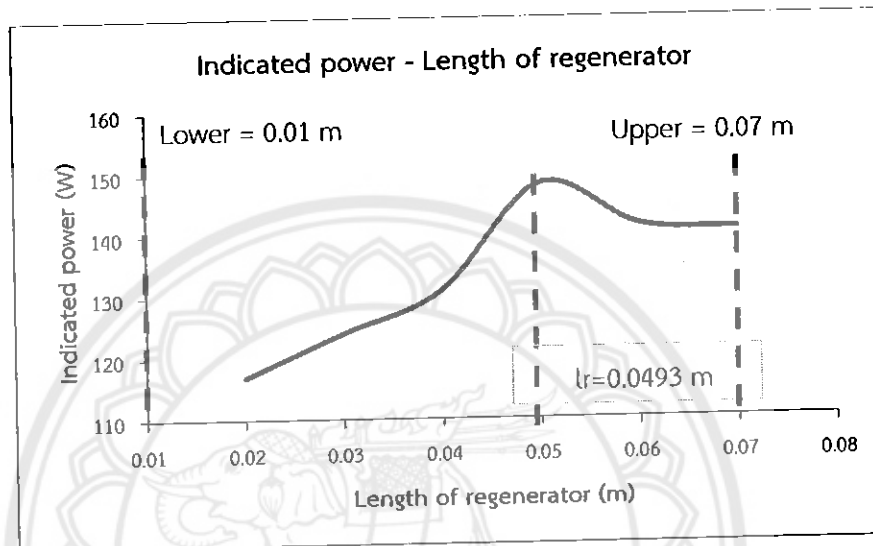
อย่างไรก็ตามค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการหาค่าจุดออกแบบที่เหมาะสมโดยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประติขันธ์นั้นให้ค่ากำลังบ่งชี้ออกมามากกว่าค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากเครื่องยนต์ต้นแบบจาก 131.3 W เพิ่มขึ้นเป็น 148.19 W และค่ากำลังเพลลาเพิ่มขึ้นจาก 105.04 W เป็น 118.55 W โดยใช้ค่าการคำนวณของค่าประสิทธิภาพทางกลเท่ากับ 0.8

ตารางที่ 4.2 ค่าจุดออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้าทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างปานกลางจากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประติขันธ์

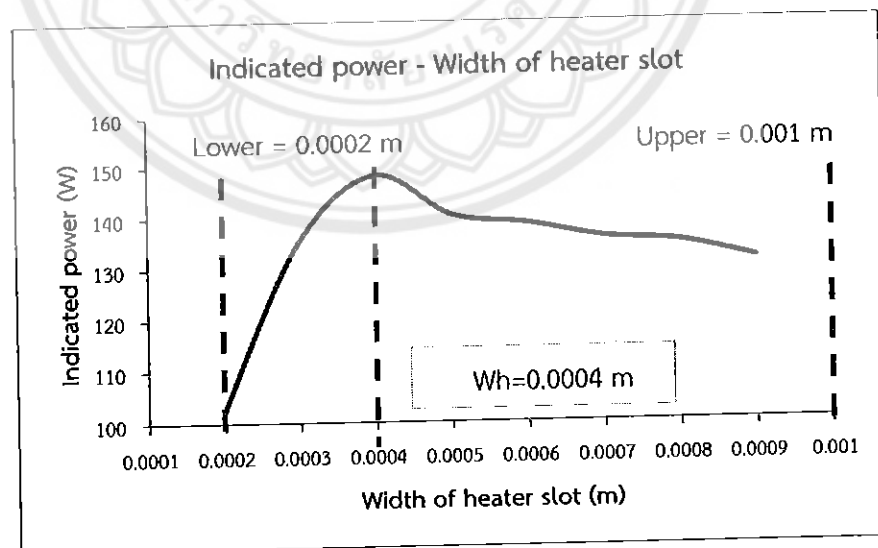
Engine parameter	Engine parameters of the original Beta-type Stirling engine	Optimal engine parameters
length of regenerator (m)	0.0410	0.0493
width of heater slot (m)	0.0005	0.0004
depth of heater slot (m)	0.0026	0.0030
depth of cooler slot (m)	0.0029	0.0026
width of cooler slot (m)	0.0005	0.0005
length of heater (m)	0.0570	0.0457
Indicated power (W)	131.3	148.19

จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลจากการหาค่าจุดออกแบบที่เหมาะสมที่สุด พบว่าค่าความยาวของส่วนให้ความร้อนมีความยาวน้อยกว่าเดิมจาก 0.0570 m เป็น 0.0457 m ความยาวของรีเจเนอเรเตอร์มีความยาวมากกว่าเดิมจาก 0.0410 m เป็น 0.0493 m ค่าความกว้างของร่อง slot ของส่วนให้ความร้อนลดลงจาก 0.0005 m เป็น 0.0004 m ค่าความกว้างของร่อง slot ของส่วนระบาย

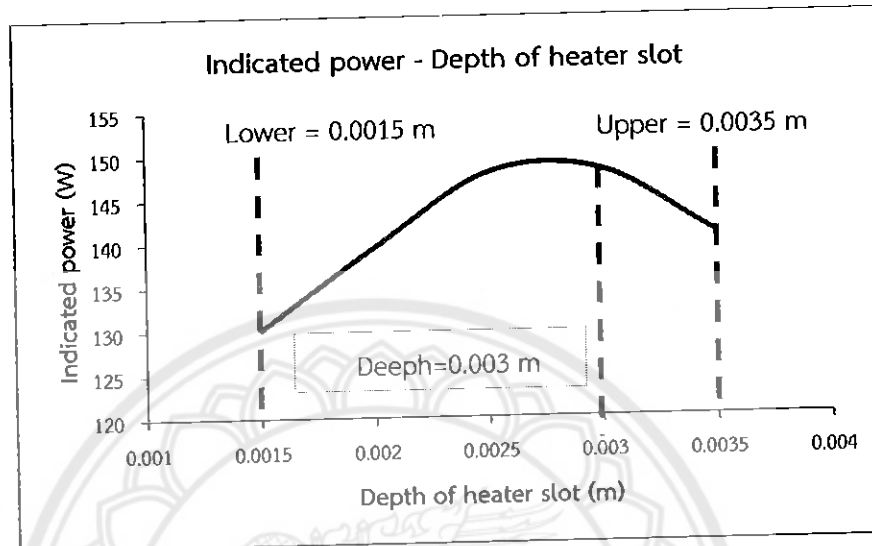
ความร้อนมีค่าเท่าเดิม ค่าความลึกของร่อง slot ของส่วนให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0026 m เป็น 0.0030 m และค่าความลึกของร่อง slot ของส่วนระบายความร้อนมีค่าลดลงจาก 0.0029 m เป็น 0.0026 m



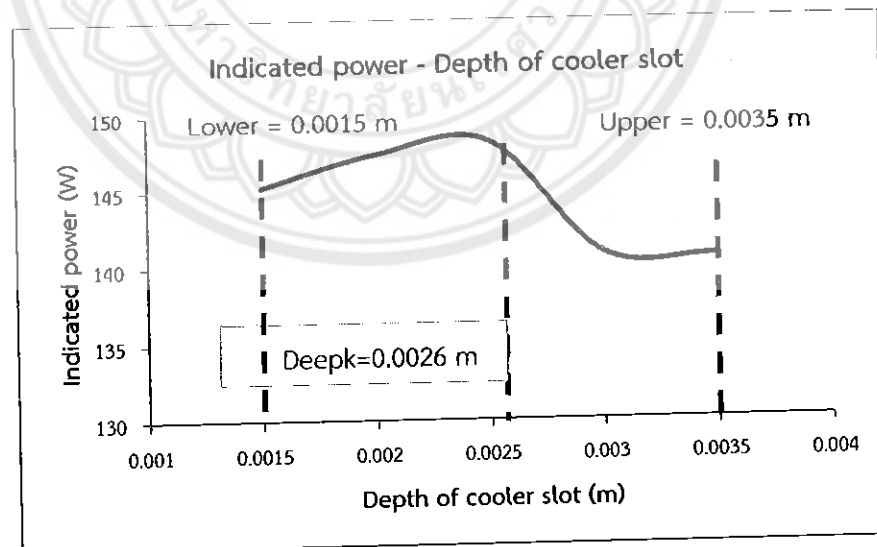
รูปที่ 4.2 ค่ากำลังบ่งชี้กับความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์



