

การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของ
เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
เมษายน 2558

การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของ
เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2558

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของ
เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
เมษายน 2558

ภูมิศักดิ์ ผดาวลัย (2557). การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ปริญญาโท วิศวกรรมเครื่องกล).
กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในระดับห้องปฏิบัติการแบบใช้อากาศเป็นสารทำงาน โดยมีรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากวัสดุประเภทโลหะขนาดยาว 111 mm โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยการเปลี่ยนแปลงชนิดของและระดับความพรุนวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ โดยวัสดุที่ทดสอบได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม ซึ่งมีระดับความพรุนอยู่ระหว่าง 80-99 % ผลการทดสอบพบว่ารีเจนเนอเรเตอร์ที่สามารถใช้งานได้ดีคือแบบแผ่นบางและเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งสามารถเก็บและคายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้การทำงานของเป็นไปตามวัฏจักรเทอร์โมอะคูสติก โดยสำหรับวัสดุทดสอบ 3 ชนิด พบว่าที่ระดับความพรุน 98 % เครื่องยนต์สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี แต่แนวโน้มคุณลักษณะการทำงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ โลหะกลุ่มที่ 1 คือโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำและความจุความร้อนจำเพาะสูง ได้แก่ อลูมิเนียม ซึ่งมีความสามารถในการเก็บและคายความร้อนสูง งานที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอีกกลุ่ม พบว่ามีกำลังงานสูงกว่า โลหะกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นสูงและความจุความร้อนจำเพาะต่ำ ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง ซึ่งมีความสามารถในการเก็บและการคายความร้อนต่ำกว่า

คำสำคัญ : เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก/รีเจนเนอเรเตอร์

TITLE A STUDY OF EFFECTS OF METALIC REGENERATORS CHARECTERISTICS
ON PERFORMANCE OF THERMOACOUSTIC ENGINE



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

April 2015

Poomsak Padawan .(2014). *Title A Study Of Effects Of Metallic Regenerators Charecteristics On Performance Of Thermoacoustic Engine*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst.Prof.Dr.Pracha Bunyawanchakul, Asst.Prof.Dr.Bancha Kongtrakool.

This research aims to study and fabricate a thermoacoustic engine that using air as working fluid equipped with metallic regenerator of 111 mm length. Engine efficiency test are conducted for various kind of metallic materials (copper, brass and aluminum) and porosity (in range of 80-99%) of regenerator. The experimental results show that the most appropriate shape of metallic regenerator is the thin and small shredded metal sheet which can store and release heat quickly. For all metallic regenerators, the most appropriate workable porosity is 98%. But working characteristic can be divided into 2 groups: Group 1 metals that have low density and high specific heat capacity, including aluminum, which has ability to store and release heat quickly that found to be able to generate higher engine power compare to another group of metals that called Group 2, including brass and copper, that have higher density and lower specific heat capacity which have lower ability to store and release heat.

Keyword: thermoacoustic engine / regenerator

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล ผู้ควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำวิจัย เรื่องการศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอร์เรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก พร้อมทั้งให้ความรู้และคำแนะนำ คำปรึกษา ให้แนวคิด และช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำปริญญานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์มณฑล ชูโชนาค ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการทดสอบครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบ คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในระหว่างการทำเนิงานวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจตลอดจนสนับสนุนการศึกษาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือ และความร่วมมือในการทำวิจัยเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

ภูมิศักดิ์ ผดวาลัย

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของ
เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก
ของ
ภูมิศักดิ์ ผดวาลย์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2558

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรณัฐ แจ่มสว่าง)

.....ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.มนัส แป้งใส)

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในประเทศ	5
การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในต่างประเทศ	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	11
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเทอร์โมอะคูสติก	11
รูปแบบการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	12
วัฏจักรของฟาร์เซลล์	12
การถ่ายเทความร้อนผ่านรีเจนเนอเรเตอร์	15
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเกรเดียนท์(Temperature gradient)กับรีเจนเนอเรเตอร์	15
หลักการถ่ายเทพลังงานด้วยรีเจนเนอเรเตอร์	17
การหาความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์	17
คลื่นยืนในท่ออากาศแบบท่อปิด	18
เปอร์เซ็นต์ช่องว่างวัสดุรีเจนเนอเรเตอร์	19
กำลังและประสิทธิภาพ	20
3 วิธีดำเนินการวิจัย	21
อุปกรณ์สำหรับดำเนินงานวิจัย	22
การดำเนินงานวิจัย	27
4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย	30
การศึกษาความเป็นไปได้ในการรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีรูปแบบต่างๆ	30
ผลการทดลองของรีเจนเนอเรเตอร์	33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ผลของชนิดโลหะที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคู	
สตริกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98%	35
ผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อกำลังงานของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากอลูมิเนียม	40
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	44
สรุป	44
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก. คำอธิบายสัญลักษณ์	51
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ	53
ภาคผนวก ค. ตารางบันทึกการทดสอบ	56
ภาคผนวก ง. นิยามศัพท์เฉพาะ	69
ภาคผนวก จ. รายละเอียดเครื่องมือใช้สำหรับวัดเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสตริก	71
ภาคผนวก ฉ. บทความที่เผยแพร่	76
ประวัติย่อผู้วิจัย	103

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยด้านวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานเป็นงาน เป็นรีเจนเนอเรเตอร์	10
2 แสดงคุณสมบัติของโลหะที่ 20 °C	39
3 สรุปคุณลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีต่อเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	44



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 (ก) ภาพรวมของสแต็ก (ข) ภาพขยายของแผ่นบาง	11
2 หลอดเสียงอย่างง่าย	12
3 หลอดเสียงที่มีรีเจนเนอเรเตอร์	12
4 สแต็ก	13
5 การถ่ายเทความร้อนของพาร์เซล	14
6 วัฏจักรการทำงานของพาร์เซล	14
7 การถ่ายเทความร้อนผ่านสแต็ก	15
8 กรณีอุณหภูมิการ์เตียนท์ของพาร์เซลชั้นมากกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์	16
9 กรณีอุณหภูมิการ์เตียนท์ของพาร์เซลชั้นน้อยกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์	16
10 กรณีอุณหภูมิการ์เตียนท์ของพาร์เซลเท่ากับรีเจนเนอเรเตอร์	16
11 แสดงตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์ในเครื่องทดสอบเทอร์โมอะคูสติก	17
12 แสดงลักษณะ 3 แบบของคลื่นย่นในท่ออากาศท่อหนึ่ง ซึ่งยาว เรียงตามค่าความถี่ จากน้อยไปหามาก	18
13 แสดงส่วนหนึ่งของความร้อนที่เครื่องยนต์รับมาจะถูกเปลี่ยนไปเป็นงาน ส่วนที่เหลือ จะถูกปล่อยทิ้งไปยัง sink	20
14 แสดงภาพประกอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในการทดลอง	21
15 แสดงภาพประกอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในการวิจัย	22
16 แสดงวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ (ก.) อลูมิเนียม (ข.) ทองเหลือง (ค.) ทองแดง	23
17 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลและสวิตช์วัดอุณหภูมิแบบหลายจุด	23
18 แสดงสายเทอร์โมคัปเปิล Type K	24
19 เครื่องวัดความเร็วลม TESTO รุ่น 425	24
20 มิเตอร์วัดโวลต์แบบเข็ม SALZER รุ่น SD-80	25
21 มิเตอร์วัดแอมป์แบบเข็ม SALZER รุ่น SD-80	25
22 เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิตอล OMRON รุ่น E5CC	26
23 นาฬิกาจับเวลา Black & White	26
24 เครื่องชั่งดิจิตอล OHAUS รุ่น Pioneer (PA413)	27
25 แสดงการกำหนดเปอร์เซ็นต์ช่องว่างวัสดุสดโดยชั่งน้ำหนัก	28
26 แสดงตำแหน่งอุปกรณ์ของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	29
27 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเจาะรูขนาด 5 mm	30
28 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh ม้วนคล้ายกันหอย	31
29 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh ตัดเป็นวงกลม	31

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
30 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh ตัดเป็นเศษเล็กๆ	32
31 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ ทองเหลืองที่ได้เศษที่เหลือจากการกลิ้ง	32
32 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ อลูมิเนียมตัดเป็นเส้นขนาดประมาณความกว้าง 2 - 3 mm ..	33
33 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ อะลูมิเนียม ทองเหลืองและทองแดง ตัดเป็นเส้น	34
34 แสดงติดตั้งอุปกรณ์เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	34
35 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %	35
36 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %	35
37 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ทองเหลือง เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง ที่ 98 %	36
38 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ทองเหลืองเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %	36
39 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ ทองแดงเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %	37
40 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ทองแดงเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %	37
41 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียม ทองเหลืองและทองแดง ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 %	38
42 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 95 %	40
43 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อะลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 95 %	40
44 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 96.5 %	41

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
45 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซนต์ช่องว่างที่ 96.5 %	41
46 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซนต์ช่องว่างที่ 95 % 96.5% และ 98 %	42



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์ในปัจจุบันประเทศไทยต้องมีการนำเข้าน้ำมัน เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจในภาคอุตสาหกรรมและการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยราคาน้ำมันในตลาดโลกมีราคาที่ผันผวน และขึ้นลงอยู่ตลอดเวลาโดยมีแนวโน้มที่ จะมีความสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีความพยายามในการที่จะพัฒนาเทคโนโลยี และหาพลังงานชนิดอื่นมาทดแทน

การสร้างเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรที่ให้งานที่มาจากพลังงานทดแทนชนิดอื่น ก็เป็นอีกหนทางเลือก อาทิเช่นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีอยู่มากมายทั่วไป อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยได้มีการศึกษาและพัฒนาการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้อย่างต่อเนื่องในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ หรือการอบแห้งด้วยความร้อน

ส่วนมวลชีวภาพหรือพลังงานชีวมวล คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้จากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออกกากและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว ส่าเหล้า ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์เป็นต้น สาหร่าย ได้จากการสกัดน้ำมันดิบออกจากสาหร่ายสดซึ่งให้พลังงานจากการเผาไหม้โดยตรง

ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเครื่องยนต์ที่เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอก ให้สามารถใช้พลังงานพลังงานแสงอาทิตย์และมวลชีวภาพ เนื่องจากเครื่องยนต์ประเภทนี้สามารถเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ง่ายกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังนั้นการพัฒนาเครื่องยนต์ความร้อนที่เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกซึ่งสามารถใช้พลังงานหมุนเวียน จึงเป็นประโยชน์ต่อการแก้วิกฤตพลังงานและสิ่งแวดล้อมในอนาคต

แนวความคิดพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายนอกที่สามารถนำไปใช้ได้ ในการผลิตกำลังงานกล โดยเครื่องยนต์ความร้อนที่พัฒนาขึ้นนี้ต้องไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานป้อนเข้า ผลลัพธ์ที่ได้นอกจากจะมีส่วนช่วยในการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นปัญหาหลักของโลกในปัจจุบันแล้วยังเป็นแนวทางในการพัฒนาทางด้านพลังงานทางเลือกอีกด้วย ด้วยเหตุดังกล่าวปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก (Thermoacoustic Engine) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกชนิด

หนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย หลอดเสียง ฮีตเตอร์ คลูลเลอร์และรีเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งเครื่องสูบลมความร้อนหรือเครื่องทำความเย็นจะเรียกว่า สแต็ก

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก (Thermoacoustic Engine) เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกแบบหนึ่ง ที่มีความน่าสนใจและเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่สามารถใช้เพื่อเป็นต้นกำลังทางกลจากแหล่งพลังงานทดแทน เนื่องจากเป็นมิตรต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมโดยไม่ปลดปล่อยมลพิษใดๆเลย เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกได้ถูกศึกษาวิจัยและพัฒนาในระดับที่สูงขึ้นในไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา โดยในปี ค.ศ.1984 ได้มีการจดสิทธิบัตรเครื่องจักรเทอร์โมอะคูสติกในสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องสูบลมความร้อน (Acoustical heat pump) ทำให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีศักยภาพที่จะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของการผลิตกำลังทางกลจากแหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานสะอาด

เนื่องจากกลไกของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีความซับซ้อนไม่มาก จึงส่งผลให้ต้นทุนในการสร้างต่ำเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหวอย่างเช่น ขั้วต่อหรือแหวนลูกสูบ ทำให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีอายุใช้งานยาวนานและไม่ต้องการบำรุงรักษามากนัก คุณสมบัติที่เด่นอีกประการหนึ่งของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกคือการสันดาปเกิดขึ้นภายนอกกระบอกสูบเพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่เป็นวัสดุที่เผาไหม้ได้ทุกชนิดรวมถึงความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะเด่นต่างๆที่กล่าวมาแล้วเป็นเหตุอันควรที่จะศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในรายละเอียดต่างๆ ให้อุปกรณ์เพื่อพัฒนาไปสู่การได้มาซึ่งต้นกำลังจากแหล่งพลังงานทดแทนอย่างยั่งยืน

การศึกษาวิจัยเรื่องเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในประเทศไทยโดยเฉพาะการพัฒนาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการยังมีน้อย ทำให้ขาดองค์ความรู้ในการพัฒนางานวิจัยเชิงวิชาการเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ โดยเฉพาะด้านการทำความเย็นและใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังจากหลักการเทอร์โมอะคูสติก โดยใช้พลังงานทดแทน เช่น แสงอาทิตย์ ก๊าซชีวมวล ก๊าซชีวภาพ เป็นต้น เนื่องจากหลักการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกอาศัยการถ่ายเทความร้อนผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการสร้างปรากฏการณ์วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกดังกล่าว การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น จากการพิจารณาจากเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการวิจัยและพัฒนา รีเจนเนอเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกยังมีข้อมูลไม่มาก ทั้งในด้านการเลือกวัสดุและคุณสมบัติ ดังนั้นข้อมูลในการเลือกวัสดุและคุณสมบัติที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน จึงเป็นประเด็นหนึ่งที่ต้องศึกษาเพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

ความน่าสนใจมากที่สุดของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก คือความไม่ซับซ้อนของกลไกในการทำงานของเครื่องยนต์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวันทั้งหลายที่พบว่ามีกลไกในการทำงานที่ซับซ้อน เช่น ชิ้นส่วนบางชิ้นหมุน, บางชิ้นแกว่งและบางชิ้นเลื่อนในขณะที่ทำงาน แต่เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกไม่มีชิ้นส่วนทางกลที่เคลื่อนไหวเลยแม้แต่ชิ้นเดียวในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน โดยเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกใช้คลื่นเสียงในการอัดและทำให้สาร

ตัวกลางเคลื่อนที่ ใช้หลอดเสียง (Sound tube หรือ Resonator) หลอดหนึ่งเพื่อบรรจุสารตัวกลาง และขยายคลื่นเสียงโดยใช้อุปกรณ์พิเศษอีกชิ้นหนึ่งเรียกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) หรือ Stack ร่วมกันเป็นเครื่องยนต์ความร้อนที่สามารถเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่สามารถนำพัฒนาและไปใช้ประโยชน์ต่างๆได้

แม้ว่าหลักการในเชิงทฤษฎีของเทคโนโลยีเรอร์โมอะคูสติกค่อนข้างจะมีความซับซ้อน แต่การสร้างเพื่อใช้งานในทางปฏิบัตินั้นสามารถทำได้ง่าย สิ่งนี้จึงเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ เนื่องจากข้อได้เปรียบอื่นๆ อีกดังนี้

1. ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวในการทำให้เกิดวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ ดังนั้นจึงมีความไว้วางใจได้สูงมาก และมีอายุการใช้งานยาวนาน
2. สารตัวกลางที่ใช้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
3. การใช้อากาศหรือก๊าซเฉื่อยอื่นๆเป็นสารตัวกลางซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะทำให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางมาก
4. ไม่มีความต้องการพิเศษใดๆเกี่ยวกับวัสดุ สามารถใช้วัสดุธรรมดาที่หาได้ง่ายๆทั่วไปซึ่งมีราคาค่อนข้างถูกได้
5. สามารถนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลายบนพื้นฐานของเทคโนโลยีเดียวกัน

โดยหลักการแล้วเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกสามารถทำงานเป็นได้ทั้งเครื่องยนต์หรือเครื่องต้นกำลังและเครื่องสูบความร้อน (Heat pump) เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกคืออุปกรณ์ที่สร้างคลื่นเสียงจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ในขณะที่เครื่องสูบความร้อนเรอร์โมอะคูสติกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้คลื่นเสียงมาทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยไว้ดังนี้

1. เพื่อสร้างเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกแบบใช้อากาศเป็นสารทำงาน โดยมีรีเจนเนอเรเตอร์เป็นวัสดุประเภทโลหะในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale)
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของความพรุนรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก

ขอบเขตของโครงการวิจัย

ทำการวัดงานและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก โดยใช้อากาศเป็นสารทำงานเครื่องยนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104.7 mm โดยมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ สำหรับทดลองมี 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียมขนาดความยาว 111 mm
2. รีเจนเนอเรเตอร์มีระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอยู่ในช่วง 80% – 99%

ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าประโยชน์ที่จะได้รับจากการครั้งนี้ไว้ดังนี้

1. ได้องค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาไปสู่เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกล้างงานทางเลือกในอนาคตรวมทั้งการใช้เป็นต้นกำลังในภาคเกษตรกรรมโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมเป็นเชื้อเพลิง
2. ได้ข้อมูลจากการทดลองโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกล้างมีสมรรถนะที่ดีขึ้น และสามารถขยายขนาดกำลังการทำงานได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้เรียงลำดับการนำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกในประเทศ

สว่างทิพย์ และคณะ (Sawangtit; et al. 2004). สร้างชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเรอร์โมอะคูสติกประกอบด้วยลำโพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร ความต้านทาน 8 โอห์ม กำลังสูงสุดขนาด 10 วัตต์ บรรจุในกล่องพลาสติก โดย Function Generator ส่งสัญญาณรูปไซน์ ฝากลงลำโพงต่อเข้ากับท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ความยาวท่อ 55 เซนติเมตร และหนา 0.15 เซนติเมตร ใช้อากาศเป็นสารทำงาน สแตกเป็นแบบกันหอยโดยสแตกมีความยาว 10 เซนติเมตร สแตกที่ใช้ทดลองทำจากแผ่นพลาสติกบางจำนวน 3 แบบ ระยะห่างระหว่างชั้นแผ่นบางของสแตก 0.2, 0.8 และ 1.1 มิลลิเมตร และสแตกอีกแบบทำจากแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะห่างระหว่างชั้นของสแตก 1.1 มิลลิเมตรผลการทดลองที่ความถี่คลื่นเสียง 360 เฮิรซ์ แบบคลื่นนิ่งโดยใช้กำลังไฟฟ้า 2.6 วัตต์ ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างสองด้านของสแตกประมาณ 5 องศาเซลเซียสโดยใช้ สแตกที่มีระยะห่างระหว่างชั้น 0.8 มิลลิเมตร ระยะห่าง 0.8 มิลลิเมตร พบว่ารีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากพลาสติกให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมากกว่าสแตกที่ทำจากอลูมิเนียมอย่างชัดเจน

สุรเดช ศรีคำ (Suradaj; 2004). นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี ได้ออกแบบสร้างและการทดสอบเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกขนาดความจุระบอกลูกสูบกำลัง 14.04 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีอัตราส่วนการอัด 4.25:1 โดยใช้ปิโตรเลียมเหลวมีอัตราการป้อนค่าความร้อน 1940.337 จูลต่อวินาทีที่เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกให้แรงบิดสูงสุด 0.007699 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็วรอบ 53.4 รอบต่อวินาที กำลังเพลาส่งสูงสุด 52 มิลลิวัตต์ ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 92 รอบต่อวินาที และประสิทธิภาพเชิงความร้อน 0.0026 เปอร์เซนต์ ที่ความเร็วรอบ 92 รอบต่อวินาที

สว่างทิพย์ และคณะ (Sawangtit; et al. 2006). เสนอการออกแบบเครื่องทำความเย็นแบบเรอร์โมอะคูสติกด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมจากสมการเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งอยู่ในรูปของ Differential-Algebraic Equation และหา Gradient ของฟังก์ชัน ผู้วิจัยใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีสมการเชิงเดี่ยว (Simplex Model) และหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งผลจากการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ Hoffer

บัญชา คังตระกูล (Bancha; 2008). ได้นำเสนอการศึกษาหลักการทำงาน และ พารามิเตอร์ในการออกแบบที่สำคัญของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบลูกสูบ ผลจากการศึกษา พบว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของหลอดเสียงกับปริมาตรกวาดของ ลูกสูบ พบว่ากำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกขนาดเล็กพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 5 โดยประมาณ