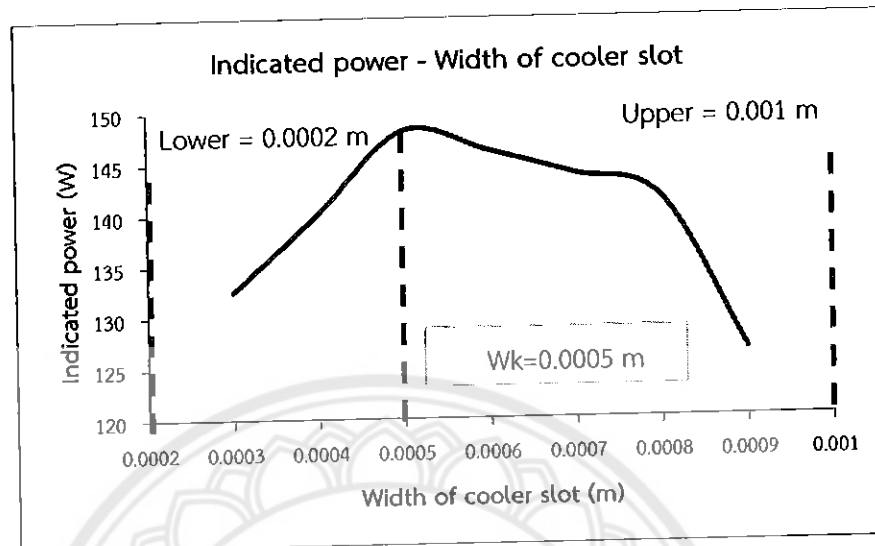
รูปที่ 4.3 ค่ากำลังบ่งชี้กับความกว้างของร่อง slot ในส่วนให้ความร้อน



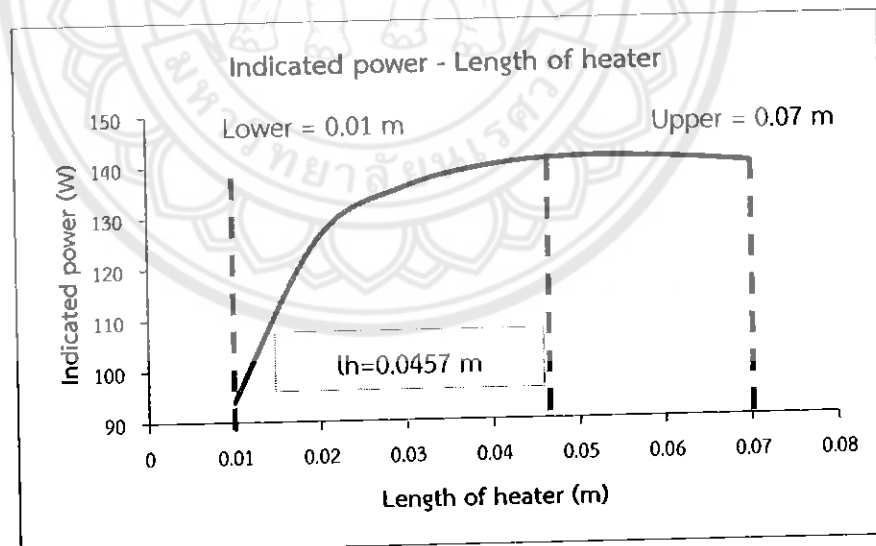
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังบ่งชี้กับความลึกของร่อง slot ในส่วนให้ความร้อน



รูปที่ 4.5 ค่ากำลังบ่งชี้กับความลึกของร่อง slot ในส่วนระบายความร้อน



รูปที่ 4.6 ค่ากำลังบ่งชี้กับความกว้างของร่อง slot ในส่วนระบายความร้อน



รูปที่ 4.7 ค่ากำลังบ่งชี้กับความยาวของส่วนให้ความร้อน

ค่าชุดพารามิเตอร์ที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีภูมิคุ้มกันประติมากรรมนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ตัวแปรที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.2-4.7

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มขนาดของความยาวของรีเจเนเรเตอร์ทำให้ค่ากำลังบ่งชี้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จนกระทั่งถึงค่าที่ได้กำลังค่าบ่งชี้สูงสุดที่ความยาวรีเจเนเรเตอร์ใกล้เคียงกับ 0.0493 เมตร ( $lr=0.0493m$ ) จากนั้นความดันตกคร่อมทำให้ค่ากำลังบ่งชี้ลดลง ในทางเดียวกัน การเพิ่มความหนาของร่อง slot จะทำให้ค่ากำลังบ่งชี้เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดดังรูปที่ 4.3 ที่ความกว้างของร่อง slot ในส่วนให้ความร้อนใกล้เคียงกับ 0.0004 เมตร ( $Wh=0.0004 m$ ) ส่วนเมื่อมีการเพิ่มความกว้างของร่อง slot ที่มากกว่าค่าที่เหมาะสมนั้นจะทำให้เส้นกราฟลดลงอย่างต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.4 กราฟที่มีลักษณะคล้ายโดมเป็นนั่นคือความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังบ่งชี้กับความลึกของร่อง slot ในส่วนให้ความร้อน ได้ค่าสูงสุดที่ความลึกใกล้เคียงกับ 0.003 เมตร ( $Deeph=0.003 m$ ) ส่วนรูปที่ 4.5 นั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังบ่งชี้กับความลึกของร่อง slot ในส่วนระบายความร้อนซึ่งให้ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดที่บริเวณความลึกไม่ห่างจากค่า 0.0026 เมตร ( $Deepk=0.0026 m$ )

จากรูปที่ 4.6 ค่ากำลังบ่งชี้กับความหนาของร่อง slot ในส่วนระบายความร้อนเช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มความหนาของร่องให้ค่าบ่งชี้กำลังที่เพิ่มขึ้น จนได้ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดที่บริเวณความกว้างไม่ห่างจากค่า 0.0005 เมตร ( $Wk=0.0005 m$ ) จากนั้นกราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนการเพิ่มความยาวของส่วนให้ความร้อนเช่นกันค่ากำลังบ่งชี้เพิ่มขึ้นตามความยาว จนถึงความยาวของส่วนให้ความร้อนเท่ากับ 0.0457 เมตร ( $lh=0.0457 m$ ) ที่ใกล้เคียงกับค่าความยาวที่ให้ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุด จากนั้นเมื่อเพิ่มความยาวแล้วจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าบ่งชี้กำลังเพียงเล็กน้อยในการนำไปใช้งาน จึงไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ดังรูปที่ 4.7

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงาน

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังงันและกำลังเพลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และผลการหาค่าจุดออกแบที่เหมาะสมที่สุด

#### 5.1 สรุปผล

ผลการดำเนินงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ค่ากำลังงันออกมาเท่ากับ 131.3 W และสามารถคำนวณเป็นค่ากำลังเพลเท่ากับ 105.04 W โดยใช้ค่าการคำนวณของค่าประสิทธิภาพทางกลเท่ากับ 0.8 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้เมื่อเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดย Sripakagorn and Srikam [2] ซึ่งมีค่ากำลังเพลเท่ากับ 95.4 W

5.1.2 ผลที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็ก SEB-100 ชนิดเบต้า ทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างปานกลาง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งมิติซึ่งถูกพัฒนาโดย Kraitong [1] ร่วมกับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นใช้ระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์แบบการเลือกโคลนอล (Clonal selection principle) ซึ่งให้ค่ากำลังงันที่ได้จากการหาค่าจุดออกแบที่เหมาะสมมากกว่าค่ากำลังงันที่ได้จากเครื่องยนต์ต้นแบบ

จากการวิเคราะห์ตัวแปรของชุดพารามิเตอร์ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ พบว่าค่าตัวแปรที่ได้ให้ค่ากำลังงันในช่วงที่มีค่าสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ได้ หรือในการออกแบเพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะสูงสุดได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 งานวิจัยนี้เป็นงานที่ศึกษาเกี่ยวกับออกแบบการเขียนโปรแกรม MATLAB ซึ่งคณะผู้จัดทำไม่มีประสบการณ์ในการออกแบบโปรแกรมมาก่อนเมื่อเกิดปัญหาทำให้ ต้องใช้เวลาในการแก้ไขนานพอสมควร และสมรรถนะของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่งผลอย่างมากต่อการทำงานของโปรแกรมดังกล่าว ถ้าหากเครื่องคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะที่สูงก็จะส่งผลให้การปรับปรุงแก้ไขรวดเร็วขึ้น และจะลดระยะเวลาที่ใช้ในการหาผลลัพธ์ได้เป็นอย่างมาก