สกล วิรุรกิจ (Sakon; 2008). ได้ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ โลหะสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเท่ากับ 101.4 มิลลิเมตร และ 98.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความยาว 600 มิลลิเมตร โดยเครื่องยนต์ที่สร้างให้ความเร็วรอบสูงสุดที่ 68.1 รอบต่อนาที ที่ความดันภายในท่อเชื้อเพลิงไปยังเตาหัวเผาเท่ากับ 1.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สุรัชย์ และคณะ (Surachai; et al. 2009). นำเสนอผลการศึกษาเชิงการทดลองการทำให้ ความเป็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยชุดทดลองประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ท่อเสียงและรี เจเนอเรเตอร์ ใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง จากผลการทดลองสามารถสร้างสภาวะคลื่นนิ่งภายใน ท่อเสียงของชุดทดลองได้ โดยพบว่าที่ความถี่บัพให้ลำโพงขนาด 145 เฮิรตซ์ ทำให้อุณหภูมิของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแตกต่างกันมากที่สุด

อิศเรศ ฐักัลยา (Isares. 2012). ได้ศึกษาทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่น นิ่งโดยใช้สแตนเลสเป็นแบบแผ่นบางซ้อนกัน (slab stack) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วทำด้วยสแตนเลสสตีลหนา 0.3 มม. มาวางซ้อนกันระยะห่างระหว่างแผ่น 0.5 มม. และใช้อากาศอัดที่ความดัน 10 บาร์ และ 5 บาร์ ผลการทดลองที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกันและอัตราส่วนกำลังขับที่ได้จากเครื่องยนต์นี้เป็นที่น่าพอใจสำหรับนำไปขับชุดทำความเย็น

1.2 การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในต่างประเทศ

เรย์ไลซ์ (Rayleigh. 1878). ในศตวรรษก่อน มีความเข้าใจในรูปลักษณะเชิงปริมาณของ การแกว่งที่เกิดขึ้นจากความร้อนนี้ว่า “ถ้าให้ความร้อนแก่อากาศในขณะที่อากาศเกิดการควบแน่น สูงสุด (ความหนาแน่นมากที่สุด) หรือเอาความร้อนออกจากอากาศในขณะที่อากาศเบาบางที่สุด จะ เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น”

เฟลแมน (Feldman. 1968). ได้ศึกษา Sondhauss oscillations เครื่องเป่าแก้วที่เกิดก่อน Taconis oscillations เกณฑ์ (Criterion) ของ Rayleigh เป็นที่ทราบกันว่าถูกนำมาใช้กับ Rijke oscillations การแกว่งที่คล้ายคลึงกันสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเผาไหม้ในโพรง (Cavity)

รอตท์ (Rott. 1969). ให้ความหมายของคำว่าเทอร์โมอะคูสติกว่าเป็นผลรวมกันของความ ร้อนและเสียง โดยได้พัฒนาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการแกว่งของเสียงในก๊าซที่อยู่ใน ช่องที่มี Temperature gradient ตามแนวแกน โดยขนาดตามแนวขวางของช่องอยู่ในอันดับของ Thermal penetration depth (ตามแบบฉบับ จะอยู่ในอันดับของ 1 มิลลิเมตร) โดย Rayleigh และ Kirchhoff ได้ศึกษาปัญหาเหล่านี้มาแล้วแต่ไม่มีความคืบหน้าทางทฤษฎี ในยุคของ Rott เมื่อ

พิจารณาแรงจูงใจที่จะทำให้เกิดความเข้าใจในปัญหานี้เพิ่มขึ้นจากปรากฏการณ์เยนีย่งยวดที่เรียกว่า Taconis oscillations ซึ่งเมื่อท่อที่มีก๊าซบรรจุอยู่มีอุณหภูมิลดจากอุณหภูมิบรรยากาศลงไปสู่ อุณหภูมิเยนีย่งยวด โดยก๊าซจะแกว่งด้วยความถี่ที่ก๊าซสร้างขึ้นเอง โดยมีความร้อนจำนวนมาก ถ่ายเทจากบรรยากาศสู่สิ่งแวดล้อมเยนีย่งยวด

เซปเปอร์เลย์ (Ceperley. 1979). ได้เพิ่มเติมแนวคิดทางเสียงให้แก่เครื่องยนต์และเครื่อง ทำความเย็นสเตอร์ลิง โดยตระหนักว่า Time phasing ระหว่างการแกว่งของความดันกับการ เคลื่อนที่ที่เป็นหัวใจของเครื่องทำความเย็นทั้งหลาย คือคลื่นเสียงแบบเดินทาง

ยูริลี ไอ และเบอร์โชวิทซ์ (Urieli I; & Berchowitz. 1984). วิเคราะห์ปรากฏการณ์เหล่านี้ โดยสมมติให้ตัวแปรที่สำคัญทั้งหมดมีการแกว่งเป็นแบบ Sinusoidal time oscillation และใช้ Amplitudes และ Time phases อยู่ในรูปของ Complex number

ซินน์ (Zinn. 1986). การแกว่งจะเกิดขึ้นเองถ้าการเผาไหม้แปรอย่างรวดเร็วมากขึ้น หรือมีประสิทธิภาพขึ้นในระหว่าง Compression phase ของการแกว่งของความดันมากกว่าใน ระหว่าง rarefaction phase การแกว่งเช่นนี้ในจรวดจะต้องถูกลดทอน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Catastrophic damage แต่สภาวะนี้ต้องการให้เกิดขึ้นในเตาเผาก๊าซครวเรือนและเครื่องทำน้ำร้อน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสภาวะดังกล่าว

สวิฟท์ (Swift. 1988). ทฤษฎีทางเทอร์โมอะคูสติกเริ่มต้นในปี 1868 เมื่อ Kirchhoff คำนวณการลดทอนลงของเสียงในท่อเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวท่อ และคลื่นเสียง ในก๊าซ ต่อมา Kramers ได้ทำการทดลอง โดยพัฒนาการทดลองมาจาก Taconis ซึ่งเป็นการทดลอง ที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมอะคูสติก แต่ผลที่ได้ไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากขนาดของเครื่องที่ใหญ่เกินไป หลังจากนั้นอีก 20 ปี Rott ได้สร้างผลงานมากมายที่เป็นจุดเริ่มต้นของความเข้าใจในการทดลองของ Taconis ในที่สุด Rott และคณะก็กำหนดรากฐานของทฤษฎีเสียงที่เหมาะสมเพื่อเป็นพื้นฐานการ ทดลองทางเทอร์โมอะคูสติกทั้งแบบเครื่องยนต์หรือเครื่องต้นกำลังและแบบเครื่องทำความเย็น จะ เป็นการใส่พลังงานความร้อนแล้วได้งานออกมา ส่วนแบบ Refrigerator จะเป็นการใส่งานแล้วได้ พลังงานความร้อนออกมา

ชูลิง และโยอิชิ (Shuliang; & Yoichi. 1998). ทดลองวิจัยตัวขับเคลื่อนหลักเครื่องยนต์ เทอร์โมอะคูสติก โดยใช้สแต็กเป็นตาข่ายทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 49 มม. ยาว 140 และ 112 มม. และใช้ฉนวนเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและใช้ในโตรเจนและฮีเลียมเป็นสารทำงาน จากการ ทดลองได้ค่ากำลังสูงสุด 26 วัตต์ ความถี่กำลังและความร้อนที่ป้อนเข้า 73 เฮิร์ต 833 วัตต์และ 700 เคลวิน ตามลำดับ

แบคคาส และสวิฟท์ (Backhaus; & Swift. 2000). ได้ศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเทอร์โม อะคูสติกโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ยาว 7.3 ซม. ทำด้วยตาข่ายสเตนเลสสตีล 120 แมช เส้นศูนย์กลาง 8.89 ซม. การวิเคราะห์นี้ประสบความสำเร็จเป็นแนวทางสู่การวิจัยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเทอร์โมอะคูสติก แบบไฮบริดในอนาคต

สวีสท์ (Swift, 2002). ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ต่อจาก Rott เพื่ออธิบายปรากฏการณ์เรอโมอะคูสติกที่เกิดจากของไหลเมื่อถูกสั่นด้วยคลื่นเสียงแบบคลื่นนิ่ง ที่มีแผ่นบางวางขนานกับทิศทางของการสั่นของคลื่นนิ่ง หรือรีเจนเนอเรเตอร์ที่เป็นอุปกรณ์หลักของเครื่องทำความเย็น สมการคณิตศาสตร์หามาจากสมการต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงานของของไหลที่สั่นบนแผ่นบาง แล้วทำการลดรูปสมการลงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ จากนั้นหาผลเฉลยด้วยวิธี Complex Exponential ได้ผลเฉลยของอุณหภูมิ, Heat Flux, กำลังเสียง, ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) และประสิทธิภาพ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังยกตัวอย่างเครื่องทำความเย็น หรือทำความร้อน และเครื่องต้นกำลังในแบบต่างๆ เพื่อให้เข้าใจการทำงานยิ่งขึ้น ปัจจุบันทฤษฎีเรอโมอะคูสติกของ Swift ได้รับการยอมรับ และนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง จึงถือได้ว่าเป็นทฤษฎีพื้นฐานในการสร้างเครื่องจักรกลเรอโมอะคูสติก นอกจากนี้ Swift และผู้ร่วมงานยังได้พัฒนาโปรแกรม DELTAEC (Design Environment for Low-amplitude Thermo Acoustic Energy Conversion) ขึ้นมาใช้ในการศึกษา และออกแบบเครื่องเรอโมอะคูสติก

ซังเกรียว ซอย และคณะ (Sungryel Choi; et al. 2004). ได้ทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการตกของความดันโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.25 มม. ยาว 85 มม.

เดวิด (David L. 2009). ได้ศึกษาเครื่องยนต์เรอโมอะคูสติกและเครื่องทำความเย็นขับเคลื่อนด้วยพลังงานความร้อนทั้ง โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์รูปทรงรังผึ้งทำด้วยสแตนเลสสตีลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 155 มม. มีความยาวของแอสติกเท่ากับ 12 มม. ซึ่งแหล่งความร้อนได้มาจากความร้อนทั้งจากไอเสียเครื่องยนต์สันดาปภายใน

อับดุลราฮ์ม และคณะ (Abdulrahman; et al. 2010). ทำการศึกษาวัดผลการเลือกวัสดุพอร์นราคาต่ำสามชนิดใช้เป็นวัสดุของรีเจนเนอเรเตอร์ในการออกแบบเครื่องยนต์เรอโมอะคูสติกแบบคลื่นเดินทาง วัสดุที่ใช้ทดสอบคือ เซรามิกเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็กๆ, ฝอยเหล็กสำหรับขัดและใยสแตนเลสตีลคล้ายขนสัตว์, สแตนเลสตีลสานเป็นตะแกรง ปรากฏว่าสมรรถนะของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจาก ฝอยเหล็กสำหรับขัดและใยสแตนเลสตีลคล้ายขนสัตว์นั้นแยกกว่าใช้สแตนเลสตีลสานเป็นตะแกรงและเสนอการให้เซรามิกช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็กๆเป็นทางเลือกเพื่อลดต้นทุน

บิว่าและคณะ (Biwa; et al. 2001). ทำการทดลองวัดการไหลของงานในเครื่องยนต์เรอโมอะคูสติกแบบทอวนประกอบด้วยตัวระบายความร้อนและได้พัฒนาเทคนิคการทดลองหาการไหลของงานในอุปกรณ์เรอโมอะคูสติกและประยุกต์สู่เครื่องยนต์เรอโมอะคูสติกประกอบในท่อเรโซแนนซ์แบบวนรอบ ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ทำจากเซรามิกมีช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆความยาวของแอสติก 35 มิลลิเมตรและช่องเล็กๆขนาด 1.03 มิลลิเมตร

ซากาโมโตะและวาตานาเบะ (Sakamoto & Watanaabe; 2004). ได้ศึกษาทดลองตัวระบายความร้อนของอุปกรณ์เรอโมอะคูสติก การทดลองศึกษาตัวระบายความร้อนที่ประกอบในเครื่องทดลองเรอโมอะคูสติกแบบวนรอบใช้อากาศและแก๊สฮีเลียมเป็นสารทำงานหรือเปิดสู่

บรรยากาศ รีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้เป็นเซรามิกมีช่องเล็ก ๆ 1200 ช่อง ความยาวของสแต็ก 50 มิลลิเมตร จากการทดลองได้เสนอการปรับปรุงระบบโดยเปลี่ยนตำแหน่งของสแต็ก

แลมป์ (Lamp ; 2008). ออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมคอสติก โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีต้นแบบรวดเร็ว (Rapid prototyping) วัสดุที่ใช้ทำเป็นแบ่ง ไนลอน 3 แบบคือ แบบสี่เหลี่ยม, แบบแผ่นขนานและแบบเข็ม โดยใช้เครื่องขยายขนาด 12 วัตต์ 130 มิลลิวัตต์ ความถี่ 275 เฮิร์ต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารีเจนเนอเรเตอร์แบบแผ่นขนานให้ค่าตอบสนองดีที่สุด

เซตตาร์ (Settar ; 2008). ได้ทำการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของรีเจนเนอเรเตอร์ในเทอร์โมคอสติก โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์เป็นแบบแผ่นขนาน,แบบม้วนขดและแบบรังผึ้ง ทำด้วยกระดาษและฟิล์มหนา 0.1และ0.2 มิลลิเมตร ใช้ท่อพีวีซีเป็นท่อเรโซแนนซ์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารีเจนเนอเรเตอร์แบบแผ่นบางทำจากแผ่นฟิล์มให้ค่าแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดเปรียบเทียบกับรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำด้วยกระดาษ อุณหภูมิที่ได้ต่ำกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 3.5 องศาเซลเซียส

ทาสนิม (Tasnim ; 2011). ได้ศึกษากระบวนการและการวัดของรีเจนเนอเรเตอร์ทางเทอร์โมคอสติกแบบพูนพบว่าอุณหภูมิที่แตกต่างผ่านปลายรีเจนเนอเรเตอร์ เปรียบเทียบการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับผลลัพธ์ที่ดีและยอมรับได้ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง ทั้งนี้ยังได้ทดลองโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์แบบประกบกับเป็นชั้นทำด้วยอาร์วีเอโฟม, เซรามิกและอลูมิเนียมโฟม ทั้งหมด 8 แบบ ผลการทดลองพบว่าสแต็กที่ประกอบด้วยเซรามิกประกบหน้าหลังด้วยอาร์วีเอโฟม ได้ผลดีที่สุดและเสนอแนะสำหรับเครื่องยนต์เทอร์โมคอสติกต้องการให้ความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์สั้นลง

เตคุง กี และซังควอนจุน (Taekyung Ki; & Sangkwon Jeone. 2013). ได้วิเคราะห์เครื่องยนต์เทอร์โมคอสติกโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 ซม. ยาว 3, 4.2, 4.7, 6.3 ซม. จากการวิเคราะห์ได้ค่ากำลังสุทธิอยู่ระหว่าง 400 ถึง 520 วัตต์ ประสิทธิภาพคาร์โนอยู่ระหว่าง 40 ถึง 55 เปอร์เซ็นต์

ซูลและมัตซึบารา (Zhou & Matsubara.1998). ได้ทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมคอสติกโดยใช้สแต็กทำด้วยตะแกรงทองแดงและศึกษาอุณหภูมิและความถี่ที่เริ่มทำงานพบว่ากำลังสูงสุด 26 วัตต์ที่ความถี่ 73 เฮิร์ต กำลังที่ป้อนเข้า 833 วัตต์ และอุณหภูมิฮีทเตอร์ 700 เคลวิน

กิและจวง (Ki & Jeong.2013) ได้ศึกษารูปร่างและสมรรถนะของเครื่องยนต์พัลส์ทูปเป็นการประดิษฐ์คิดค้นและค้นคว้าในงานวิจัยนี้ แนวคิดการไหลของพลังงานและความคล้ายคลึงของเครื่องจักรอะคูสติกสามารถทำให้ออกแบบได้หลากหลายชนิดของเครื่องยนต์พัลส์ทูป เป็นการจำแนกด้วยส่วนประกอบของพัลส์ทูปด้วยสองลูกสูบหรือลูกสูบเดี่ยวและแบบเรียง โดยเฉพาะเครื่องยนต์พัลส์ทูปลูกสูบเดี่ยวเป็นพื้นฐานเป็นที่รู้จักกันดีในเครื่องยนต์เทอร์โมคอสติก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพคาร์โนของเครื่องยนต์พัลส์ทูปอยู่ที่ 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์

หัวฟางกังและคณะ (Huifang Kang;et al. 2013). ศึกษาวิจัยโดยทดสอบรูปร่างของตัวขับเคลื่อนความร้อนต่อตรงกับเครื่องยนต์เทอร์โมคอสติก ประกอบด้วยเครื่องยนต์เทอร์โมคอสติก

คลื่นหนึ่ง เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเคลื่อนเดินทาง จากการคำนวณเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแปลงประสิทธิภาพของสามระยะได้คือประสิทธิภาพระยะที่ 1 เท่ากับ 26.2 เปอร์เซนต์ ประสิทธิภาพที่ 2 เท่ากับ 34.3 เปอร์เซนต์ และค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นเท่ากับ 2.67

อับดุลราฮ์มัดและคณะ (Abdulrahman; et al 2009). ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยเลือกใช้วัสดุทำรีเจนเนอเรเตอร์ต้นทุ่นต่ำได้แก่ ตะแกรงโลหะ เซรามิกและฝอยสแตนเลสสตีล พบว่าตะแกรงโลหะให้สมรรถนะที่ดีที่สุด เซรามิกให้ผลพoiใช้และฝอยสแตนเลสสตีลให้สมรรถนะแย่ที่สุดในวัสดุที่นำมาทดสอบสามชนิด

ยูดาและคณะ (Ueda; et al. 2004). ได้ศึกษาทดลองทางเทอร์โมอะคูสติกและประยุกต์ตัวระบายความร้อน กล่าวว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีแบบเดียวกันมีรายงานว่าให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 30 เปอร์เซนต์และจากการทดลองเครื่องระบายความร้อนเทอร์โมอะคูสติกนี้ได้กำเนิดอุณหภูมิต่ำที่ -25 องศาเซลเซียสโดยไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่เลย

ดับเบิลยู วี สลาตัน (W.V.Slaton 2010). ได้ศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเปิดสู่อากาศ ความถี่ต่ำ ทดสอบโดยใช้สแต็กชนิดและขนาดความพรุนต่างกัน พบว่าอุณหภูมิที่แตกต่างที่สแต็กเท่ากับ 185 เคลวินโดยป้อนกำลังไฟฟ้า 276 วัตต์

ตาราง 1 สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยด้านวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานเป็นงานเป็นรีเจนเนอเรเตอร์

นักวิจัย	วัสดุที่ใช้ทำ รีเจนเนอเรเตอร์	ระดับ ความพรุน	ผลที่ได้รับ
Zhou & Matsubara (1998) ชู และ มัตซึบารา	Stainless	-	ป้อนกำลัง 833วัตต์ ความถี่ที่ 73 เฮิร์ต อุณหภูมิ 700 K ได้กำลังสูงสุด 26 วัตต์
Ki & Jeong.(2013) กิ และ จวง	Stainless steel	-	ได้ประสิทธิภาพคาร์โนอยู่ระหว่าง 40 ถึง 50 เปอร์เซนต์
Backaus & Swift (2000) แบคคาลาส และสวift	Stainless steel	72%	เครื่องยนต์ให้กำลังที่ 710 วัตต์ และ 41 เปอร์เซนต์ของประสิทธิภาพคาร์โน
Huifang Kang; et al.(2013) หัวฟาง กัง และคณะ	Stainless steel	65%-75%	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ระหว่าง 26.2 ถึง 34.3 เปอร์เซนต์ และค่า COP =2.67
Abdulrahman; et al. (2009) อับดุลราฮ์มัด และคณะ	Stainless steel	70%-95%	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิเริ่มทำงานขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดรีเจนเนอเรเตอร์

ตาราง 1 (ต่อ)

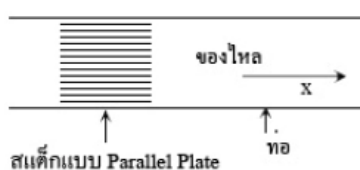
นักวิจัย	วัสดุที่ใช้ทำ รีเจนเนอเรเตอร์	ระดับ ความพรุน	ผลที่ได้รับ
Ueda; et al. (2004) ยูดา และคณะ	Stainless steel	-	บ่อนกำลัง 210วัตต์ ทำความเย็นได้ที่ - 20 องศาเซลเซียส
W.V.Slaton (2010) ดับเบิลยู วี สลาตัน	Aluminum	55%-99%	ให้พลังงานไฟฟ้า 276 วัตต์ อุณหภูมิ แตกต่างกันของสแต็ก 185 เคลวิน

จากการทบทวนวรรณกรรมและตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษารีเจนเนอเรเตอร์ ในการออกแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกดังตารางที่สรุปสาระสำคัญ พบว่าไม่สามารถเปรียบเทียบพลังงานและประสิทธิภาพกันได้ เนื่องจากลักษณะการทดลองที่ต่างกันและขนาดชนิดเครื่องที่ต่างกันของรีเจนเนอเรเตอร์ ดังนั้นการศึกษาวิจัยอิทธิพลของชนิดวัสดุและรูปแบบของรีเจนเนอเรเตอร์ ในงานวิจัยนี้จึงจำกัดการศึกษาโดยทำการทดสอบที่เครื่องยนต์ที่ขนาดเท่ากัน แต่ต่างที่กันวัสดุซึ่งใช้สำหรับทำรีเจนเนอเรเตอร์และระดับความพรุนของวัสดุที่ใช้ทำเป็นสำคัญ