5.2.2 เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการหาจุดออกแบบที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีทางภูมิคุ้มกันประดิษฐ์เพียงอย่างเดียว ทางผู้จัดทำจึงอยากจะเสนอให้ผู้สนใจลองศึกษาเกี่ยวกับการนำผลที่ได้จากการหาค่าจุดออกแบบที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีการอื่น ๆ เช่น โครจข่ายภูมิคุ้มกัน เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ เป็นต้น





### เอกสารอ้างอิง (Reference)

- [1] K. Kraitong. Numerical modelling and design optimisation of Stirling engines for power production. PhD Thesis (2012). School of Computing, Engineering and Information Sciences, University of Northumbria at Newcastle.
- [2] A. Sripakagorn, C. Srikam. Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine. *Renewable Energy*, 36 (2011):1728-1733.
- [3] D. Mills. Advances in solar thermal electricity technology. *Solar Energy*, 76 (2004):19-31.
- [4] <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/type/type.html>
- [5] <http://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20461/Notes/Stirling%20Cycle.pdf>
- [6] A. Minassians. Stirling Engines for Low-temperature Solar-thermal-electric Power Generation. PhD Thesis (2007), University of California, Berkeley. 79
- [7] F.P. Incropera, D.P. Dewitt. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley, 2007, 89
- [8] B. Thomas, D. Pittman. Update on the evaluation of different correlations for the flow friction factor and heat transfer of Stirling engine regenerators. *Proceedings of the 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibition, Las-Vegas, USA, 2000*, pp. 76-84 vol.71.
- [9] I. Tlili, Y. Timoumi, S.B. Nasrallah. Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application. *Renewable Energy*, 33 (2008):1911-1921.
- [10] Y. Timoumi, I. Tlili, S. Ben Nasrallah. Design and performance optimization of GPU-3 Stirling engines. *Energy*, 33 (2008):1100-1114.

- [11] Rekish K. Bumataria and Nikul K. Patel. Stirling engine performance prediction using schmidt analysis by considering different losses. (2013) University of Baroda, Gujarat, India
- [12] รศ.ดร.บุญเจริญ ศิริเนาวกุล. หนังสือปัญญาประดิษฐ์ ปัญญาเชิงกลุ่ม (Artificial Intelligence : Swarm Intelligence)
- [13] Jon Timmis and Pual Andrews. A beginners guide to Artificial immune systems. (2006) Department of Electronics and Computer Science, University of York, Heslington, York. YO10 5DD. UK.





### Artificial immune system Matlab code

```

function []=AIS_optimisation_conventional_Stirling_engine
tic
% Artificial Immune System CLONAL selection I
% Single objective function
% Public parameter
global_file_MTD
inputdata_MTD
ff1='objective_function_1'; % objective function 1
ff2='objective_function_2'; % objective function 2

maxvalue=9999999; % minimum cost
Nt=ngene; % total gene in cell
clonepop=keep*ncln; % number of cell after clone
mmut=ceil((clonepop-1)*Nt*mutrate); % total number of mutations

% create parameter
for i=1:1:popsize
    varhi(i,:)=var_hi;
    varlo(i,:)=var_lo;
end

%-----%
% Initial parameter %
%-----%

iga=0; % generation counter
initialized
par=(varhi-varlo).*rand(popsize,ngene)+varlo; % random parameter

% input parameter
for i=2:ngene1
    if i==3
        i=i+2;
    end
    inputpara=varlo(1,i):increase(1,(i-1)):varhi(1,i); % parameter input
    Nnumber=((varhi(1,i)-varlo(1,i))/(increase(1,(i-1))))+1; % number in
matrix
    inxp=ceil(rand(1,popsize)*Nnumber);
    for ii=1:popsize
        par(ii,i)=inputpara(1,inxp(1,ii));
    end
end
for i=1:popsize
    par(i,9)=(LT-par(i,1)-par(i,8)); % length of cooler
    if par(i,9)<0
        par(i,1)=(varhi(1,1)-varlo(1,1)).*rand+varlo(1,1); % new random
length of regenerator
        par(i,8)=(varhi(1,8)-varlo(1,8)).*rand+varlo(1,8); % new random
length of heater
        par(i,9)=(LT-par(i,1)-par(i,8));
    end
end

%-----%
% Loop for AIS %
%-----%

while iga<maxit
    iga=iga+1;

```

```

%-----%
% Calculate affinity %
%-----%

result=feval(ff1,par); % calculates population value using ff1
value1=result(:,1); % result 1 from the objective function (poweri)
value2=result(:,2); % result 2 from the objective function (eff)
value3=result(:,3); % result 3 from the objective function (Nhtube)
value4=result(:,4); % result 4 from the objective function (Nktube)
value5=result(:,5); % result 5 from the objective function (pressure
drop)

%-----%
% Selection %
%-----%

max_value1 = max(value1); % max value in population
value = 1./(1+max_value1-value1); % evaluate fitness value for the
maximum problem
[value,inx]=sort(value,'descend'); % max value in element 1
par=par(inx,:); % sort continuous
value1= value1(inx,:);
value2= value2(inx,:);
value3= value3(inx,:);
value4= value4(inx,:);
value5= value5(inx,:);
bestaffinity1=max(value1); % best affinity of first select

%-----%
% Clone & Maturate %
%-----%

mrow=sort(ceil(rand(1,nmut)*(clonepop-1))+1); % random row in mutation
mcol=ceil(rand(1,nmut)*Nt); % random column in mutaion

for jj=1:1:keep % n cell of clone
for j=((jj-1)*ncln+1):jj*ncln % n number of clone per cell
C(j,:)=par(jj,:);
end
end

for ii=1:nmut
C(mrow(ii),mcol(ii))=(varhi(1,mcol(ii))-
varlo(1,mcol(ii)))*rand+varlo(1,mcol(ii)); % mutation
end

%-----%
% Self-Crossover %
%-----%

nselect=ceil((clonepop)); % number of mating
prob=flipud([1:clonepop]'/sum([1:clonepop])));
odds={0 cumsum(prob(1:clonepop))}'; % probability distribution function
pick1=rand(1,nselect); % mate #1
pick2=rand(1,nselect); % mate #2

ic=1;
while ic<=nselect
for id=2:clonepop+1
if pick1(ic)<=odds(id) & pick1(ic)>odds(id-1)
ma(ic)=id-1;
end
if pick2(ic)<=odds(id) & pick2(ic)>odds(id-1)

```

```

                pa(ic)=id-1;
            end
        end
        ic=ic+1;
    end

    xp=ceil(rand(1,nselect)*Nt);           % crossover point

    for ic=1:(clonepop)
        MM=C(ma(ic),xp(ic)); % save value crossover point to MM
        C(ma(ic),xp(ic))=C(pa(ic),xp(ic)); % replace value from crossover
point
        C(pa(ic),xp(ic))=MM;           % replace value MM to crossover point
    end

%-----%
% Calculate affinity again %
%-----%

    result=feval(ff2,C); % calculates population value using f
    value1=result(:,1); % result 1 from the objective function (power)
    value2=result(:,2); % result 2 from the objective function (eff)
    value3=result(:,3); % result 3 from the objective function (Nhtube)
    value4=result(:,4); % result 4 from the objective function (Nktube)
    value5=result(:,5); % result 5 from the objective function (pressure
drop)

%-----%
% Re-Selection %
%-----%

    max_value1 = max(value1);
    value = 1./(1+max_value1-value1); % evaluates fitness value for the
maximum problem
    [value,inx]=sort(value,'descend'); % max value in element 1
    C=C(inx,:); % sort continuous
    value1= value1(inx,:);
    value2= value2(inx,:);
    value3= value3(inx,:);
    value4= value4(inx,:);
    value5= value5(inx,:);
    bestaffinity2=max(value1); % best affinity of second select
    if bestaffinity2>=bestaffinity1 % compare between 1st & 2nd affinity
        for iii =1:ngene
            MC(1,iii)=C(1,iii); % save the best cell to memory cell
        end
        Dpar1(iga)=C(1,1); % length of regenerator
        Dpar2(iga)=C(1,2); % thickness slot of heater
        Dpar3(iga)=C(1,3); % deep slot of heater
        Dpar4(iga)=C(1,4); % porosity of regenerator
        Dpar5(iga)=C(1,5); % wire diameter of regenerator
        Dpar6(iga)=C(1,6); % deep slot f cooler
        Dpar7(iga)=C(1,7); % thickness slot of cooler
        Dpar8(iga)=C(1,8); % length of heater
        Dpar9(iga)=C(1,9); % length of cooler
        Dvalue1(iga)=value1(1);
        Dvalue2(iga)=value2(1);
        DdeltaPsummax(iga)=value5(1);
        DNhtube(iga)=value3(1);
        DNktube(iga)=value4(1);
        maxvalue(iga)=max(value1);
        meanvalue(iga)=mean(value1);
        bestaffinity(iga,1)=bestaffinity2;