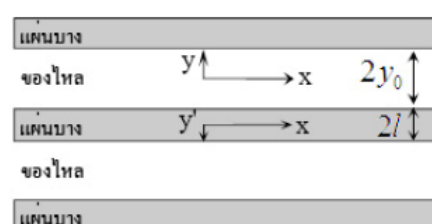
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเทอร์โมอะคูสติก

Swift ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีการรวบรวมข้อมูล และเรียบเรียงสมการทางคณิตศาสตร์ใหม่เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก สว่างทิพย์ ได้สร้างสมการทางเทอร์โมอะคูสติกอาศัย ภาพประกอบ 1 ในการอธิบายจากภาพสแต็กเป็นแบบแผ่นบางขนาน (Parallel Plates) ที่อยู่ภายในท่อซึ่งบรรจุของไหลที่เป็นสารทำงาน โดยกำหนดขนาดของสแต็กให้มีความหนา $2l$ และระยะห่างระหว่างแผ่น $2y_0$ ซึ่ง x มีทิศทางตามการสั่นของคลื่นเสียง และ y มีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นบางของสแต็กในสารทำงาน โดยที่ $y=0$ ที่จุดกึ่งกลางของของไหล และ $y = y_0$ ที่ขอบเขตของของไหล และแกน y' มีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นบาง ด้านในแผ่นของสแต็กโดยที่ $y' = 0$ ที่จุดกึ่งกลางของแผ่นและ $y' = l$ ที่ขอบเขตของแผ่นบาง ซึ่ง y และ y' มีทิศทางตรงกันข้ามกัน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 1 (ก) ภาพรวมของสแต็ก (ข) ภาพขยายของแผ่นบาง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการประมาณค่าปริมาณต่างๆ ที่สั้นด้วยความถี่ (1) ซึ่งใช้การขยายเทอมอันดับหนึ่ง เช่น $p \approx p_m + p_1 e^{i\omega t}$, $\rho \approx \rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}$ และ $T \approx T_m + T_1 e^{i\omega t}$ เป็นต้น และสมมติว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วของของไหลในแนวความยาวท่อ $\mu_m = 0$ สำหรับสมการทั่วไปที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกประกอบด้วยสมการคลื่น และสมการพลังงานเป็นหลัก

2.2 รูปแบบการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

โดยพื้นฐานแล้วหลอดเสียงหรือท่อเทอร์โมอะคูสติก (Thermacoustic pipe) จะเป็นท่อที่ปลายด้านหนึ่งปิด เมื่อเกิดผลทางเทอร์โมอะคูสติกขึ้น อากาศในท่อจะเกิดการอัดตัวเคลื่อนไปสู่ปลายด้านปิดและขยายตัวเคลื่อนไปสู่ปลายด้านเปิด ดังนั้นอากาศในท่อจะเกิดการแกว่ง (Oscillate) ไปตามท่อโดยถูกอัดเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ปลายด้านปิดและขยายตัวเมื่อเคลื่อนที่สู่ปลายด้านเปิดดังภาพประกอบ 2 สำหรับหลอดเสียงที่ใช้งานจริงจะมีรีเจเนอเรเตอร์ติดตั้งอยู่ด้วย ดังแสดงในภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 2 หลอดเสียงอย่างง่าย

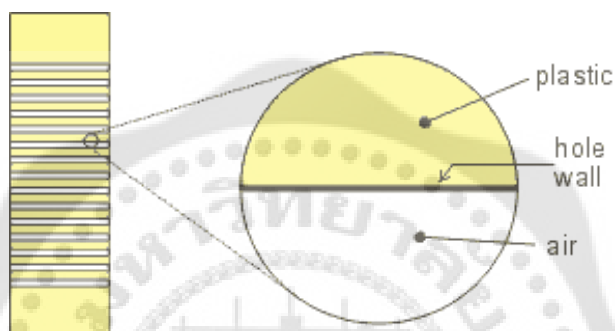


ภาพประกอบ 3 หลอดเสียงที่มีรีเจเนอเรเตอร์

2.3 วัฏจักรของพาร์เซล

พิจารณารีเจเนอเรเตอร์ที่สร้างจากพลาสติก ดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 4 ซึ่งประกอบด้วยรูขนาดเล็กเจาะทะลุโดยตลอด อุณหภูมิของผนังรูมีความแตกต่างกัน โดยปลายรีเจเนอเรเตอร์ด้านขวามือต่อเข้ากับท่อทองแดงร้อนและปลายรีเจเนอเรเตอร์ด้านซ้ายมือต่อกับท่อทองแดงซึ่งเย็นกว่า สมมติว่าอุณหภูมิของผิวรูใน รีเจเนอเรเตอร์นี้เปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพประกอบ 5 พิจารณาลูกกลิ้งไปสู่อากาศที่อยู่ภายในรูเล็กๆ ส่วนหนึ่งที่อยู่ติดกับผิวรูเล็กๆ นี้ เลือกปริมาตรของอากาศส่วนหนึ่ง อากาศส่วนนี้ควรมีขนาดพอสมควรที่จะเป็นไปตามกฎทางอุณหพลศาสตร์ เรียกอากาศส่วนนี้ว่าพาร์เซล (Parcel) ของอากาศ แล้วพิจารณาการเคลื่อนที่ของพาร์เซลไปตามรูเล็กๆ นี้ ภาพประกอบ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวรูรีเจเนอเรเตอร์ (รีเจเนอเรเตอร์ temperature gradient) ซึ่งขึ้นอยู่กับโคออร์ดิเนต x ซึ่งอากาศเกิดการแกว่งไปตามแนวแกนของรู ซึ่งการเคลื่อนที่แบบแกว่งนี้จะเป็นในรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal motion) ในขณะที่

พาร์เซลอยู่ที่จุด 1 อุณหภูมิของพาร์เซลจะเท่ากับผิวรูปที่พาร์เซลติดอยู่ เมื่อพาร์เซลเคลื่อนที่ไปอยู่ที่จุด 2 อุณหภูมิของพาร์เซลจะสูงขึ้นเพราะว่าในขณะที่พาร์เซลเคลื่อนที่พาร์เซลจะถูกอัดด้วย แต่อุณหภูมิของพาร์เซลยังคงต่ำกว่าผิวรูป ดังนั้นในช่วงนี้พาร์เซลจะได้รับความร้อนจากผิวรูป อุณหภูมิของพาร์เซลจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับผิวรูป (จุด 3) ระหว่างกระบวนการ 2-3 นี้ พาร์เซลจะขยายตัว ดังแสดงในภาพประกอบ 6 ในขั้นต่อไป พาร์เซลจะเคลื่อนที่กลับไปสู่ตำแหน่งเดิม เป็นจุด 4 เนื่องจากพาร์เซลได้รับความร้อนในกระบวนการ 2-3 อุณหภูมิของพาร์เซลจึงสูงกว่าผิวรูป ดังนั้นในช่วงนี้พาร์เซลจึงถ่ายเทความร้อนให้ผิวรูปและเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับผิวรูป เป็นจุด 1 เมื่อพาร์เซลเย็นตัวลงปริมาตรของพาร์เซลจึงลดลง

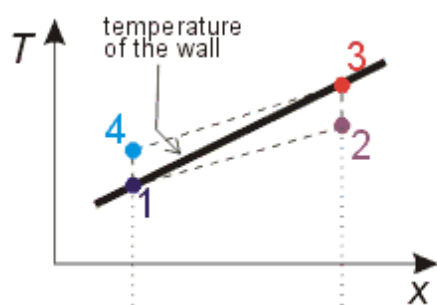


ภาพประกอบ 4 สแต็ก

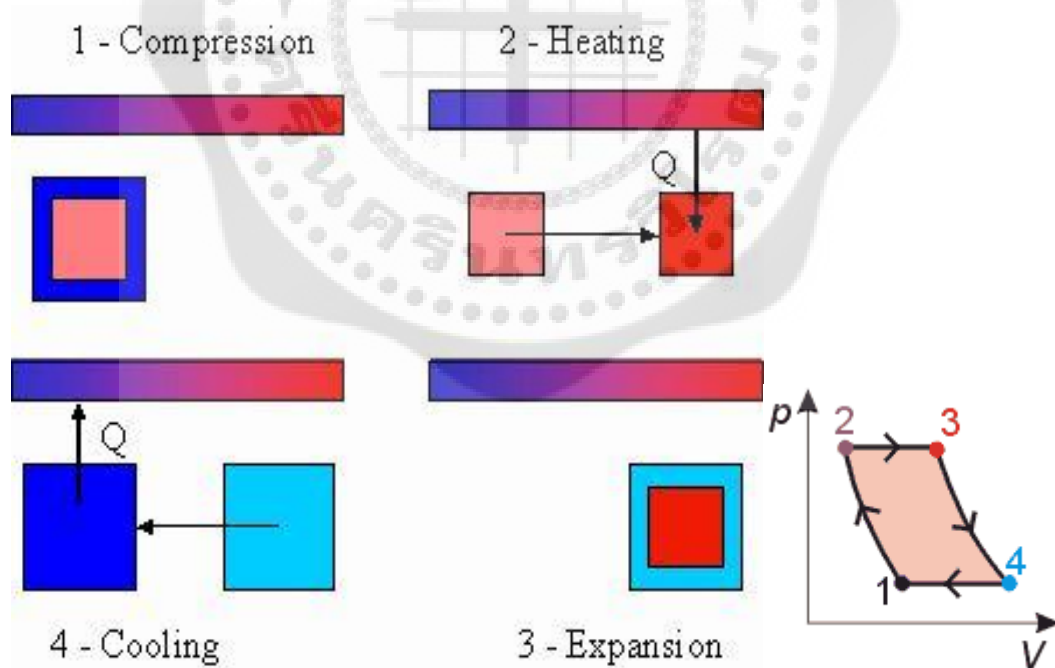
ในวัฏจักรที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พาร์เซลนำความร้อนจากผิวรูปที่อุณหภูมิสูงไปส่งให้แก่ผิวรูปที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวมาแล้วประกอบด้วยกระบวนการอัดแบบติด 2 กระบวนการ (1-2 และ 3-4) และกระบวนการความดันคงที่ 2 กระบวนการ (2-3 และ 4-1) พื้นที่ที่ถูกล้อมรอบด้วยกระบวนการทั้ง 4 ในแผนภาพความดัน - ปริมาตร คืองานที่ได้ออกมาในระหว่างวัฏจักร ในกรณีนี้งานกระทำกับพาร์เซล ในระหว่างช่วงเวลาที่หนึ่งวัฏจักรพาร์เซลจะรับความร้อนจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่านำไปสู่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและได้รับงาน (งานกระทำกับพาร์เซล)

วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวมาแล้วนั้นคล้ายกันกับวัฏจักรหนึ่งซึ่งรู้จักกันในชื่อของวัฏจักรสเตอร์ลิง โดยคลื่นเสียงทำหน้าที่เป็นลูกสูบทั้งสองลูกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ด้วยหลักการของเรอร์โมอะคูสติก จึงเป็นไปได้ที่จะสร้างและขยายคลื่นเสียงโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ พลังงานความร้อนถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานเสียงซึ่งสามารถพิจารณาให้เป็นพลังงานกลรูปหนึ่งได้

ลักษณะการทำงานของวัฏจักรที่กล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่าพาร์เซลรับความร้อนจากผิวรูปที่มีอุณหภูมิสูงกว่าแล้วคายความร้อนให้กับผิวรูปที่มีอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนระหว่างพาร์เซลกับผิวรูปของวัฏจักรได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 6 ระหว่างการทำงานในแต่ละวัฏจักร จะเห็นได้ว่าพาร์เซลถูกอัดที่อุณหภูมิต่ำและขยายตัวที่อุณหภูมิสูง นั้นหมายความว่าเกิดงานขึ้นกับพาร์เซล ผลของงานที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้คลื่นเสียงเกิดการแกว่งของความดันขึ้น



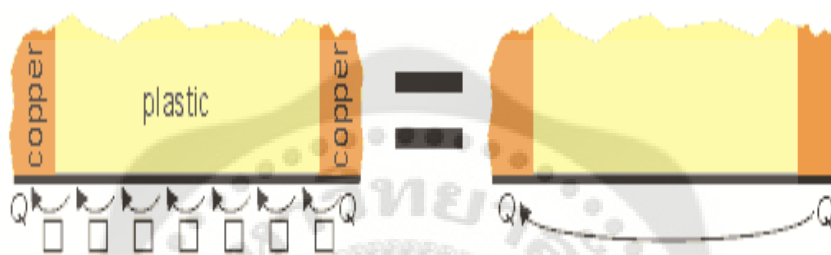
ภาพประกอบ 5 การถ่ายเทความร้อนของพาร์เซล



ภาพประกอบ 6 วัฏจักรการทำงานของพาร์เซล

2.4 การถ่ายเทความร้อนผ่านรีเจนเนอเรเตอร์

สำหรับพาร์เซลอื่นๆที่อยู่ติดกันก็จะเกิดผลทางเทอร์โมอะคูสติกในทำนองเดียวกันแต่ละพาร์เซลจะได้รับงานแล้วเคลื่อนย้ายความร้อนสู่ด้านซ้ายมือ ความร้อนที่แต่ละพาร์เซลได้รับในวัฏจักรหนึ่งจะถูกส่งต่อไปสู่พาร์เซลที่อยู่ติดกันวัฏจักรถัดไปในวัฏจักรหนึ่งพาร์เซลทั้งหมดจะถ่ายเทความร้อนจากด้านร้อน (ขวามือ) ไปสู่ด้านเย็น ดังแสดงในภาพประกอบ 7 งานที่พาร์เซลได้รับคือพลังงานเสียงที่เพิ่มขึ้นของหลอดเสียง เมื่อหลอดเสียงเกิดการสะท้อน (Resonate) พลังงานเสียงก็จะแผ่กระจายออกไปที่จะหยุดส่งเสียงทันทีที่ไม่ได้รับพลังงานชดเชยเข้ามา พลังงานที่สูญเสียไปจะเปลี่ยนไปเป็นงานที่พาร์เซลได้รับ



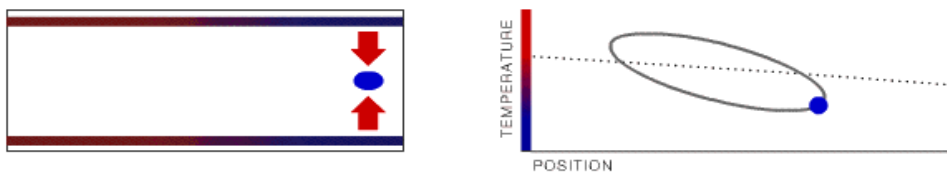
ภาพประกอบ 7 การถ่ายเทความร้อนผ่านสแต็ก

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเกรเดียนต์ (Temperature gradient) กับรีเจนเนอเรเตอร์ แบ่งได้เป็น 3 กรณีคือ

2.5.1 สภาวะเมื่ออุณหภูมิเกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์ ต่ำกว่าพาร์เซล

ถ้ามีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและอากาศมีการแกว่งรีเจนเนอเรเตอร์จะรับพลังงานเสียงแล้วจะเปลี่ยนไปเป็นเครื่องสูบลมความร้อนก็ต่อเมื่อ อุณหภูมิเกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์ต่ำกว่าอุณหภูมิเกรเดียนต์ของพาร์เซลในกรณีนี้พาร์เซลจะรับความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ ที่ปลายเย็นในการเคลื่อนที่ของพาร์เซลแล้วระบายความร้อนนี้กลับคืนให้แก่รีเจนเนอเรเตอร์ที่ปลายด้านร้อน

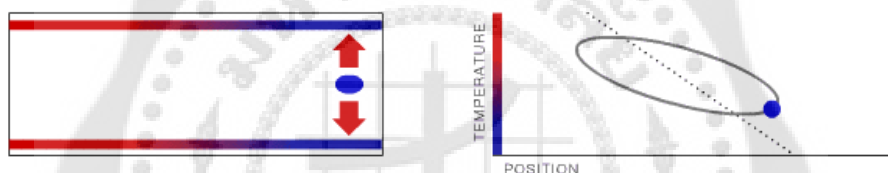
จากภาพประกอบ 8 ความชันของอุณหภูมิเกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์ ไม่ชันมากเท่ากับของพาร์เซล ดังนั้นจึงมีการไหลของความร้อนขึ้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้พาร์เซลเคลื่อนที่เป็นวงรีพาร์เซลจะเปลี่ยนพลังงานเสียงของคลื่นเสียงเป็นพลังงานป้อนเข้า ทำให้ปลายด้านร้อนมีความร้อนมากขึ้นและปลายด้านเย็นมากขึ้น ในกรณีนี้การทำงานจะเป็นเครื่องสูบลมความร้อนหรือเครื่องทำความเย็น



ภาพประกอบ 8 กรณีอุณหภูมิแกรเดียนท์ของพาร์เซลชันมากกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์

2.5.2 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกรเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์สูงกว่าพาร์เซล

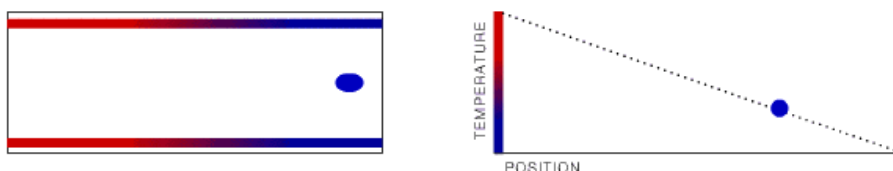
เมื่ออุณหภูมิแกรเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์ มีความชันมากกว่าของพาร์เซลในกรณีนี้พาร์เซลจะรับความร้อนจากปลายด้านร้อนแล้วส่งกลับคืนที่ปลายด้านเย็น ซึ่งเป็นการให้พลังงานแก่คลื่นเสียง โดยใช้แหล่งความร้อนเป็นแหล่งให้พลังงาน ในกรณีนี้การทำงานเป็นแหล่งพลังงานเสียง พลังความร้อนเป็นเครื่องต้นกำลังซึ่งบางครั้งเรียกว่า Howler นั่นคือเครื่องยนต์ใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เกิดเสียงที่ความถี่พ้อง (Resonant frequency) ขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 กรณีอุณหภูมิแกรเดียนท์ของพาร์เซลชันน้อยกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์

2.5.3 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกรเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับพาร์เซล

สภาวะที่ปลายด้านหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์ ร้อนโดยที่ปลายอีกข้างหนึ่งเย็นถ้าไม่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิแกรเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์ จะเท่ากับอุณหภูมิแกรเดียนท์ของพาร์เซลจะไม่เกิดงานขึ้นและไม่มีการไหลเข้าหรือไหลออก แสดงภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 กรณีอุณหภูมิของพาร์เซลเท่ากับรีเจนเนอเรเตอร์

เพื่อให้ได้ปฏิสัมพันธ์ที่ระหว่างคลื่นเสียงกับรีเจนเนอเรเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์จึงสร้างขึ้นจากโลหะพรุน ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงโดยการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานความร้อนน้อยมากอุณหภูมิแกรเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนติดไว้ที่ปลายทั้งสองด้าน

2.6 หลักการถ่ายทอดพลังงานด้วยรีเจนเนอเรเตอร์

จากผลเรอร์โมอะคูสติกที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าสามารถนำเอาหลักการนี้ไปสร้างเป็นเครื่องยนต์และเครื่องสูบลมความร้อน ซึ่งมีหลักการทำงานโดยสังเขปดังนี้

2.6.1 การทำงานเป็นเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก

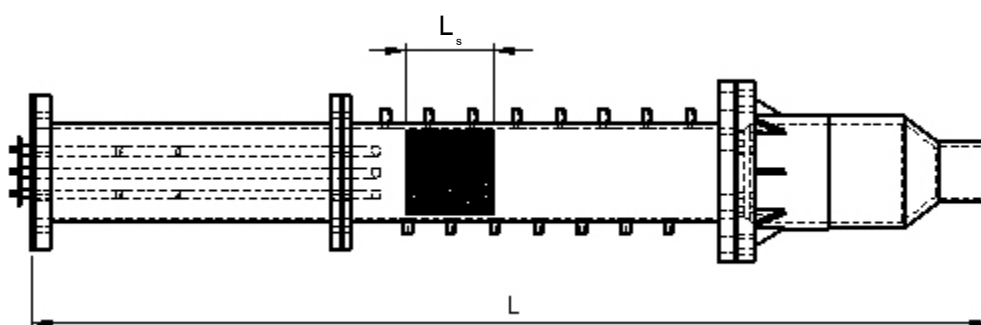
เมื่อรีเจนเนอเรเตอร์มีอุณหภูมิแก๊สเฉื่อยที่โดยการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่จากด้านเย็นผ่านพาร์เซล พาร์เซลจะถูกอัดด้วยคลื่นความดัน (Pressure wave) ที่พัดผ่าน พาร์เซลจึงเคลื่อนที่ไปสู่รีเจนเนอเรเตอร์ด้านร้อน เนื่องจากรีเจนเนอเรเตอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าพาร์เซล พาร์เซลจึงร้อนขึ้นคลื่นความดันซึ่งในตอนแรกอัดพาร์เซลในตอนนี้จะทำให้พาร์เซลขยายตัว สุดท้ายพาร์เซลจะเคลื่อนที่กลับไปสู่ตำแหน่งเดิม ซึ่งพาร์เซลยังคงมีอุณหภูมิสูงกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ทำให้ความร้อนถ่ายเทจากพาร์เซลสู่รีเจนเนอเรเตอร์

2.6.2 การทำงานเป็นเครื่องสูบลมความร้อนเรอร์โมอะคูสติก

เครื่องสูบลมความร้อนจะทำงานโดยเกิดกระบวนการต่าง ๆ กลับกันกับของเครื่องยนต์ที่กล่าวมาแล้ว วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์เกิดขึ้นในทิศทางย้อนกลับ นั้นย่อมาหมายความว่า พลังงานเสียงถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน ในกรณีของเครื่องสูบลมความร้อน ความร้อนถูกสูบจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูง เนื่องจากสารตัวกลางเป็นอากาศ ดังนั้นจึงดูเหมือนกับว่าจะไม่มีข้อจำกัดในการใช้เครื่องสูบลมความร้อนแบบนี้ ไม่มีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกกับเครื่องสูบลมความร้อนเรอร์โมอะคูสติก ความแตกต่างเพียงอย่างเดียวก็คือทิศทางที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ข้ามอุณหภูมิแก๊สเฉื่อย

2.7 การหาความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์

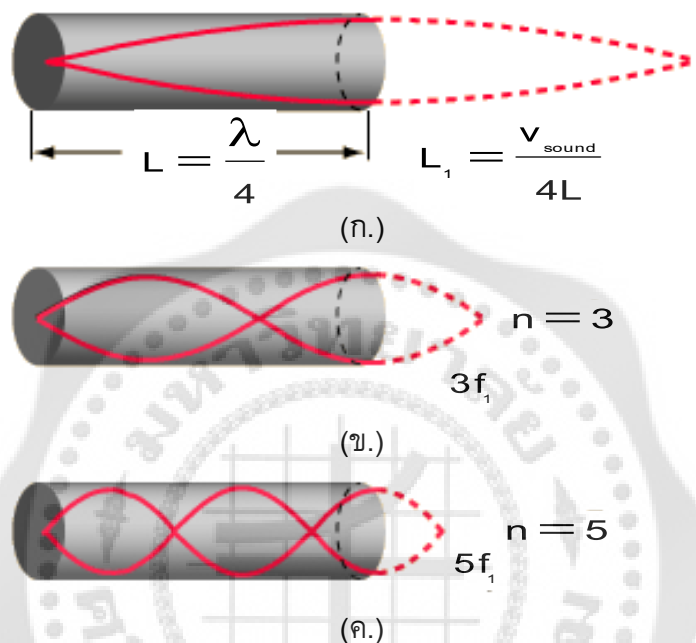
จากผลการศึกษาและวิจัยของผู้เชี่ยวชาญและคณะผู้วิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในปี ค.ศ. 1996 (พ.ศ. 2539) โดย Cao et.al ได้แนะนำความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์ $L_s = 2.4\% \text{ of } \lambda$ ในปี ค.ศ. 2001 (พ.ศ. 2544) โดย Tijani รีเจนเนอเรเตอร์ ควรออกแบบให้สั้นเท่าทำได้ $L_s \ll \lambda / 2\pi$ หรือ v / ω



ภาพประกอบ 11 แสดงตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์ในเครื่องทดสอบเรอร์โมอะคูสติก

2.8 คลื่นยืนในท่ออากาศแบบท่อปิด

ท่อปิด ตามความหมายที่ใช้กันคือ เป็นท่อตรงซึ่งมีปลายข้างหนึ่งปิด ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งเปิด กำหนดท่อปิดท่อหนึ่ง มีความยาว L มีอากาศอยู่ภายใน เกิดการสั่นพ้องของอากาศในท่อนี้มีเสียงดัง อันเนื่องมาจากจากอิทธิพลความถี่ต่างๆ กันของแหล่งต้นทางเสียง โดยมีคลื่นยืนในท่ออากาศท่อนั้น ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 แสดงลักษณะ 3 แบบของคลื่นยืนในท่ออากาศท่อหนึ่ง ซึ่งยาว เรียงตามค่าความถี่จากน้อยไปหามาก ที่มา http://www.sa.ac.th/winyoo/mechanicswave/wa_resonance.htm

กำหนดให้ V แทนอัตราเร็วของคลื่นเสียงในอากาศ

รูป (ก.) ให้ f_1 และ λ_1 แทนความถี่และความยาวคลื่น ตามลำดับ

จะได้ $\lambda_1 = 4L$ และ $f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}$

รูป (ข.) ให้ความถี่และความยาวคลื่นคือ f_3 และ λ_3 ตามลำดับ

จะได้ $\lambda_3 = \frac{4L}{3}$ และ $f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = 3\left(\frac{v}{4L}\right) = 3f_1$

รูป (ค.) เมื่อ f_5 และ λ_5 แทนความถี่และความยาวคลื่นตามลำดับ

จะได้ $\lambda_5 = \frac{4L}{5}$ และ $f_5 = \frac{v}{\lambda_5} = 5\left(\frac{v}{4L}\right) = 5f_1$

จำนวนลูบของคลื่นหนึ่งในท่อปิด ยาว L จะสามารถเกิดคลื่นนิ่งที่มีความถี่ได้หลายค่า หรือเขียน เป็นสมการความสัมพันธ์

$$\text{จะได้} \quad f_n = nf_1 = n \left(\frac{v}{4L} \right)$$

จากการลองจะพบว่า ณ ตำแหน่งปลายเปิดของท่อนั้น ยังไม่ใช่ปฏิบัติการกระจัดอย่างแท้จริง ความยาวยังผลของท่อหนึ่งซึ่งคือ ความยาวของท่อที่ทำให้ผลการทดลองตรงตามทฤษฎี จะต้องมีความมากกว่าความยาวของท่อที่ใช้ทำการทดลองนั้น (L) โดยที่ค่าแก้ปลาย (End

Correction) จากผลดังกล่าวสำหรับท่อบางท่อหนึ่ง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางจะประมาณ $\frac{4d}{3\pi}$

$$\text{จะได้} \quad f_n = \frac{nv}{4 \left(L + \frac{4d}{3\pi} \right)}, \text{Hz} \quad (2.1)$$

เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็มบวก ได้แก่ 1,2,3.....สำหรับความถี่มูลฐานจะใช้ $n=1$

v ความเร็วเสียงผ่านอากาศ ,m/s

L ความยาวท่อ ,m

d เส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ ,m

ความเร็วเสียงในก๊าซ โดยนำเอาสมการสถานะของก๊าซอุดมคติ (Equation of state of an ideal gas) มาประกอบการพิจารณาโดยมีจุดประสงค์ไปสู่อัตราเร็วของคลื่นเสียงในอากาศที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

$$\text{จะได้} \quad v = \sqrt{\gamma RT} \quad ,\text{m/s} \quad (2.2)$$

เมื่อ γ อัตราส่วนความจุความร้อน $\gamma = C_p / C_v$

R ค่าคงที่เฉพาะของก๊าซ ,J/kg.K (สำหรับอากาศ 287.053 J/kg.K)

T อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ ,K

2.9 เปอร์เซ็นต์ช่องว่างวัสดุรีเจนเนอเรเตอร์

เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง คือ อัตราส่วนร้อยละของปริมาตรช่องว่างในเนื้อวัสดุเปอร์เซ็นต์ช่องว่างกับปริมาตรรวม ของวัสดุเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \times 100\% \quad (2.3)$$

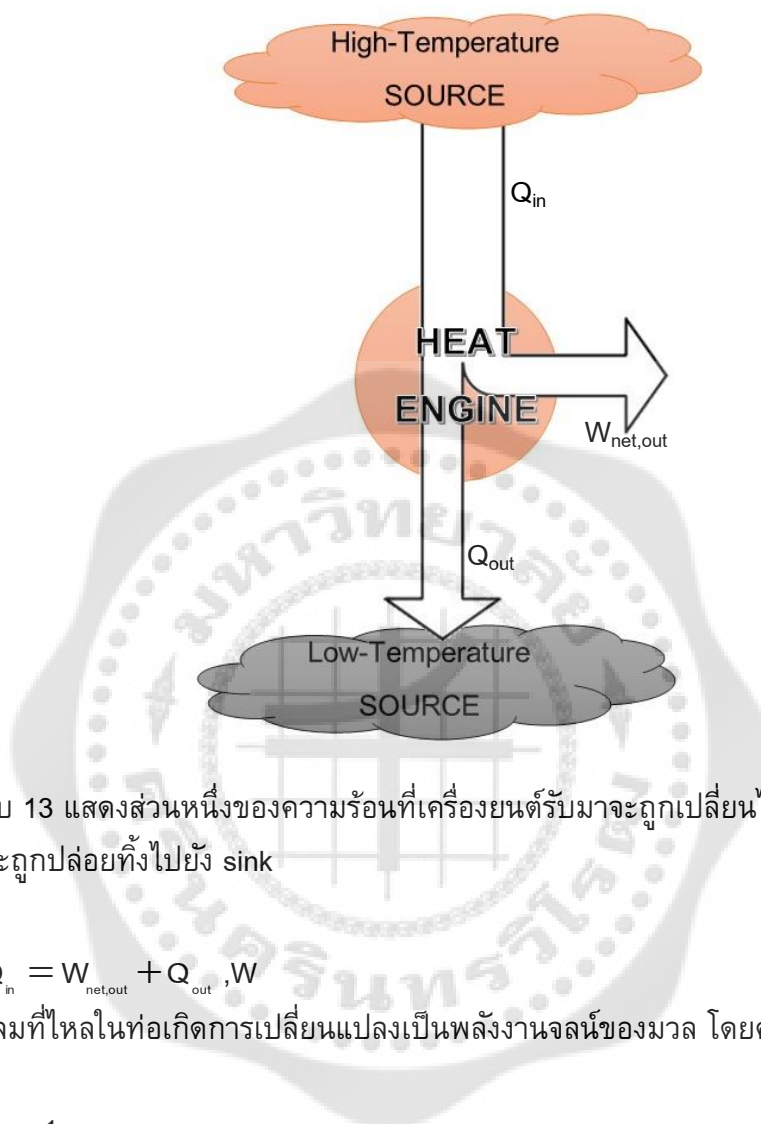
เมื่อ ε เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง , %

V_b ปริมาตรรวม,m³

V_s ปริมาตรเนื้อของแข็ง ,m³

2.10 กำลังและประสิทธิภาพ

เครื่องยนต์งานสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนได้โดยตรงดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงส่วนหนึ่งของความร้อนที่เครื่องยนต์รับมาจะถูกเปลี่ยนไปเป็นงาน ส่วนที่เหลือจะถูกปล่อยทิ้งไปยัง sink

จะได้ $Q_{in} = W_{net,out} + Q_{out}$, W (2.4)

กำลังลมที่ไหลในท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานจลน์ของมวล โดยความเร็วเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \text{ โดย } \dot{m} = \rho A v$$

จะได้ $P = \frac{1}{2} \rho A v^3$, W (2.5)

จากเครื่องยนต์ความร้อนสามารถหาประสิทธิภาพ

จะได้ $\eta = \frac{P}{Q_{in}}$ (2.6)

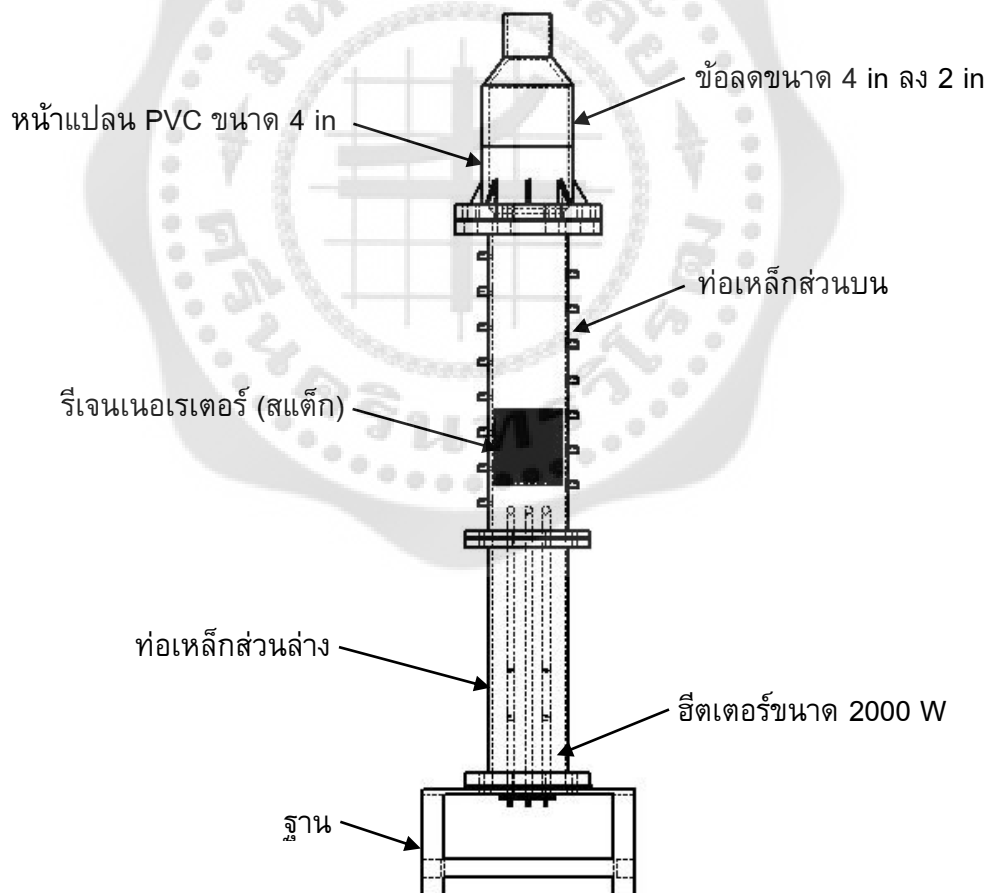
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. อุปกรณ์สำหรับดำเนินงานวิจัย
2. การดำเนินงานวิจัย

ต้นแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด แสดงดังภาพประกอบ 14 เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิดทำงานโดยใช้อากาศเป็นสารทำงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104.7mm สูง 1115.8 mm ใช้เครื่องกำเนิดความร้อนขนาด 2000 W เป็นแหล่งพลังงานทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดได้ 300 °C ใช้สำหรับทดลองตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา



ภาพประกอบ 14 แสดงภาพประกอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในการทดลอง

1. อุปกรณ์สำหรับดำเนินงานวิจัย

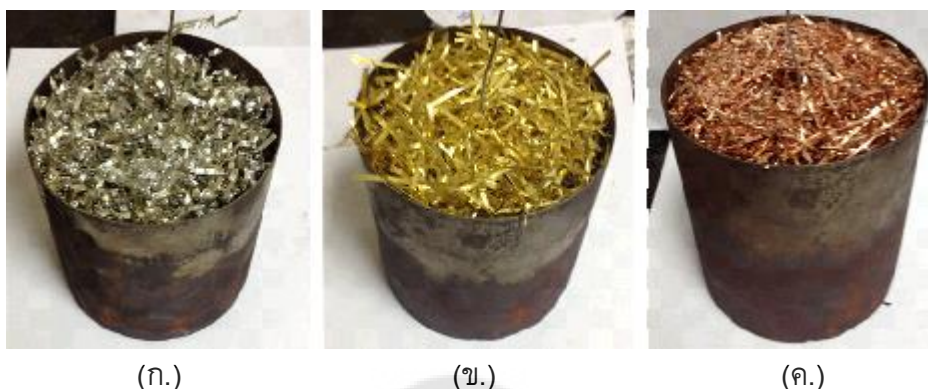
อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบผลของชนิดรีเจนเนอเรเตอร์ของวัสดุต่อการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีดังนี้

1.1 เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104.7 mm ติดตั้งฮีตเตอร์ขนาด 2000 W เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน



ภาพประกอบ 15 แสดงภาพประกอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในการวิจัย

1.2 วัสดุทำรีเจนเนอเรเตอร์ สำหรับการทดสอบทำจากวัสดุ 3 วัสดุ ทองแดง ทองเหลือง และ อลูมิเนียม ขนาดความยาว 111 mm ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 แสดงวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ (ก.) อลูมิเนียม (ข.) ทองเหลือง (ค.) ทองแดง

1.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล DIGICON รุ่น ID8 สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 5 จุด หรือ สามารถต่อหัววัดอุณหภูมิได้ 5 อัน พร้อมกัน ความเที่ยงตรงสูงถึง 0.5% และสวิตช์วัดอุณหภูมิแบบหลายจุด รุ่น TS-84HT สามารถปรับไป 4 จุด



ภาพประกอบ 17 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลและสวิตช์วัดอุณหภูมิแบบหลายจุด

3.4 สายเทอร์โมคัปเปิล Type K ตามมาตรฐาน JIS C 1610 – 1981 ย่านการวัดอุณหภูมิที่ -200 ถึง 1250 °C ค่าความถูกต้อง $\pm 0.4\%$



ภาพประกอบ 18 แสดงสายเทอร์โมคัปเปิล Type K

3.5 เครื่องวัดความเร็วลม TESTO รุ่น 425 เป็นเครื่องมือวัดที่สามารถวัดได้ทั้งความเร็วลมและอุณหภูมิได้พร้อมกัน โดยใช้หลักการหว่าวัดความร้อนด้ามจับเป็นแบบ telescopic ทำให้ยืดได้ถึง 820 mm. วัดความเร็วลมช่วงการวัดตั้งแต่ 0 ถึง +20 m/s ค่าความถูกต้อง $\pm (0.03 \text{ m/s} + 5\% \text{ of mv})$ ค่าความละเอียด 0.01 m/s วัดอุณหภูมิ แบบ NTC ช่วงการวัดตั้งแต่ -20 ถึง +70 °C ค่าความถูกต้อง $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (0 ถึง +60 °C) $\pm 0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$



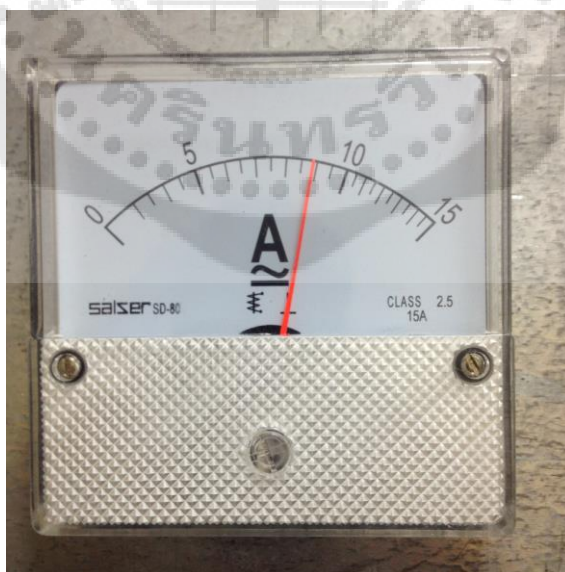
ภาพประกอบ 19 เครื่องวัดความเร็วลม TESTO รุ่น 425

1.6 โวลต์มิเตอร์แบบเข็ม SALZER รุ่น SD-80 สามารถวัดได้ 0 ถึง 300 V ค่าความละเอียด 10 V



ภาพประกอบ 20 มิเตอร์วัดโวลต์แบบเข็ม SALZER รุ่น SD-80

1.7 แอมป์มิเตอร์แบบเข็ม SALZER รุ่น SD-80 สามารถวัดได้ 0 ถึง 15 A ค่าความละเอียด 1 A



ภาพประกอบ 21 มิเตอร์วัดแอมป์แบบเข็ม SALZER รุ่น SD-80

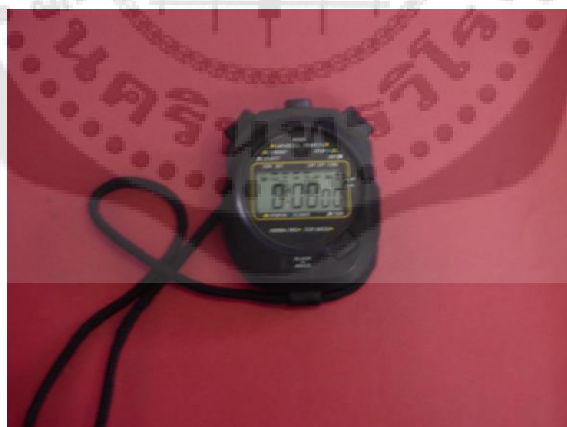
1.8 เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล OMRON รุ่น E5CC เป็นเครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัลขนาด 48 x 58 mm. จอแสดงผลค่าอุณหภูมิที่วัดได้และค่าอุณหภูมิที่