```

```

disp(['#generations=' num2str(iga) ' best value='
num2str(value(1)) ' mean value=' num2str(mean(value))])
disp([' Indicated power =' num2str(bestaffinity2(1))])
disp([' thermal efficiency =' num2str(value2(1))])
else
for iii =1:ngene
MC(1,iii)=par(1,iii);
end
Dpar1(iga)=par(1,1); % length of regenerator
Dpar2(iga)=par(1,2); % thickness slot of heater
Dpar3(iga)=par(1,3); % deep slot of heater
Dpar4(iga)=par(1,4); % porosity of regenerator
Dpar5(iga)=par(1,5); % wire diameter of regenerator
Dpar6(iga)=par(1,6); % deep slot f cooler
Dpar7(iga)=par(1,7); % thickness slot of cooler
Dpar8(iga)=par(1,8); % length of heater
Dpar9(iga)=par(1,9); % length of cooler
Dvalue1(iga)=value1(1);
Dvalue2(iga)=value2(1);
DdeltaPsummax(iga)=value5(1);
DNhtube(iga)=value3(1);
DNktube(iga)=value4(1);
maxvalue(iga)=max(value1);
meanvalue(iga)=mean(value1);
bestaffinity(iga,1)=bestaffinity1;
disp(['#generations=' num2str(iga) ' best value='
num2str(value(1)) ' mean value=' num2str(mean(value))])
disp([' indicated power =' num2str(bestaffinity1(1))])
disp([' thermal efficiency =' num2str(value2(1))])
end
%-----%
% Re-Initial parameter %
%-----%

par=(varhi-varlo).*rand(popsiz,ngene)+varlo; % random parameter
% input parameter
for i=2:ngenel
if i==3
i=i+2;
end
inputpara=varlo(1,i):increase(1,(i-1)):varhi(1,i); % parameter input
Nnumber=((varhi(1,i)-varlo(1,i))/(increase(1,(i-1))))+1; % number in
matrix
inxp=ceil(rand(1,popsiz)*Nnumber);
for ii=1:popsiz
par(ii,i)=inputpara(1,inxp(1,ii));
end
end
for i=1:popsiz
par(i,9)=(1T-par(i,1)-par(i,8)); % length of cooler
if par(i,9)<0
par(i,1)=(varhi(1,1)-varlo(1,1)).*rand+varlo(1,1); % new random
length of regenerator
par(i,8)=(varhi(1,8)-varlo(1,8)).*rand+varlo(1,8); % new random
length of heater
par(i,9)=(1T-par(i,1)-par(i,8));
end
end
end