ต้องการควบคุมเป็นแบบตัวเลขดิจิทัล มีฟังก์ชันเก็บค่าที่ใช้ในการควบคุมไว้ในหน่วยความจำ เพื่อสะดวกในการเลือกใช้งาน ควบคุมการทำงานด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ แบบชิปเดี่ยว เอ้าท์พุทโดยรีเลย์ คอนแทค : AC 220 V 1A, แรงดัน: DC 12 V



ภาพประกอบ 22 เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล OMRON รุ่น E5CC

1.9 นาฬิกาจับเวลา Black & White สามารถบอกเวลาปกติและจับเวลา โดยจับเวลาความละเอียดถึง 0.01 วินาที



ภาพประกอบ 23 นาฬิกาจับเวลา Black & White

1.10 เครื่องชั่งดิจิทัล OHAUS รุ่น Pioneer (PA413) พิกัดน้ำหนัก 410 g ค่าละเอียด 0.001 g แท่นชั่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 cm. จานชั่งเป็นสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm สามารถอ่านค่าน้ำหนักจากการแขวนได้พร้อมตุ้มกระจกใบใหญ่ป้องกันลม พร้อมช่องต่อสาย RS232C



ภาพประกอบ 24 เครื่องชั่งดิจิทัล OHAUS รุ่น Pioneer (PA413)

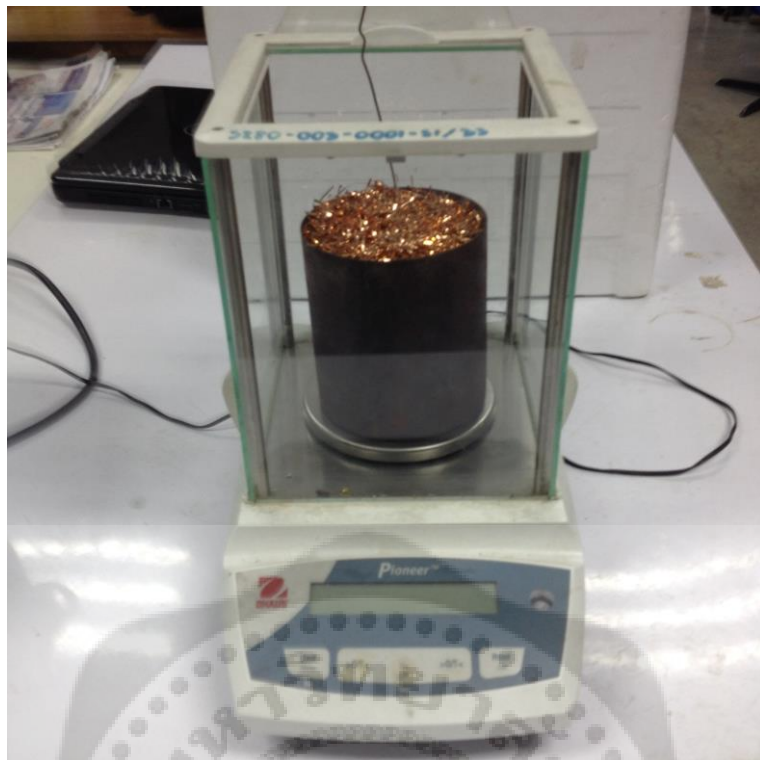
2. การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการทดสอบผลของชนิดวัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ต่อการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

2.1 เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104.7 mm แหล่งพลังงานให้ความร้อนฮีตเตอร์ที่ 2000 W จำนวน 1 เครื่อง ภาพประกอบ 26 ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ อุณหภูมิที่ทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ T_H , อุณหภูมิที่ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ T_R , อุณหภูมิที่ทางออกเครื่องยนต์ T_{out} วัดความเร็วลมที่ทางออกเครื่องยนต์ v_{out} วัดความดันไฟฟ้า (โวลต์, V) วัดความกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A) ดังภาพประกอบ 26

2.2 รีเจนเนอเรเตอร์ สำหรับการทดสอบทำจากวัสดุ 3 วัสดุ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียมขนาดความยาว 111 mm กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง โดยชั่งน้ำหนักหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของวัสดุสมการที่ (2.3)

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \times 100\%$$



ภาพประกอบ 25 แสดงการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างวัสดุโดยชั่งน้ำหนัก

2.3 ทำการเปิดฮีตเตอร์และเริ่มบันทึกข้อมูล T_H, T_R, T_{out} วัดความเร็วลม v_{out} วัดความดันไฟฟ้า (โวลต์, V) วัดความกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A) โดยบันทึกทุก 1 นาทีจนอุณหภูมิ T_H ถึง 300 °C

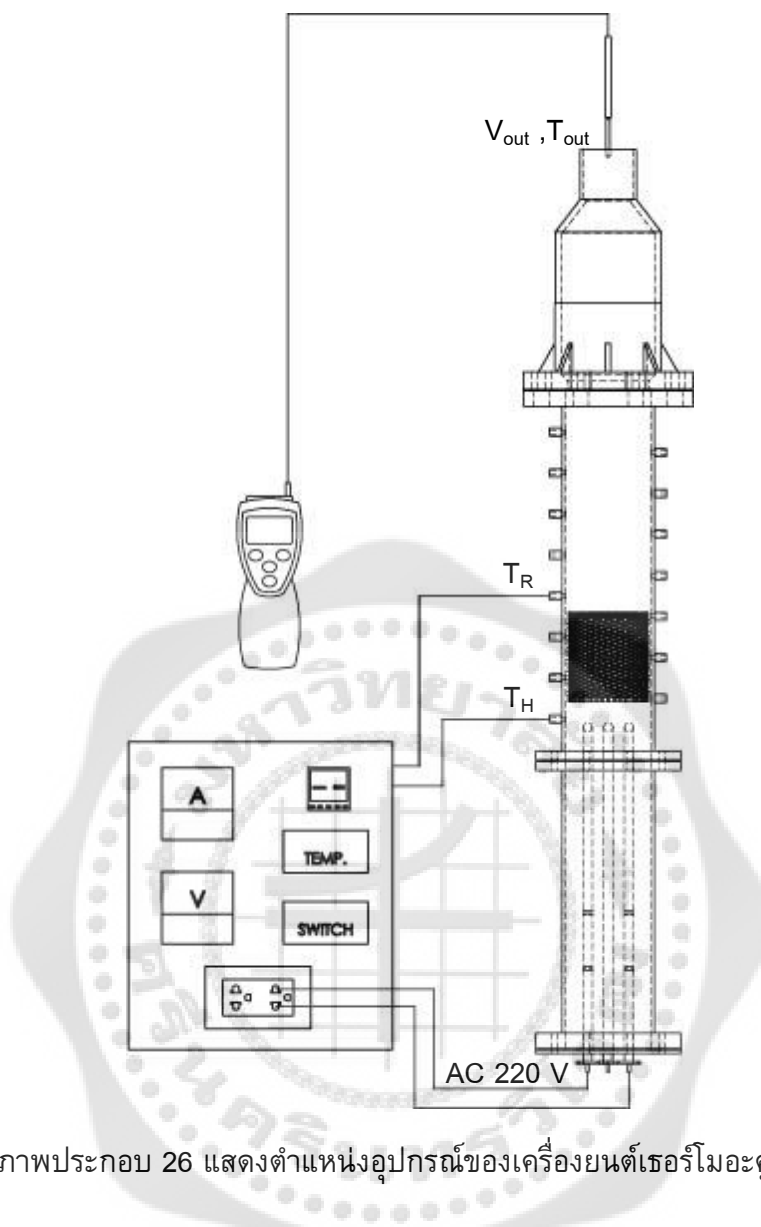
2.4 คำนวณกำลัง ความเร็วลม v_{out} และอุณหภูมิทางออก T_{out} สมการที่ 2.5

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

2.5 คำนวณหาประสิทธิภาพความร้อน จากข้อมูลความดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าฮีตเตอร์ ดังสมการที่ 2.6

$$\eta = \frac{P}{Q_{in}}$$

2.6 ทดสอบผลของความพรุนรีเจนเนอเรเตอร์ต่องานที่ได้ จากเครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติค หลังจากทดลองทราบผลของทั้ง 3 วัสดุ ทองแดง ทองเหลือง และ อลูมิเนียม แล้วนำวัสดุที่ได้งานสูงสุด มาปรับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง โดยอยู่ในช่วง 80%-99% ทดลองตามขั้นตอนที่ 2.1 ถึง 2.5



ภาพประกอบ 26 แสดงตำแหน่งอุปกรณ์ของเครื่องย่นต์เทอร์โมอะคูสติค

เมื่อ T_H อุณหภูมิที่ทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์

T_R อุณหภูมิที่ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์

T_{out} อุณหภูมิที่ทางออกเครื่องย่นต์เทอร์โมอะคูสติค

V_{out} ความเร็วลมที่ทางออกเครื่องย่นต์เทอร์โมอะคูสติค

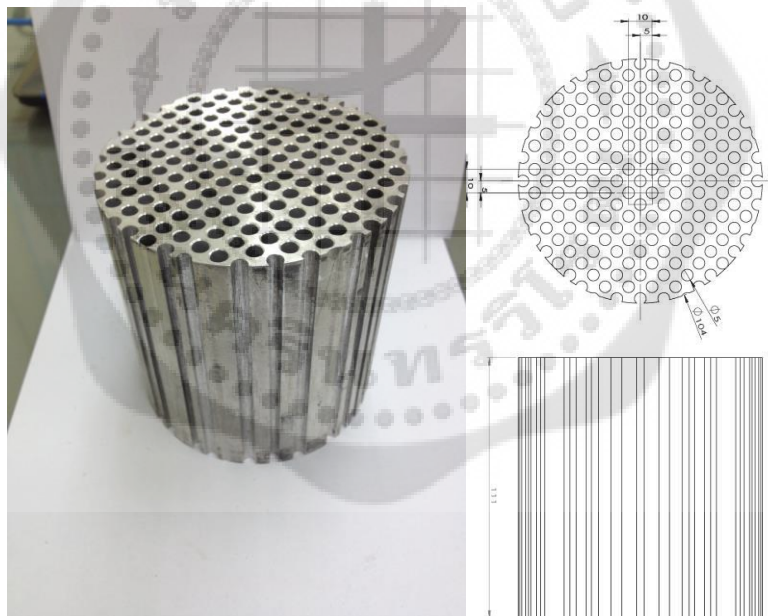
บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

1. การศึกษาความเป็นไปได้ในการรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีรูปแบบต่าง ๆ

หลังจากการศึกษาพารามิเตอร์ในการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด และติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ โดยใช้แหล่งให้พลังงานเป็นฮีตเตอร์ 2000 W ให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 300 °C ในช่วงแรกผู้วิจัยได้มีการสุ่มตัวอย่างของลักษณะรูปทรงของรีเจนเนอเรเตอร์มีดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 ลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ กำหนดเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ง่าย โดยสร้างเป็นรูปทรงเรขาคณิต โดยทำเป็นทรงกระบอกเจาะรูขนาด 5 mm วัสดุเป็นอลูมิเนียม (ราคาถูกกว่าวัสดุประเภทอื่น จึงนำมาทำเป็นวัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ตัวอย่างแรก) โดยเครื่องจักร CNC ในการขึ้นรูปและเจาะ ดังภาพประกอบ 27 เมื่อทดสอบแล้วพบว่าเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกไม่ทำงาน เนื่องจากไม่เกิดปรากฏการณ์เรอร์โมอะคูสติก



ภาพประกอบ 27 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเจาะรูขนาด 5 mm

ตัวอย่างที่ 2 ลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh (ตา/นิ้ว) ตัดเป็นแผ่นหน้ากว้าง 111 mm ม้วน คล้ายกันหอย (เป็นวัสดุที่หาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด) ดังภาพประกอบ 28 เมื่อทดสอบแล้วพบว่าเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกไม่ทำงาน เนื่องจากไม่เกิดปรากฏการณ์เรอร์โมอะคูสติก



ภาพประกอบ 28 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh ม้วนคล้ายกันหอย

ตัวอย่างที่ 3 ลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh ตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104 mm ใส่ภาชนะทรงกระบอก ดังภาพประกอบ 29 เมื่อทดสอบแล้วพบว่าเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกไม่ทำงาน เนื่องจากไม่เกิดปรากฏการณ์เรอร์โมอะคูสติก



ภาพประกอบ 29 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh ตัดเป็นวงกลม

ตัวอย่างที่ 4 ลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh ตัดเป็นเศษเล็กๆ ใส่ภาชนะทรงกระบอก ดังภาพประกอบ 30 เมื่อทดสอบแล้วพบว่าเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกไม่ทำงาน เนื่องจากไม่เกิดปรากฏการณ์เรอร์โมอะคูสติก



ภาพประกอบ 30 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ตะแกรงทองเหลือง 80 mesh ตัดเป็นเศษเล็กๆ

ตัวอย่างที่ 5 ลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ ทองเหลืองที่ได้เศษที่เหลือจากการกลึง ใส่ภาชนะทรงกระบอก ดังภาพประกอบ 31 เมื่อทดสอบแล้วพบว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกไม่ทำงาน เนื่องจากไม่เกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก



ภาพประกอบ 31 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ ทองเหลืองที่ได้เศษที่เหลือจากการกลึง

ตัวอย่างที่ 6 ลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ อลูมิเนียมหนา 0.05 mm ตัดเป็นเส้นขนาดความกว้างประมาณ 2-3 mm ใส่ภาชนะทรงกระบอกเปอร์เซ็นต์ช่องว่างประมาณ 98 % ดังภาพประกอบ 32 เมื่อทดสอบแล้วพบว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกทำงาน เนื่องจากพบการเคลื่อนตัวของอากาศที่ทางออกของเครื่องยนต์และเกิดเสียงตามปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก



ภาพประกอบ 32 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ อลูมิเนียมตัดเป็นเส้นขนาดประมาณความกว้าง 2- 3 mm

หลังจากทำการทดสอบซ้ำตามเปอร์เซ็นต์ช่องว่างในตัวอย่างที่ 6 ตามรูปแบบตัวอย่างที่ 2 – 4 เมื่อทดสอบแล้วพบว่าเครื่องยนต์เซอร์โมอะคัสติกไม่ทำงาน เนื่องจากไม่เกิดปรากฏการณ์เซอร์โมอะคัสติก เฉพาะรูปแบบการวางวัสดุที่ผลการการทำงานของเครื่องตามตัวอย่างที่ 6 เป็นการวางที่ซับซ้อน ทำให้การส่งเสริมคลื่นเสียงในท่อได้อย่างต่อเนื่องทำให้ปรากฏการณ์เซอร์โมอะคัสติก

ดังนั้นในการทดสอบผลของรูปแบบรีเจนเนอเรเตอร์ จึงเลือกรูปแบบรีเจนเนอเรเตอร์ตัวอย่างที่ 6 เพื่อการใช้งานโดยทำการเปลี่ยนแปลงความพรุนและวัสดุอีก 2 ชนิด ทองเหลืองและทองแดง ดังภาพประกอบ 33 ที่มีขนาดใกล้เคียงกันและทดสอบกับเครื่องยนต์เซอร์โมอะคัสติกตั้งภาพประกอบ 34 เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์เซอร์โมอะคัสติก โดยแบ่งการศึกษาได้ดังนี้

- ผลของชนิดโลหะที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงานของเครื่องยนต์เซอร์โมอะคัสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98%
- ผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อกำลังงานของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากอลูมิเนียม

2. ผลการทดลองของรีเจนเนอเรเตอร์

จากการทดสอบปรากฏว่าลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ที่สามารถทำงานได้ดีต้องมีขนาดที่บางและมีพื้นที่เล็ก เพื่อให้การทำงานตามวัฏจักรทางเซอร์โมอะคัสติกได้ดี ต้องเก็บความร้อนและคายความร้อนอย่างรวดเร็ว จึงเป็นลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ที่เหมาะสมต่อเครื่องยนต์เซอร์โมอะคัสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิดเครื่องนี้ โดยผลการทดสอบมีดังนี้

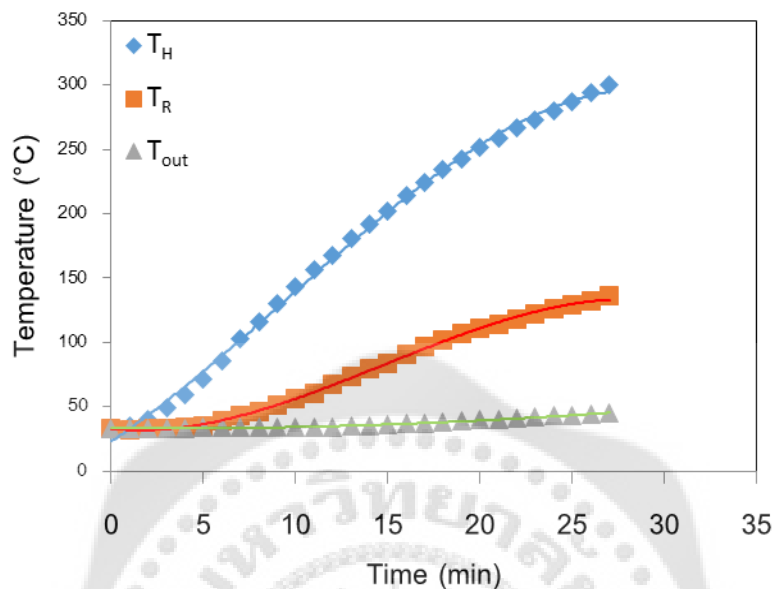


ภาพประกอบ 33 แสดงรีเจนเนอเรเตอร์ อะลูมิเนียม ทองเหลืองและทองแดง ตัดเป็นเส้น

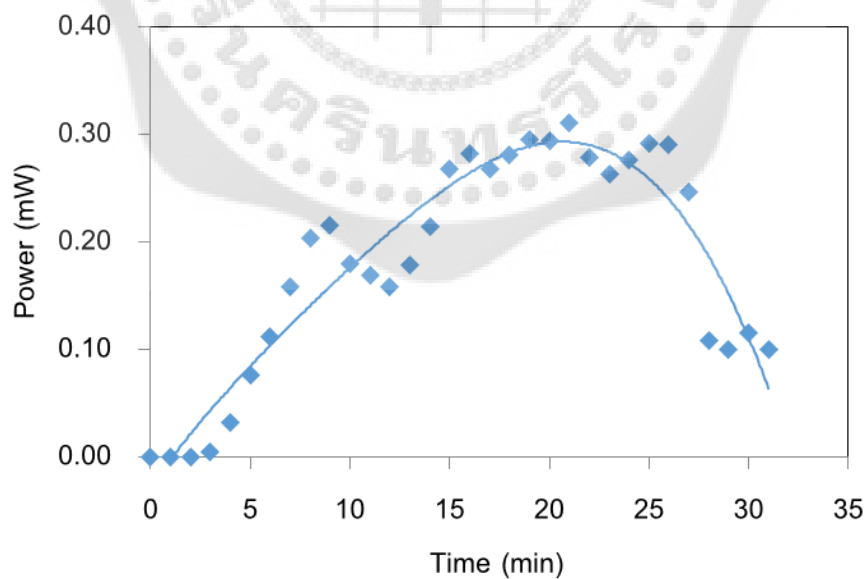


ภาพประกอบ 34 แสดงติดตั้งอุปกรณ์เครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติก

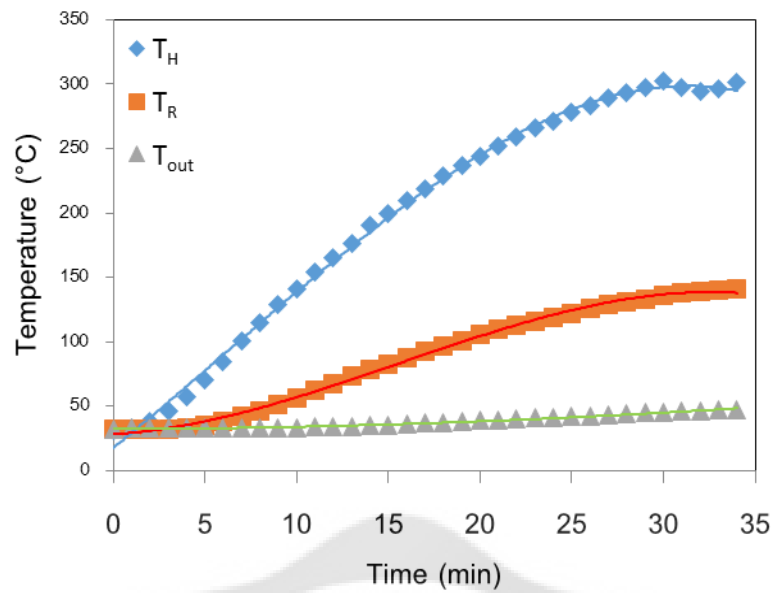
2.1 ผลของชนิดโลหะที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98%



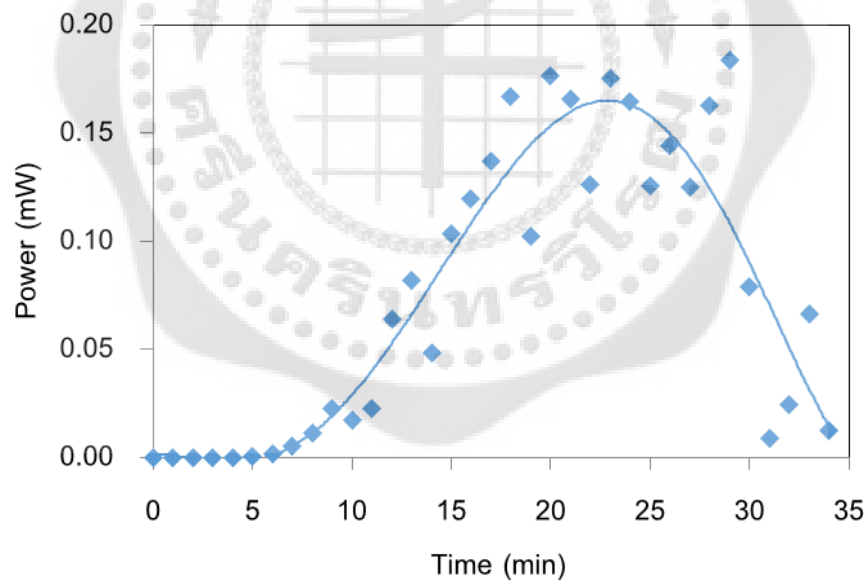
ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติค ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %



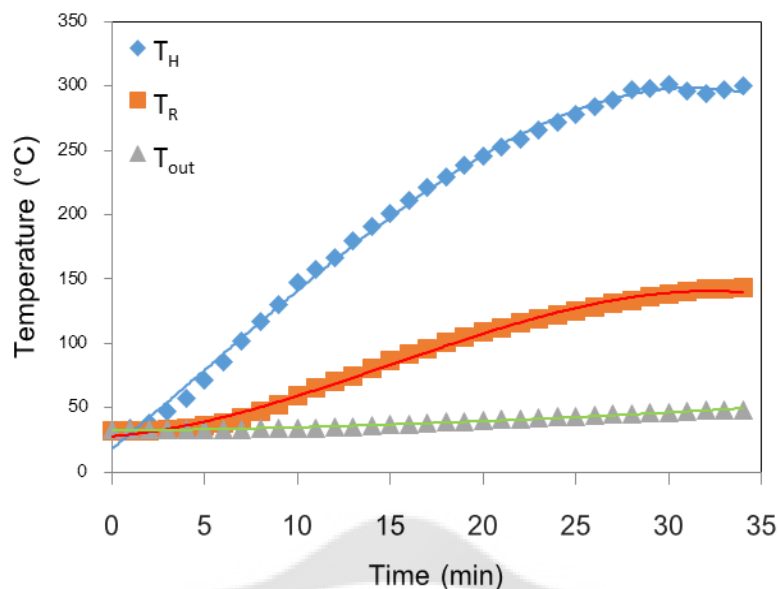
ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติค ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %



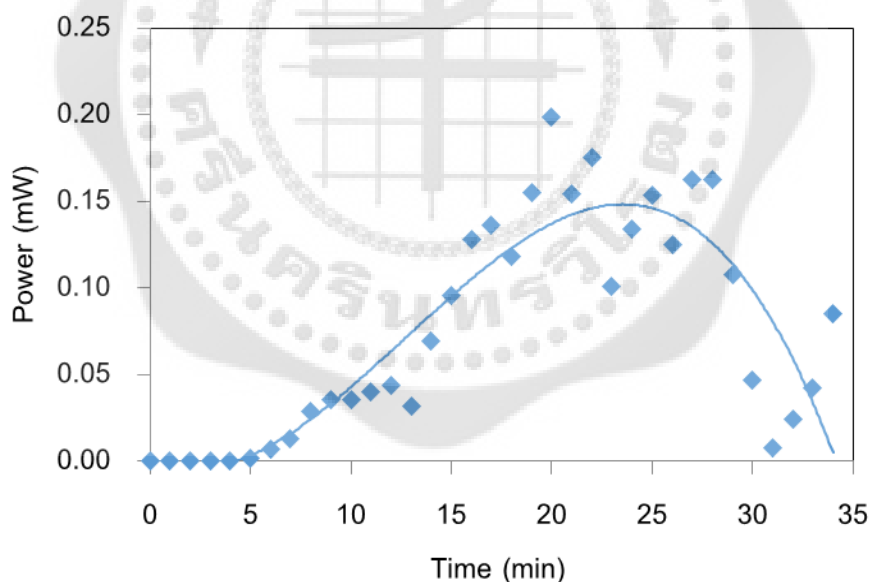
ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ทองเหลืองเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %



ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ทองเหลืองเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %



ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ ทองแดงเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %



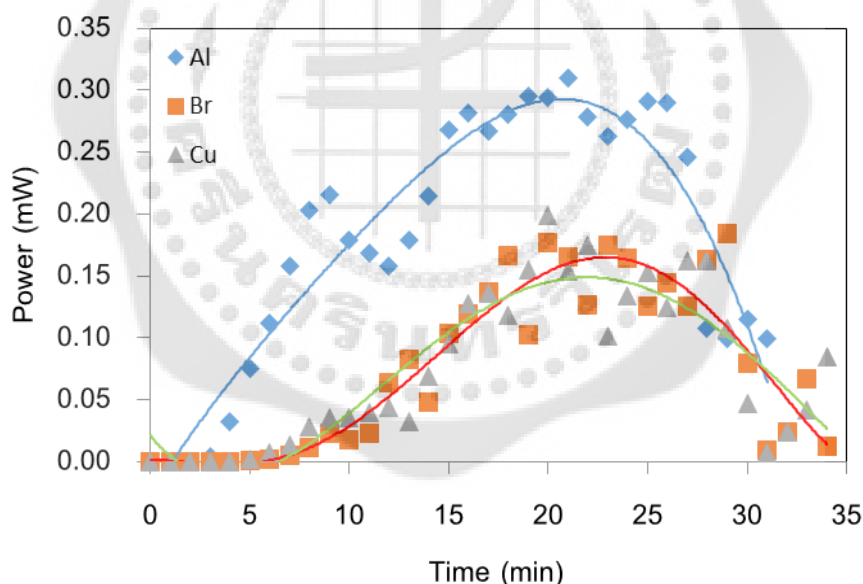
ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ทองแดงเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 %

จากภาพประกอบที่ 35 และ 36 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % เริ่มทำงานนาที่ที่ 4 T_H 49 °C, T_R 33 °C, T_{out} 33 , v_{out} 0.14 m/s กำลังที่ได้ 0.0045 mW กำลังสูงสุดนาที่ที่ 21 T_H 259 °C, T_R 114 °C, T_{out} 40 , v_{out} 0.58 m/s

กำลังที่ได้ 0.3100 mW และนาฬิกาที่ 31 T_H 301 °C, T_R 145 °C, T_{out} 47 °C, v_{out} 0.40 m/s กำลังที่ได้ 0.0993 mW

จากภาพประกอบที่ 37 และ 38 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ทองเหลืองที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % เริ่มทำงานนาฬิกาที่ 5 T_H 70 °C, T_R 35 °C, T_{out} 33 °C, v_{out} 0.06 m/s กำลังที่ได้ 0.0004 mW กำลังสูงสุดนาฬิกาที่ 29 T_H 297 °C, T_R 133 °C, T_{out} 45 °C, v_{out} 0.49 m/s กำลังที่ได้ 0.1838 mW และนาฬิกาที่ 34 T_H 301 °C, T_R 141 °C, T_{out} 47 °C, v_{out} 0.20 m/s กำลังที่ได้ 0.0124 mW

จากภาพประกอบที่ 39 และ 40 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ทองแดงที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % เริ่มทำงานนาฬิกาที่ 5 T_H 71 °C, T_R 36 °C, T_{out} 33 °C, v_{out} 0.10 m/s กำลังที่ได้ 0.0016 mW กำลังสูงสุดนาฬิกาที่ 20 T_H 246 °C, T_R 109 °C, T_{out} 40 °C, v_{out} 0.50 m/s กำลังที่ได้ 0.1986 mW และนาฬิกาที่ 34 T_H 300 °C, T_R 143 °C, T_{out} 48 °C, v_{out} 0.38 m/s กำลังที่ได้ 0.0849 mW



ภาพประกอบ 41 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียม ทองเหลืองและทองแดง ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 %

จากภาพประกอบ 41 เป็นการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม ทองเหลือง และทองแดงเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 98 % ซึ่งมีแนวโน้มคุณลักษณะการทำงานที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 โลหะที่มีคุณสมบัติความหนาแน่นต่ำและความจุความร้อนจำเพาะสูงได้แก่ อลูมิเนียม ซึ่งมีความสามารถในการเก็บและคายความร้อนสูงงานที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังงานกับโลหะอีกกลุ่ม พบว่ามีกำลังสูงกว่า

กลุ่มที่ 2 โลหะที่มีคุณสมบัติความหนาแน่นสูงและความจุความร้อนจำเพาะต่ำได้แก่ ทองเหลืองและทองแดง จะมีความสามารถในการเก็บและคายความร้อนต่ำ กำลังงานที่ได้เปรียบเทียบกับกำลังงานกับโลหะกลุ่มที่ 1 พบว่ามีกำลังต่ำกว่า

ตาราง 2 แสดงคุณสมบัติของโลหะที่ 20 °C

วัสดุ	ρ , (kg/m ³)	C_p , (kJ/kg.K)
	ความหนาแน่น	ความจุความร้อนจำเพาะ
อลูมิเนียม	2.70×10^3	0.896
ทองเหลือง	8.6×10^3	0.385
ทองแดง	8.9×10^3	0.381

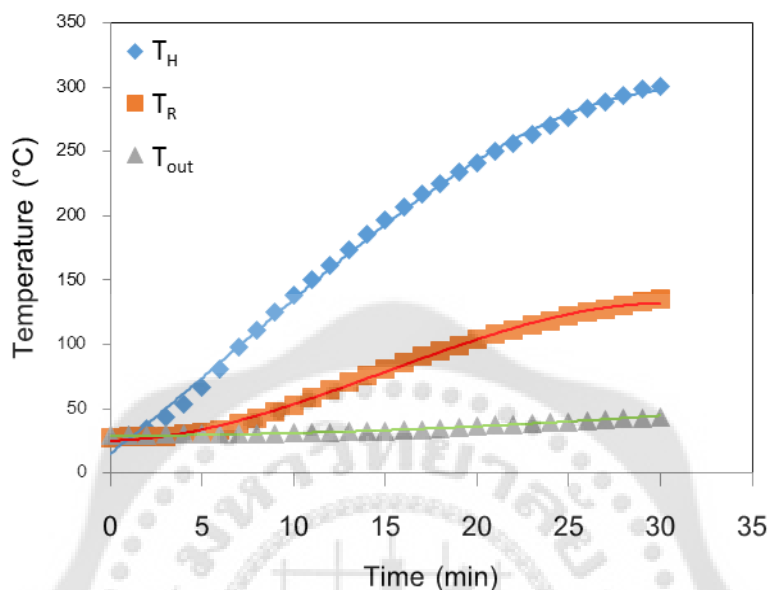
ที่มา <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/15/9/Fluid/density.htm>

จากการวิจัยทั้ง 3 วัสดุแล้ว จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นและความจุความร้อนจำเพาะมีอิทธิพลต่อการทำงานตามวัฏจักรทางเทอร์โมอะคูสติก คุณสมบัติของรีเจนเนอเรเตอร์ที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือต้องเก็บความร้อนและคายความร้อนอย่างรวดเร็ว อลูมิเนียมสามารถทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำและงานที่ได้สูง โดยมีค่าความจุความร้อนจำเพาะที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับทองเหลืองและทองแดง เหมาะสำหรับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้แหล่งพลังงานที่อุณหภูมิต่ำ อลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 660 °C ถ้าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้แหล่งพลังงานที่อุณหภูมิสูง ควรเลือกใช้ทองเหลืองหรือทองแดง โดยทองเหลืองจะมีจุดหลอมเหลวประมาณ 900 - 940 °C (ขึ้นอยู่กับส่วนผสม) ทองแดง จุดหลอมเหลวประมาณ 1,085 °C จากกราฟภาพประกอบ 38 เส้นแนวโน้มของทองเหลืองและทองแดงใกล้เคียงกัน แล้วแต่แหล่งให้พลังงานว่าสูงเท่าใด

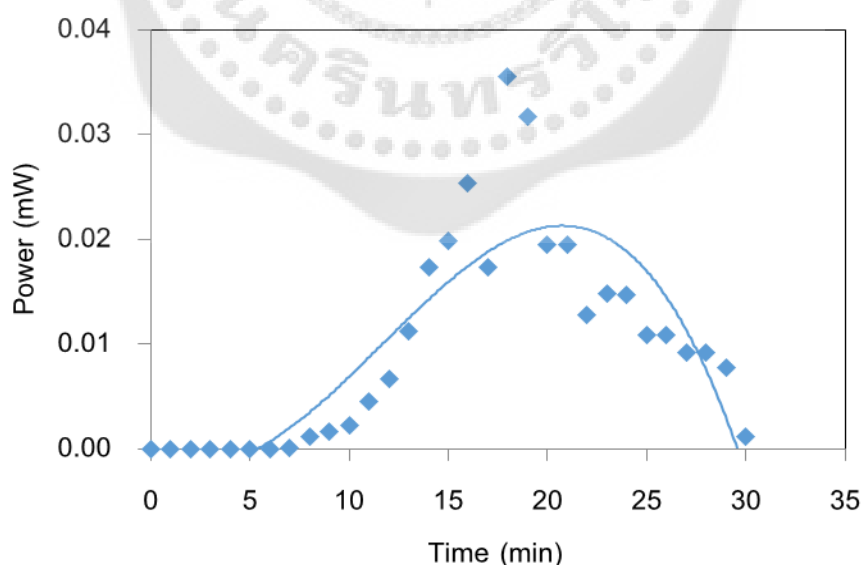
จากรีเจนเนอเรเตอร์ที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % ทดสอบเพิ่มอีก เปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 99 % วัสดุทั้ง 3 ประเภทไม่ทำงาน เปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 96.5 % อลูมิเนียมทำงาน ส่วนทองเหลืองและทองแดงไม่ทำงาน และ 95 % อลูมิเนียมทำงาน ส่วนทองเหลืองและทองแดงไม่ทำงาน เปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 94 % ทั้ง 3 วัสดุ ไม่ทำงาน

2.2 ผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อกำลังของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากอลูมิเนียม

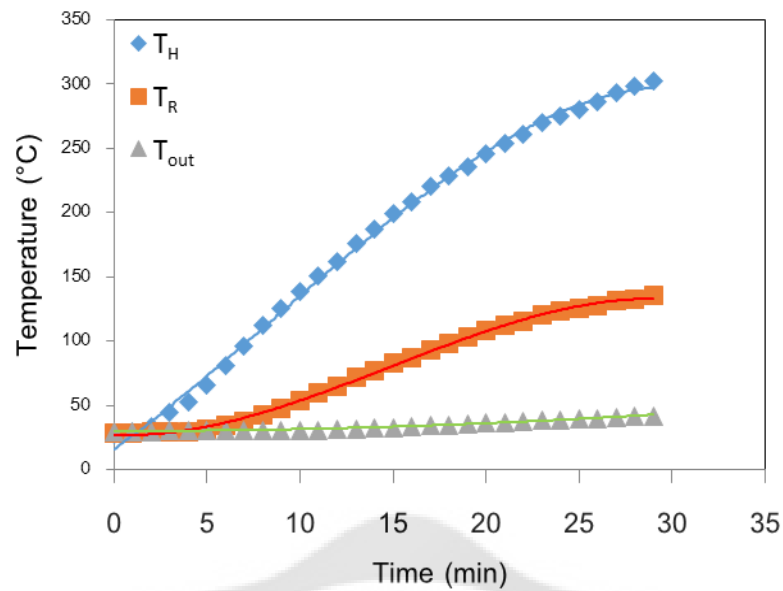
เพื่อทดสอบผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ซึ่งทำการทดสอบการทำงาน โดยใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์อีก 2 ระดับ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างคือที่ เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 96.5 % และ 95 % ผลการทดสอบมีดังนี้



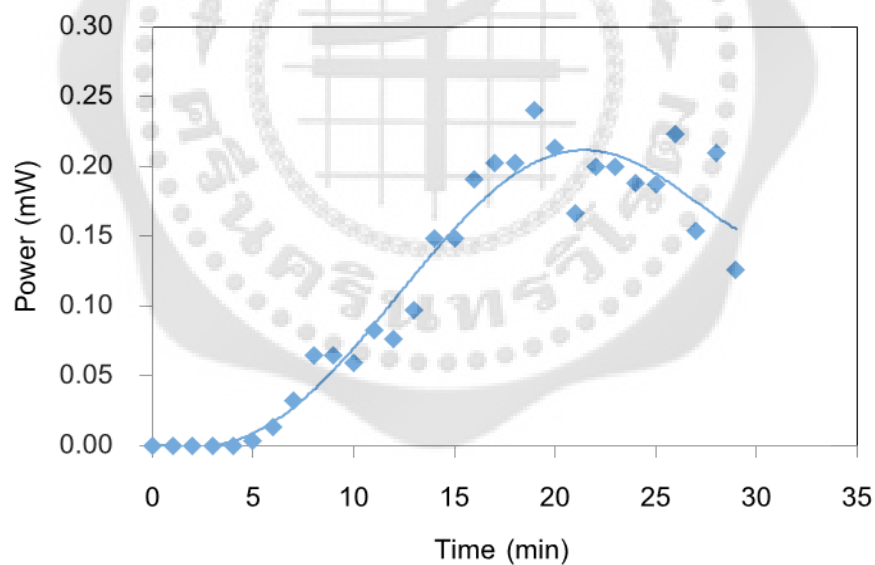
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 95 %



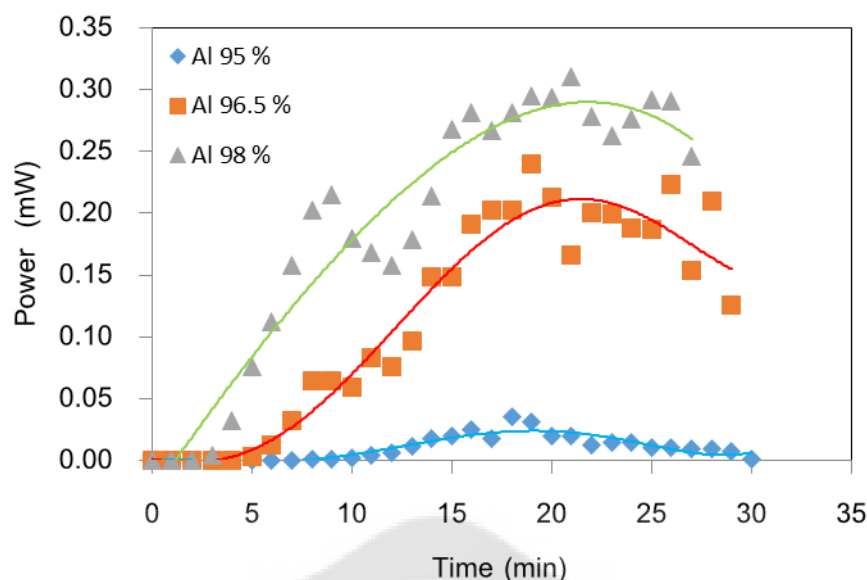
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 95 %



ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 96.5%



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 96.5 %



ภาพประกอบ 46 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 95 % 96.5% และ 98 %

จากภาพประกอบที่ 42 และ 43 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 95 % เริ่มทำงานนาที่ที่ 7 T_H 98 °C, T_R 39 °C, T_{out} 30 °C, v_{out} 0.04 m/s กำลังที่ได้ 0.0001 mW กำลังสูงสุดนาที่ที่ 18 T_H 225 °C, T_R 95 °C, T_{out} 35 °C, v_{out} 0.28 m/s กำลังที่ได้ 0.0355 mW และนาที่ที่ 30 T_H 301 °C, T_R 135 °C, T_{out} 44 °C, v_{out} 0.09 m/s กำลังที่ได้ 0.0011 mW

จากภาพประกอบที่ 44 และ 45 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 96.5 % เริ่มทำงานนาที่ที่ 5 T_H 66 °C, T_R 32 °C, T_{out} 31 °C, v_{out} 0.13 m/s กำลังที่ได้ 0.0036 mW กำลังสูงสุดนาที่ที่ 19 T_H 236 °C, T_R 103 °C, T_{out} 36 °C, v_{out} 0.53 m/s กำลังที่ได้ 0.2398 mW และนาที่ที่ 29 T_H 302 °C, T_R 136 °C, T_{out} 42 °C, v_{out} 0.43 m/s กำลังที่ได้ 0.1255 mW

จากภาพประกอบที่ 46 เป็นการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 95 %, 96.5 % และ 98 % เป็นการเปรียบเทียบงานทั้ง 3 ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง จะเห็นได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % เหมาะสมสำหรับใช้งานในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิดของเครื่องนี้

เมื่อเวลาผ่านไปโดยใช้แหล่งให้พลังงานเป็นฮีตเตอร์ 2000 W ให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 300 °C เมื่อถึงที่อุณหภูมิ 300 °C มีการควบคุมอุณหภูมิ จึงทำให้บาง