```

```

for jj=1:ngene
    par(1,jj)=MC(1,jj);    % replace parameter from memory cell
end

gen=1:iga;
gen=gen';

%-----%
% Stop criteria
%-----%

if iga>20 && iga<=maxit
    if maxvalue<=maxvalue(iga-20)
        break
    end
elseif iga>maxit
    break
end
end

Dpara1=Dpar1';           % length of regenerator
Dpara2=Dpar2';           % thickness slot of heater
Dpara3=Dpar3';           % deep slot of heater
Dpara4=Dpar4';           % porosity of regenerator
Dpara5=Dpar5';           % wire diameter of regenerator
Dpara6=Dpar6';           % deep slot of cooler
Dpara7=Dpar7';           % thickness slot of cooler
Dpara8=Dpar8';           % length of heater
Dpara9=Dpar9';           % length of cooler

iters=0:length(maxvalue)-1;
save power-G.xls iters Dvalue1 -ascii;
save eff-G.xls iters Dvalue2 -ascii;
save Nhtube-G.xls iters DNhtube -ascii;
save Deeph-G.xls iters Dpar3 -ascii;
save lh-G.xls iters Dpar8 -ascii;
save Nktube-G.xls iters DNktube -ascii;
save Ddeepk-G.xls iters Dpar6 -ascii;
save lk-G.xls iters Dpar9 -ascii;
save poros-G.xls iters Dpar4 -ascii;
save lr-G.xls iters Dpar1 -ascii;
save delP-G.xls iters DdeltaPsummax -ascii;
save Wh-G.xls iters Dpar2 -ascii;
save Wk-G.xls iters Dpara7 -ascii;
save Dw-G.xls iters Dpara5 -ascii;

figure(1)
plot(gen,bestaffinity,'r-')% plot between generation and best affinity
xlabel('generation');
ylabel('affinity');
title('affinity - generation')

figure(2)
plot(gen,DdeltaPsummax,'r-')% plot between generation and pressure drop
xlabel('generation');
ylabel('pressure drop');
title('pressure drop - generation')

figure(3)
plot(gen,DNktube,'r-') % plot between generation and number of cooler tube
xlabel('generation');
ylabel('number of tube');
title('number of cooler tube - generation')

```



```
figure(4)
plot(gen,DNhtube,'r-')% plot between generation and number of heater tube
xlabel('generation');
ylabel('number of tube');
title('number of heater tube - generation')
```

```
figure(5)
plot(gen,Dvalue2,'r-')% plot between generation and efficiency
xlabel('generation');
ylabel('efficiency');
title('efficiency - generation')
```

```
figure(6)
plot(gen,Dpara1,'r-')% plot between generation and length of regenerator
xlabel('generation');
ylabel('length of regenerator');
title('length of regenerator - generation')
```

```
figure(7)
plot(gen,Dpara2,'r-')% plot between generation and thickness slot of heater
xlabel('generation');
ylabel('thickness slot of heater');
title('thickness slot of heater - generation')
```

```
figure(8)
plot(gen,Dpara3,'r-')% plot between generation and deep slot of heater
xlabel('generation');
ylabel('deep slot');
title('deep slot of heater - generation')
```

```
figure(9)
plot(gen,Dpara4,'r-')% plot between generation and porosity of regenerator
xlabel('generation');
ylabel('porosity');
title('porosity of regenerator - generation')
```

```
figure(10)
plot(gen,Dpara5,'r-')% plot between generation and wire diameter
xlabel('generation');
ylabel('wire diameter');
title('wire diameter of regenerator - generation')
```

```
figure(11)
plot(gen,Dpara6,'r-')% plot between generation and deep slot of cooler
xlabel('generation');
ylabel('deep slot');
title('deep slot of cooler - generation')
```

```
figure(12)
plot(gen,Dpara7,'r-')% plot between generation and thickness slot of cooler
xlabel('generation');
ylabel('thickness slot');
title('thickness slot of cooler - generation')
```

```
figure(13)
plot(gen,Dpara8,'r-')% plot between generation and length of heater
xlabel('generation');
ylabel('length of heater');
title('length of heater - generation')
```

```

figure(14)
plot(gen,Dpara9,'r-') % plot between generation and length of cooler
xlabel('generation');
ylabel('length of cooler');
title('length of cooler - generation')

Dpara=[Dpara1 Dpara2 Dpara3 Dpara4 Dpara5 Dpara6 Dpara7 Dpara8 Dpara9];
Dvalue1=Dvalue1';
Dvalue2=Dvalue2';
meanvalue=meanvalue';
maxvalue=maxvalue';
disp('the best affinity in each generation');
disp(Dvalue1);
disp('efficiency in each generation');
disp(Dvalue2);
disp('mean value in each generation');
disp(meanvalue); % show mean value
disp('the max value in each generation');
disp(maxvalue); % show max value
disp('the best cell in each generation');
disp(Dpara); % show best parameter
disp('the best affinity in each generation');
disp(bestaffinity); % show best affinity value
disp('number of generation');
disp(iga); % show number of generation
disp('pressure drop in each generation');
disp(DdeltaPsummax); % show pressure drop
disp('the best number of heater tube in each generation');
disp(DNhtube); % show best number of heater tube
disp('the best number of cooler tube in each generation');
disp(Dnktube); % show best number of cooler tube
toc
end

```