ช่วงไม่มีการป้อนพลังงานเข้าไปในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ทำให้พลังงานลดลงตามระดับ อีกประการหนึ่ง จากการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิแกรเดียนท์ ของรีเจนเนอเรเตอร์ในช่วงแรกจะมีค่า อุณหภูมิที่แตกต่างกันมากและไม่มีการสะสมความร้อนในโลหะ จึงทำให้เครื่องทำงานได้ในอุณหภูมิ ที่ต่ำ เวลาผ่านไปคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์ คือสามารถสะสมความร้อนในโลหะ สำหรับทำรีเจนเนอเรเตอร์ เมื่อมีการระบายร้อนที่เท่าเดิม จึงทำให้รีเจนเนอเรเตอร์มีความร้อนขึ้น อุณหภูมิแกรเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์แตกต่างกันลดลงทำให้กำลังลดลงไปด้วย ดังสถานะที่ 3 เมื่ออุณหภูมิแกรเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับพาร์เซล สถานะที่ปลายด้านหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์ ร้อนโดยที่ปลายอีกข้างหนึ่งเย็น ถ้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิที่ไม่เพียงพอ อุณหภูมิแกรเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์ เริ่มเท่ากับอุณหภูมิแกรเดียนท์ของพาร์เซล จะลงกำลังงาน ลงและที่น้อยลงพลังงานไหลเข้าหรือไหลออกเวลาผ่านไปเครื่องก็หยุดการทำงาน



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาและทดสอบผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปทรงวัสดุ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างและชนิดของวัสดุ ทองแดง ทองเหลือง และ อลูมิเนียม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณสมบัติวัสดุที่ทำรีเจนเนอเรเตอร์ มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด โดยความหนาแน่นและความจุความร้อนจำเพาะ ของอลูมิเนียมสามารถทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำและสมรรถนะที่ได้สูง โดยมีค่าความจุความร้อนจำเพาะที่มากกว่า ความหนาแน่นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับทองเหลืองและทองแดง

2. รีเจนเนอเรเตอร์ ที่มาทดสอบมี 3 วัสดุ แต่เมื่อแยกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีความหนาแน่นต่ำและความจุความร้อนจำเพาะสูง คืออลูมิเนียมให้สมรรถนะที่สูง อีกกลุ่มความหนาแน่นสูงและความจุความร้อนจำเพาะต่ำ คือ ทองแดง ทองเหลืองให้สมรรถนะรองลงมา สามารถเขียนเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3

ตาราง 3 สรุปคุณลักษณะรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีต่อเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

วัสดุ	ความหนาแน่น	ความจุความร้อนจำเพาะ	พลังงานความร้อน	สมรรถนะ
อลูมิเนียม	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง
ทองเหลือง	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ทองแดง	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ

3. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด ยังมีค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่มากในที่นี่สามารถทำได้สูงสุดที่ 98 % มีสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่สูง

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ในประเทศไทยโดยเฉพาะการพัฒนาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการยังมีน้อย ทำให้ขาดองค์ความรู้ในการพัฒนางานวิจัยเชิงวิชาการเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ โดยเฉพาะด้านเครื่องยนต์จากหลักการเทอร์โมอะคูสติก โดยใช้พลังงานทดแทนเป็นแหล่งพลังงาน และที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งคือ กลไกของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีความซับซ้อนไม่มาก ส่งผลให้ต้นทุนในการสร้างต่ำเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหว โดยองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาไปสู่เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกดังนี้

1. ถ้าศึกษาพารามิเตอร์ในการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิดขนาดเดิม เพียงเพิ่มระบบระบายความร้อนที่เพียงพอกับรีเจนเนอเรเตอร์ และให้พลังงานความร้อนระหว่าง $220 - 250^{\circ}\text{C}$ สมรรถนะของเครื่องจะดีขึ้น
2. เมื่อศึกษาพารามิเตอร์ในการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบปิดที่ให้สมรรถนะของเครื่องสูงกว่าแบบเปิด ก็สามารถใช้อรีเจนเนอเรเตอร์ที่เหมาะสมต่อเครื่องที่ได้
3. หลังจากได้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกสมรรถนะสูงและใช้พลังงานต่ำ สามารถพัฒนาใช้พลังสะอาดได้อาทิ พลังงานดวงอาทิตย์



บรรณานุกรม

- สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ; ปุณยศ วลลิกุล; และ สุวัฒน์ กุลชนปรีดา. (2547). การศึกษาเชิงทดลองการ
 ทำความเข้าใจแบบเทอร์โมอะคูสติก, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง
 ประเทศไทยครั้งที่ 18.
- สุรเดช ศรีคำ; ไพรพนา วรจักร; และ อัครเมธ ท้องคง (2547). การศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก
 ด้วยวิธีเชิงการทดลอง,โครงการงานวิศวกรรม, คณะ วิศวกรรมศาสตร์,วิทยาลัยเทคโนโลยี
 ธนบุรี
- สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ, ปุณยศ วลลิกุล และสุวัฒน์ กุลชนปรีดา. (2549). การออกแบบและวิเคราะห์
 การทำงานระบบทำความเข้าใจแบบเทอร์โมอะคูสติก, ใน การประชุมวิชาการเครือข่าย
 วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20.
- บัญชา คังตระกูล (2551). เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก: การศึกษาหลักการทำงานและพารามิเตอร์ใน
 การออกแบบ, วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี,ปีที่ 2, ฉบับที่ 1, หน้า 24-28.
- สกล วิฐกรกิจ (2551). การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.วิทยานิพนธ์สาขาวิทยา
 ศาสตร์ศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
- สุรัชย์ ทรัพย์เพิ่ม; วรณัฐ แจ่มสว่าง; และ นพพล มิ่งเมือง. (2552). การศึกษาเชิงการทดลองการทำ
 ความเย็นด้วยคลื่นเสียง, โครงการจัดประชุมวิชาการเพื่อนำเสนอผลงานวิจัยระดับ
 บัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 15
- อิศเรศ ชุขกัลยา. (2555). การศึกษาทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่ง,วารสารวิจัยและ
 พัฒนา มจร ปีที่ 35 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2555.
- Lord Rayleigh. (1878). The explanation of certain acoustical phenomena. *Nature*, Vol. 18,
 pp. 319-321.
- Feldman KT. (1968). Review of the literature on Rijke thermoacoustic phenomena. *J. Sound
 Vib.*, Vol. 7, pp. 71-82.
- Rott N. (1969) Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes.
 Z. Agnew. Math. Phys., Vol. 20, pp. 230-243.
- Ceperley PH. (1979). A pistoless Stirling engine-The traveling wave heat engine. *J. Acoust.
 Soc. Am.*, Vol. 66, pp. 1508-1513.
- Urieli I; Berchowitz DM. (1984). *Stirling Cycle Engine Analysis*. Bristol: Adam Hilger.
- Zinn B. (1986). Pulsating combustion. In Weinberg FL, editor, *Advanced Combustion
 Methods*, London: Academic, pp. 113-181.
- Swift, G.W. (1988). Thermoacoustics engine. *J. Acoust. Soc. Am.* 84 (4),pp. 1145-1180.
- Shuliang Zhou; & Yoichi Matsubara. (1988). Experimental research of thermoacoustic
 prime mover, *Cryogenics* 387,pp.813 – 822.

- S. Backhaus; & G. W. Swift. (2000). A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study. *J. Acous. Soc. Am.* 107 (6), June 2000.
- Swift, G.W. (2002). *Thermoacoustics: a Unifying Perspective for some Engines and Refrigerators*. Los Acoustical Society of American.
- Sungrel Choi; et al. (2004). Investigation on the pressure drop characteristics of cryocooler regenerators under oscillating flow and pulsating pressure conditions. *Cryogenics* 44. pp. 203-210
- David L.; et al. (2009). Waste-heat-driven thermoacoustic engine and refrigerator. *Proceeding of ACOUSTICS 2009*. 25-25 November 2009, Adelaide, Australia.
- Abdulrahman S. ; et al. (2011). Selection and experimental evaluation of low-cost porous materials for regenerator applications in thermoacoustic engine. *Materials and Design* 32. pp. 217-228.
- T. Biwa ;et al. (2001). Work flow measurements in a thermoacoustic engine. *Cryogenics* 41. pp. 305-310.
- Sakamoto; & Watanabe. (2004). The experimental studies of thermoacoustic cooler. *Ultrasonics* 42. pp. 53-56.
- Ryan Lampe. (2008). Design and Testing of Rapid Prototyped Dacks for Thermoacoustic Application. *Proceeding of The Nation Conference on Undergraduate Research (NCUR)*, Salisbury, Maryland, April 12-14,2008. pp. 1-8
- N.B.H.M. Abd Settar.(2008). Thermal Performance of A thermoacoustic Stack. Master Degree Thesis, University Technology Malaysia.
- S.H.Tasnim. (2011). Porous Media Thermoacoustic Stacks: Measurements and Models. Doctor of Philosophy Thesis, University of Waterloo,Ontario,Canada.
- Taekyung Ki; & Sangkwon Jeong. (2013). Design and analysis of highly effective pulse tube engine. *Applied Thermal Engineering* 53. pp. 31-36
- Shuliang Zhou; & Yoichi Matsubara. (1998). Experimental research of thermoacoustic prime mover. *Cryogenics* 387, pp. 813-822.
- Kang; et al. (2013). Design and analysis of highly effective pulse tube engine, *Applied Thermal Enginnering* 53, pp. 31-36.
- Huifang Kang; et al.(2013). Thermoacoustic travelling-wave cooler driven by cascade thermoacoustic engine. *Applied Thermal Engineering* 59, pp. 223-231.
- Abdulrahman S.; et al. (2009). Performance Studies of Travelling-wave Thermoacoustic

Engine for Selected Low-Cost Regenerators, Proceeding of the SEM Annual Conference, June 1-4, Albuquerque New Mexico USA. 2009.

Y. Ueda; et al. (2004). Experimental studies of a thermoacoustic Stirling prime mover and its application to a cooler, J. Acoust. Soc. Am 115 (3), March 2004. pp. 1134-1141.

W. V. Slaton. (2010). An open – air infrasonic thermoacoustic engine, Applied Acoustics 71, pp. 236-240.

http://www.sa.ac.th/winyoo/mechanicswave/wa_resonace.ht

<http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/15/9/Fluid/density.htm>







รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

L_s	=	ความยาวรีเจนเนอเรเตอร์	m
L	=	ความยาวท่อ	m
λ	=	ความยาวคลื่น	m
v	=	ความเร็วเสียงผ่านอากาศ	m/s
ω	=	ความกว้างคลื่น	m
f_n	=	ความถี่	Hz
n	=	เป็นเลขจำนวนเต็มบวก	
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ	m
γ	=	อัตราส่วนความจุความร้อน $\gamma = C_p / C_v$	
R	=	ค่าคงที่เฉพาะของก๊าซ	J/kg.K
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ	K
ε	=	ความพรุน	%
V_b	=	ปริมาตรรวม	m ³
V_s	=	ปริมาตรเนื้อของแข็ง	m ³
Q_{in}	=	พลังงานความร้อนที่เข้า	W
P	=	กำลังที่ได้	W
Q_{out}	=	พลังงานความร้อนที่ออก	W
η	=	ประสิทธิภาพเครื่องยนต์	
ρ	=	ความหนาแน่น	kg/m ³
A	=	พื้นที่ทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	m ²
C_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะ	kJ/kg.K
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/mK
T_H	=	อุณหภูมิที่ทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์	°C
T_R	=	อุณหภูมิที่ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์	°C
T_{out}	=	อุณหภูมิที่ทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	°C
v_{out}	=	ความเร็วลมที่ทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	°C



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

ความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิ 300 °C = 573.15 K จะได้

$$v = \sqrt{\gamma RT} = \sqrt{(1.4)(287.053 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}})(573.15\text{K})} = 479.931 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ความถี่ภายในท่อปลายด้ายหนึ่งเปิด จะได้

$$f_n = \frac{nv}{4\left(L + \frac{4d}{3\pi}\right)} = f_1 = \frac{(1)\left(479.931 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{4\left(1.1158\text{m} + \frac{4(0.104775\text{m})}{3\pi}\right)} = 103.410 \text{ Hz}$$

ความยาวคลื่นภายในท่อปลายด้ายหนึ่งเปิด จะได้

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{479.931 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{103.410\text{Hz}} = 4.641 \text{ m}$$

โดย Cao et.al ได้แนะนำความยาวของสแต็ก $L_s = 2.4\%$ of λ

$$L_s = 2.4\% \text{ of } \lambda = (4.641\text{m})(2.4\%) = 0.111 \text{ m}$$

โดย Tijani สแต็กควรออกแบบให้สั้นเท่าทำได้ $L_s \ll \lambda/2\pi$ เมื่อ

$$\frac{4.641\text{m}}{2\pi} = 0.739 \text{ m}$$

$$\therefore 0.111 \text{ m} \ll 0.739 \text{ m}$$

ความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์จะได้ 0.111 m หรือ 111 mm

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของวัสดุ

กำหนด เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง ที่ 95%, 96.5, 98%

ขนาดรีเจนเนอเรเตอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.104 m ยาว 0.111 m

จาก
$$\varepsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \times 100\%$$

$$V_b = \frac{\pi}{4} d^2 L = \frac{\pi}{4} (0.104)^2 (0.111) = 0.00094 \text{ m}^3$$

ที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 95%

$$V_s = V_b - \left(\frac{\varepsilon}{100\%} \right) V_b = 0.00094 - \left(\frac{95\%}{100\%} \right) 0.00094 = 0.000047 \text{ m}^3$$

ที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 96.5%

$$V_s = V_b - \left(\frac{\varepsilon}{100\%} \right) V_b = 0.00094 - \left(\frac{96.5\%}{100\%} \right) 0.00094 = 0.000033 \text{ m}^3$$

ที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98%

$$V_s = V_b - \left(\frac{\varepsilon}{100\%} \right) V_b = 0.00094 - \left(\frac{98\%}{100\%} \right) 0.00094 = 0.000019 \text{ m}^3$$

น้ำหนักอะลูมิเนียมที่เปอร์เซ็นต์ 95%จะได้

$$m_{Al} = \rho V_s = \left(2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.000047 \text{ m}^3) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) = 127.30 \text{ g}$$

ประเภท	ความหนาแน่น kg/m ³	เปอร์เซ็นต์ ช่องว่าง	V _b m ³	V _s m ³	น้ำหนัก g
อะลูมิเนียม	2700	95%	0.00094	0.000047	127.30
ทองเหลือง	8600				405.46
ทองแดง	8900				419.60
อะลูมิเนียม	2700	96.5%	0.00094	0.000033	89.11
ทองเหลือง	8600				283.82
ทองแดง	8900				293.72
อะลูมิเนียม	2700	98%	0.00094	0.000019	50.92
ทองเหลือง	8600				162.18
ทองแดง	8900				167.84

การทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสูบบรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อะลูมิเนียมที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % กำลัง T_H 259 °C, T_R 114 °C, T_{out} 40 °C, v_{out} 0.58 m/s กำลังจะได้

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_{out}^3$$

$$\text{ที่ } \rho @ T_{out} 40^\circ \text{C} = 1.124 \text{ kg/m}^3, A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} 0.06^2$$

$$P = \frac{1}{2} (1.124) \left(\frac{\pi}{4} 0.06^2 \right) (0.58^3) = 3.1 \times 10^{-4} \text{ W} = 0.31 \text{ mW}$$



ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเครื่องนั้รโมอะคัสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 %

วันที่บันทึก 12/05/2557									
อลูมิเนียม เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 %									
กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า		9	A	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า					
อุณหภูมิห้องทดสอบ		33	°C	RH	61%	220 V			
นาที่	T _H °C	T _R °C	T _{out} °C	V _{out} m/s	T _H - T _R °C	ρ kg/m ³	Q _{in} W	P mW	หมายเหตุ
0	33	33	33	0.00	0	1.15109	1980	0	
1	35	32	33	0.00	3	1.15109	1980	0	
2	40	33	33	0.00	7	1.15109	1980	0	
3	49	33	33	0.14	16	1.15109	1980	0.0045	
4	59	34	33	0.27	25	1.15109	1980	0.0320	
5	71	35	34	0.36	36	1.14716	1980	0.0757	
6	86	39	34	0.41	47	1.14716	1980	0.1118	
7	103	43	34	0.46	60	1.14716	1980	0.1579	
8	116	46	34	0.50	70	1.14716	1980	0.2027	
9	130	51	34	0.51	79	1.14716	1980	0.2151	
10	143	56	34	0.48	87	1.14716	1980	0.1794	
11	156	60	34	0.47	96	1.14716	1980	0.1684	
12	168	67	34	0.46	101	1.14716	1980	0.1579	
13	181	73	35	0.48	108	1.14325	1980	0.1787	
14	192	80	35	0.51	112	1.14325	1980	0.2144	

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์ลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % (ต่อ)

นาที	T_H °C	T_R °C	T_{out} °C	v_{out} m/s	$T_H - T_R$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P mW	หมายเหตุ
15	202	84	36	0.55	118	1.13936	1980	0.2680	
16	214	91	37	0.56	123	1.13549	1980	0.2819	
17	224	97	37	0.55	127	1.13549	1980	0.2671	
18	234	102	38	0.56	132	1.13164	1980	0.2810	
19	243	107	39	0.57	136	1.12781	1980	0.2953	
20	252	111	40	0.57	141	1.124	1980	0.2943	
21	259	114	40	0.58	145	1.124	1980	0.3100	
22	267	118	41	0.56	149	1.12021	1980	0.2781	
23	273	122	42	0.55	151	1.11644	1980	0.2626	
24	280	126	43	0.56	154	1.11269	1980	0.2762	
25	287	129	43	0.57	158	1.11269	1980	0.2913	
26	294	132	44	0.57	162	1.10896	1980	0.2903	
27	300	136	45	0.54	164	1.10525	1980	0.2460	
28	301	138	45	0.41	163	1.10525	1980	0.1077	
29	296	142	46	0.40	154	1.10156	1980	0.0997	
30	299	144	47	0.42	155	1.09789	1980	0.1150	
31	301	145	47	0.40	156	1.09789	1980	0.0993	

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเครื่องนั้รโมอะคัสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์ทองเหลืองเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 %

วันที่บันทึก 27/5/2557		18.13 น		ทองเหลือง เปอร์เซนต์ช่องว่าง 98%					
กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า		9	A	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า					
อุณหภูมิห้องทดสอบ		32	°C	RH	70%				
นาที่	T _H °C	T _R °C	T _{out} °C	V _{out} m/s	T _H -T _R °C	ρ kg/m ³	Q _{in} W	P mW	หมายเหตุ
0	32	32	32	0.00	0	1.15504	1980	0	
1	33	32	33	0.00	1	1.15109	1980	0	
2	38	32	33	0.00	6	1.15109	1980	0	
3	46	32	33	0.00	14	1.15109	1980	0	
4	57	33	33	0.00	24	1.15109	1980	0	
5	70	35	33	0.06	35	1.15109	1980	0.0004	
6	85	38	33	0.10	47	1.15109	1980	0.0016	
7	101	42	33	0.15	59	1.15109	1980	0.0055	
8	115	46	33	0.19	69	1.15109	1980	0.0112	
9	129	51	33	0.24	78	1.15109	1980	0.0225	
10	141	56	33	0.22	85	1.15109	1980	0.0173	
11	154	62	34	0.24	92	1.14716	1980	0.0224	
12	165	67	34	0.34	98	1.14716	1980	0.0637	
13	176	73	34	0.37	103	1.14716	1980	0.0821	
14	190	79	35	0.31	111	1.14325	1980	0.0481	

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์ทองเหลืองเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % (ต่อ)

นาที่	T_H °C	T_R °C	T_{out} °C	V_{out} m/s	$T_H - T_R$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P mW	หมายเหตุ
15	200	83	35	0.40	117	1.14325	1980	0.1034	
16	210	88	36	0.42	122	1.13936	1980	0.1193	
17	219	93	37	0.44	126	1.13549	1980	0.1367	
18	229	97	37	0.47	132	1.13549	1980	0.1667	
19	237	101	38	0.40	136	1.13164	1980	0.1024	
20	244	106	39	0.48	138	1.12781	1980	0.1763	
21	252	110	39	0.47	142	1.12781	1980	0.1655	
22	259	113	40	0.43	146	1.124	1980	0.1263	
23	266	116	41	0.48	150	1.12021	1980	0.1751	
24	271	119	41	0.47	152	1.12021	1980	0.1644	
25	278	122	42	0.43	156	1.11644	1980	0.1255	
26	283	126	42	0.45	157	1.11644	1980	0.1438	
27	289	129	43	0.43	160	1.11269	1980	0.1251	
28	293	131	44	0.47	162	1.10896	1980	0.1628	
29	297	133	45	0.49	164	1.10525	1980	0.1838	
30	302	136	45	0.37	166	1.10525	1980	0.0791	
31	297	138	46	0.18	159	1.10156	1980	0.0091	
32	294	139	46	0.25	155	1.10156	1980	0.0243	

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์ทองเหลืองเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % (ต่อ)

นาที่	T_H °C	T_R °C	T_{out} °C	V_{out} m/s	$T_H - T_R$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P mW	หมายเหตุ
33	296	140	47	0.35	156	1.09789	1980	0.0665	
34	301	141	47	0.20	160	1.09789	1980	0.0124	



ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเครื่องนั้รโอะคัสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์ทองแดงเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 %

วันที่บันทึก 2/6/2557		17.51 น		ทองแดง เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 %					
กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า		9	A	แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า				220	V
อุณหภูมิห้องทดสอบ		33	°C	RH	59%				
นาที่	T _H °C	T _R °C	T _{out} °C	V _{out} m/s	T _H -T _R °C	ρ kg/m ³	Q _{in} W	P mW	หมายเหตุ
0	32	32	33	0.00	0	1.15109	1980	0	
1	34	32	33	0.00	2	1.15109	1980	0	
2	38	32	33	0.00	6	1.15109	1980	0	
3	47	33	33	0.00	14	1.15109	1980	0	
4	57	34	33	0.00	23	1.15109	1980	0	
5	71	36	33	0.10	35	1.15109	1980	0.0016	
6	86	38	33	0.16	48	1.15109	1980	0.0067	
7	102	42	33	0.20	60	1.15109	1980	0.0130	
8	117	47	34	0.26	70	1.14716	1980	0.0285	
9	130	52	34	0.28	78	1.14716	1980	0.0356	
10	147	59	34	0.28	88	1.14716	1980	0.0356	
11	157	65	34	0.29	92	1.14716	1980	0.0396	
12	167	70	35	0.30	97	1.14325	1980	0.0436	
13	180	75	35	0.27	105	1.14325	1980	0.0318	
14	191	81	36	0.35	110	1.13936	1980	0.0691	

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์ทองแดงเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % (ต่อ)

นาที่	T_H °C	T_R °C	T_{out} °C	V_{out} m/s	$T_H - T_R$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P mW	หมายเหตุ
15	201	87	37	0.39	114	1.13549	1980	0.0952	
16	211	92	37	0.43	119	1.13549	1980	0.1276	
17	221	96	38	0.44	125	1.13164	1980	0.1363	
18	229	101	39	0.42	128	1.12781	1980	0.1181	
19	238	105	39	0.46	133	1.12781	1980	0.1552	
20	246	109	40	0.50	137	1.124	1980	0.1986	
21	253	112	41	0.46	141	1.12021	1980	0.1541	
22	259	116	41	0.48	143	1.12021	1980	0.1751	
23	266	119	42	0.40	147	1.11644	1980	0.1010	
24	272	122	43	0.44	150	1.11269	1980	0.1340	
25	278	125	43	0.46	153	1.11269	1980	0.1531	
26	284	128	44	0.43	156	1.10896	1980	0.1246	
27	289	131	45	0.47	158	1.10525	1980	0.1622	
28	297	133	45	0.47	164	1.10525	1980	0.1622	
29	298	136	46	0.41	162	1.10156	1980	0.1073	
30	301	138	46	0.31	163	1.10156	1980	0.0464	
31	296	140	47	0.17	156	1.09789	1980	0.0076	
32	294	142	48	0.25	152	1.09424	1980	0.0242	

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์ทองแดงเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 98 % (ต่อ)

หน้าที่	T_H °C	T_R °C	T_{out} °C	v_{out} m/s	$T_H - T_R$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P mW	หมายเหตุ
33	297	142	48	0.30	155	1.09424	1980	0.0418	
34	300	143	48	0.38	157	1.09424	1980	0.0849	

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 95 %

วันที่บันทึก 20/5/2557		17.45 น		อลูมิเนียม		เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 95 %			
กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า		9	A			แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า		220	V
อุณหภูมิห้องทดสอบ		29	°C	RH	54%				
นาที่	T _H °C	T _R °C	T _{out} °C	V _{out} m/s	T _H -T _R °C	ρ kg/m ³	Q _{in} W	P mW	หมายเหตุ
0	27	27	29	0.00	0	1.16701	1980	0	
1	29	28	29	0.00	1	1.16701	1980	0	
2	35	28	29	0.00	7	1.16701	1980	0	
3	44	28	30	0.00	16	1.163	1980	0	
4	54	30	30	0.00	24	1.163	1980	0	
5	67	31	30	0.00	36	1.163	1980	0	
6	81	34	30	0.00	47	1.163	1980	0	
7	98	39	30	0.04	59	1.163	1980	0.0001	
8	111	43	30	0.09	68	1.163	1980	0.0012	
9	125	48	30	0.10	77	1.163	1980	0.0016	
10	138	53	31	0.11	85	1.15901	1980	0.0022	
11	150	59	31	0.14	91	1.15901	1980	0.0045	
12	161	65	31	0.16	96	1.15901	1980	0.0067	
13	174	71	32	0.19	103	1.15504	1980	0.0112	
14	186	76	33	0.22	110	1.15109	1980	0.0173	

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเครื่องนั้รเฮอร์โมอะคัสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 95 % (ต่อ)

นาที่	T_H °C	T_R °C	T_{out} °C	V_{out} m/s	$T_H - T_R$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P mW	หมายเหตุ
15	197	81	33	0.23	116	1.15109	1980	0.0198	
16	207	86	34	0.25	121	1.14716	1980	0.0253	
17	217	91	34	0.22	126	1.14716	1980	0.0173	
18	225	95	35	0.28	130	1.14325	1980	0.0355	
19	234	99	36	0.27	135	1.13936	1980	0.0317	
20	241	104	37	0.23	137	1.13549	1980	0.0195	
21	250	108	38	0.23	142	1.13164	1980	0.0195	
22	256	111	38	0.20	145	1.13164	1980	0.0128	
23	263	115	39	0.21	148	1.12781	1980	0.0148	
24	270	118	40	0.21	152	1.124	1980	0.0147	
25	276	122	40	0.19	154	1.124	1980	0.0109	
26	283	125	41	0.19	158	1.12021	1980	0.0109	
27	288	127	42	0.18	161	1.11644	1980	0.0092	
28	293	130	43	0.18	163	1.11269	1980	0.0092	
29	299	133	43	0.17	166	1.11269	1980	0.0077	
30	301	135	44	0.09	166	1.10896	1980	0.0011	

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 96.5 %

วันที่บันทึก 23/5/2557		18.44 น		อลูมิเนียม		เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 96.5%			
กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า		9	A			แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า		220	V
อุณหภูมิห้องทดสอบ		30	°C	RH	71%				
นาที่	T _H °C	T _R °C	T _{out} °C	V _{out} m/s	T _H -T _R °C	ρ kg/m ³	Q _{in} W	P mW	หมายเหตุ
0	27	28	30	0.00	-1	1.163	1980	0	
1	29	28	30	0.00	1	1.163	1980	0	
2	34	29	30	0.00	5	1.163	1980	0	
3	45	29	31	0.00	16	1.15901	1980	0	
4	53	30	31	0.00	23	1.15901	1980	0	
5	66	32	31	0.13	34	1.15901	1980	0.0036	
6	81	35	31	0.20	46	1.15901	1980	0.0131	
7	96	38	31	0.27	58	1.15901	1980	0.0323	
8	112	43	31	0.34	69	1.15901	1980	0.0644	
9	125	48	31	0.34	77	1.15901	1980	0.0644	
10	139	54	31	0.33	85	1.15901	1980	0.0589	
11	151	60	31	0.37	91	1.15901	1980	0.0830	
12	162	65	32	0.36	97	1.15504	1980	0.0762	
13	176	72	32	0.39	104	1.15504	1980	0.0969	
14	187	77	33	0.45	110	1.15109	1980	0.1483	

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิด รีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 96.5 % (ต่อ)

นาที่	T_H °C	T_R °C	T_{out} °C	V_{out} m/s	$T_H - T_R$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P mW	หมายเหตุ
15	199	83	33	0.45	116	1.15109	1980	0.1483	
16	208	87	34	0.49	121	1.14716	1980	0.1908	
17	220	93	35	0.50	127	1.14325	1980	0.2020	
18	229	98	35	0.50	131	1.14325	1980	0.2020	
19	236	103	36	0.53	133	1.13936	1980	0.2398	
20	246	108	37	0.51	138	1.13549	1980	0.2129	
21	254	112	37	0.47	142	1.13549	1980	0.1667	
22	261	115	38	0.50	146	1.13164	1980	0.2000	
23	270	120	39	0.50	150	1.12781	1980	0.1993	
24	275	123	39	0.49	152	1.12781	1980	0.1876	
25	280	125	40	0.49	155	1.124	1980	0.1869	
26	286	128	40	0.52	158	1.124	1980	0.2234	
27	293	132	41	0.46	161	1.12021	1980	0.1541	
28	298	133	42	0.51	165	1.11644	1980	0.2094	
29	302	136	42	0.43	166	1.11644	1980	0.1255	



นิยามศัพท์เฉพาะ

เครื่องยนต์ฮอร์โมอะคูสติค เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอก ใช้คลื่นเสียงในการอัดและทำให้สารตัวกลางเคลื่อนที่ ใช้หลอดเสียง (Sound tube หรือ Resonator) หลอดหนึ่งเพื่อบรรจุสารตัวกลาง และขยายคลื่นเสียงโดยใช้อุปกรณ์พิเศษอีกชั้นหนึ่งเรียกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) หรือ Stack ร่วมกันเป็นเครื่องยนต์ความร้อน

ฮีตเตอร์ เป็นแหล่งป้อนพลังงานความร้อนให้เครื่องยนต์ฮอร์โมอะคูสติค อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ มวลชีวภาพ พลังงานชีวมวล ฯลฯ

รีเจนเนอเรเตอร์ หรือ สแต็ก เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการเกิดวัฏจักรการทำงานทางฮอร์โมอะคูสติค วัสดุที่ใช้เป็นโลหะเรียก รีเจนเนอเรเตอร์ ถ้าวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนเรียก สแต็ก

พาร์เซล เป็นพิจารณาลึกลงไปถึงอากาศที่อยู่ภายในรูเล็กๆส่วนหนึ่งที่อยู่ติดกับผิวรูเล็กๆภายในสแต็ก เลือกปริมาตรของอากาศส่วนหนึ่ง อากาศส่วนนี้ควรมีขนาดพอสมควรที่จะเป็นไปตามกฎทางอุณหพลศาสตร์

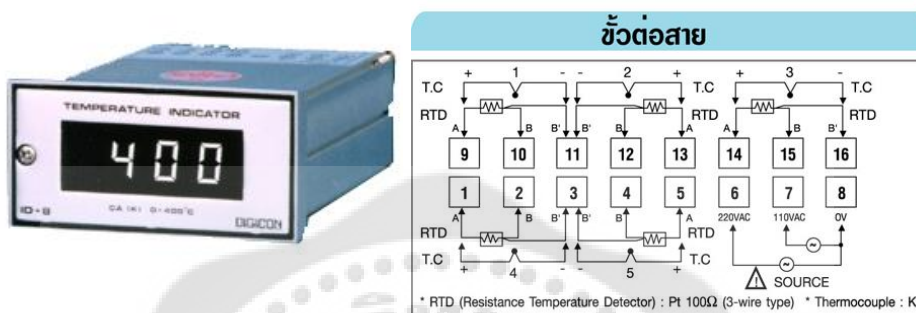


ภาคผนวก จ

รายละเอียดเครื่องมือใช้สำหรับวัดเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

รายละเอียดเครื่องมือใช้สำหรับวัดเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล DIGICON รุ่น ID8 และสวิตช์วัดอุณหภูมิแบบหลายจุด รุ่น TS-84HT สามารถปรับไป 4 จุด



รายละเอียด :

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลรุ่น ID8 สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 5 จุด หรือ สามารถต่อหัววัดอุณหภูมิได้ 5 อัน พร้อมกัน โดยสามารถเลือกหัววัดที่ต้องการให้แสดงผลได้ที่ตัวเครื่อง

- รับสัญญาณเข้าจากเทอร์โมคัปเปิ้ล หรือ RTD (ระบุเมื่อสั่งซื้อ)
- ปรับตั้งการแสดงผลได้ทั้งแบบอัตโนมัติ หรือ แบบ Manual
- ปรับการแสดงอัตโนมัติได้ตั้งแต่ 1-10 วินาที
- ขนาด DIN 96 x 48 มม.
- ความเที่ยงตรงสูงถึง 0.5%
- ใช้ไฟ 110/220VAC

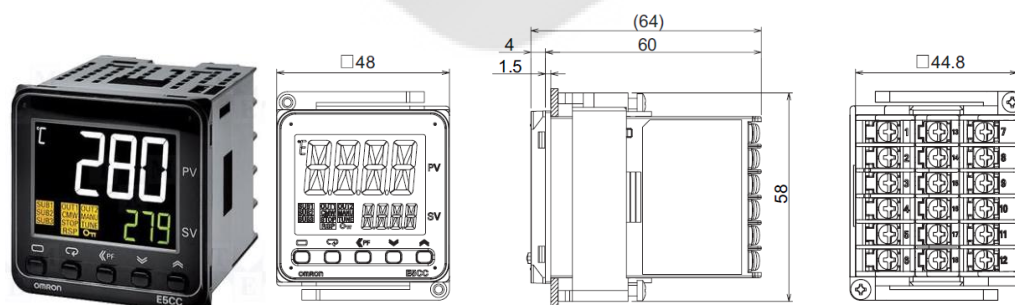
เครื่องวัดความเร็วลม testo 425 เป็นเครื่องมือวัดที่สามารถวัดได้ทั้งความเร็วลมและอุณหภูมิได้พร้อมกัน



รายละเอียด :

- เครื่องวัดค่าความเร็วลมและอุณหภูมิ
- ชนิดของหัววัดอุณหภูมิ แบบ NTC :ช่วงการวัดตั้งแต่ -20 ถึง +70 °C ค่าความถูกต้อง ± 0.5 °C (0 ถึง +60 °C) ± 0.7 °C (สำหรับช่วงการวัดที่เหลือ) ค่าความละเอียด 0.1 °C
- ชนิดของหัววัดความเร็วลมช่วงการวัดตั้งแต่ 0 ถึง +20 m/s ค่าความถูกต้อง $\pm (0.03 \text{ m/s} + 5\% \text{ of mv})$ ค่าความละเอียด 0.01 m/s
- อุณหภูมิสำหรับใช้งานของตัวเครื่อง ตั้งแต่ -20 ถึง +50 °C
- อุณหภูมิสำหรับเก็บตัวเครื่อง ตั้งแต่ -40 ถึง +85 °C
- สามารถแสดงค่าการวัดบนจอภาพ LCD 2 บรรทัดได้พร้อมกัน
- สามารถเปลี่ยนหน่วยการวัดได้ทั้ง °C, °F
- หัววัดสามารถปรับความยาวได้สูงสุด 820 มิลลิเมตร
- สามารถแสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดได้
- สามารถหาค่าเฉลี่ยต่อเวลาและค่าเฉลี่ยต่อจุดได้
- ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลด์ แมงกานีส
- ขนาดเครื่อง 182 x 64 x 40 มิลลิเมตร น้ำหนัก 285 กรัม

เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล OMRON รุ่น E5CC เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล OMRON รุ่น E5CC เป็นเครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัลขนาด 48 x 58 mm. จอแสดงผลค่าอุณหภูมิที่วัดได้และค่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุมเป็นแบบตัวเลขดิจิทัล มีฟังก์ชันเก็บค่าที่ใช้ในการควบคุมไว้ในหน่วยความจำ เพื่อสะดวกในการเลือกใช้งาน ควบคุมการทำงานด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ แบบชิปเดี่ยว สัญญาณขาออกโดยรีเลย์ คอนแทค : AC 220 V 1A, แรงดัน: DC 12 V



Operation Menu

Input Type

Input Type	Input	Setting	Setting range
Temperature	Platinum thermometer	PT100	0 to 2000 (°C) / 3200 to 3600 (°F)
		1	0.0 to 100.0 (°C) / 32.0 to 212.0 (°F)
		2	0.0 to 150.0 (°C) / 32.0 to 302.0 (°F)
		3	0.0 to 200.0 (°C) / 32.0 to 392.0 (°F)
		4	0.0 to 250.0 (°C) / 32.0 to 482.0 (°F)
		5	0.0 to 300.0 (°C) / 32.0 to 572.0 (°F)
		6	0.0 to 350.0 (°C) / 32.0 to 662.0 (°F)
		7	0.0 to 400.0 (°C) / 32.0 to 752.0 (°F)
		8	0.0 to 450.0 (°C) / 32.0 to 842.0 (°F)
		9	0.0 to 500.0 (°C) / 32.0 to 932.0 (°F)
Thermocouple	J	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	K	1	-200.0 to 500.0 (°C) / 32.0 to 932.0 (°F)
	E	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	T	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	N	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	L	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	U	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	R	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	S	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	B	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
Infrared	RL1	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL2	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL3	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL4	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL5	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL6	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL7	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL8	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL9	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
	RL10	1	-100.0 to 100.0 (°C) / 150.0 to 212.0 (°F)
Analog	Current input	4 to 20 mA	4 to 20 mA
	Voltage input	0 to 5 V	0 to 5 V
		0 to 10 V	0 to 10 V
		0 to 20 V	0 to 20 V
		0 to 30 V	0 to 30 V
		0 to 40 V	0 to 40 V
		0 to 50 V	0 to 50 V
		0 to 60 V	0 to 60 V
		0 to 70 V	0 to 70 V
		0 to 80 V	0 to 80 V

*The default is "S".
*SFP will be displayed when a platinum resistance thermometer is installed, connected while input type is not set to 4. To clear the SFP display, connect terminal and open the power supply.

Alarms

Setting	Alarm type	Alarm output function
0	No alarm function	Output off
1	Deviation upper limit	Output on
2	Deviation upper limit	Output on
3	Deviation lower limit	Output on
4	Deviation upper/lower range	Output on
5	Deviation upper limit	Output on
6	Deviation upper limit	Output on
7	Deviation lower limit	Output on
8	Absolute value upper limit	Output on
9	Absolute value lower limit	Output on
10	Absolute value upper limit	Output on
11	Absolute value lower limit	Output on
12	LB (only for alarm 1)	Output on
13	PV Charge Rate Alarm	Output on
14	SP absolute value upper limit	Output on
15	SP absolute value lower limit	Output on
16	SP absolute value upper limit	Output on
17	SP absolute value lower limit	Output on
18	SP absolute value upper limit	Output on
19	SP absolute value lower limit	Output on

*1: Upper and lower limits can be set for parameters 1, 4 and 5 to provide for different types of alarm. These are indicated by the letter "U" and "L".
*The default alarm type is "2".

Conformance to EN/IEC Standards

Conformance to Safety Standards

Reinforced insulation is provided between power supply, relay outputs, and between other terminals.

Initial Setting Level

(Operation stopped, Control alarm is both stopped.)

$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$

*The default is "S".
*SFP will be displayed when a platinum resistance thermometer is installed, connected while input type is not set to 4. To clear the SFP display, connect terminal and open the power supply.

Conformance to EN/IEC Standards

Conformance to Safety Standards

Reinforced insulation is provided between power supply, relay outputs, and between other terminals.

Operation Level

(Operation stopped, Control alarm is both stopped.)

●Operation Level

	
	
(0) down at least second	
(1) down at least second	

*The default is "S".
*SFP will be displayed when a platinum resistance thermometer is installed, connected while input type is not set to 4. To clear the SFP display, connect terminal and open the power supply.

Conformance to EN/IEC Standards

Conformance to Safety Standards

Reinforced insulation is provided between power supply, relay outputs, and between other terminals.

Adjustment Level

(Operation stopped, Control alarm is both stopped.)

 Temperature (less than second)	 ADJ Adjustment Level Choose the adjustment level when using RTD.	 SP-3 spn3
	 RL Resistor Current Value Monitor (spn A) *7	 SP-4 spn4
	 RLML Communications Writing	 SP-5 spn5
	 SP Resistor Current Value Monitor (spn A) *7	 SP-6 spn6
	 EC Resistor Current Value Monitor (spn A) *7	 SP-7 spn7
	 H2 Resistor Current Value Monitor (spn A) *7	 LMS Program Value Input
	 EC2 Resistor Current Value Monitor (spn A) *7	 LNP Process Value Input
	 H2C Resistor Current Value Monitor (spn A) *7	 HSS Resistor Value Input
	 L Leakage Current Value Monitor (spn A) *7	 ID ID Input
	 HS HSd Item 2 (spn A) *7	 P Proportional Gain
 LCP2 Leakage Current Value Monitor (spn A) *7	 P3 Integral Time	
 HS2 HSd Item 2 (spn A) *7	 d Derivative Time (spn A) *7	
 SP-D spnD	 L-P Derivative Time (spn A) *7	
 SP-E spnE	 L-E Derivative Time (spn A) *7	
 SP-F spnF	 L-F Derivative Time (spn A) *7	

● **Error Display (troubleshooting)**

When an error has occurred, the No.1 display shows the error code accompanied by the error code, reflecting the Label setting.

No.1 display	Meaning	Action
C	EEPROM	Check the setting of the label type.

*The default is "S".
*SFP will be displayed when a platinum resistance thermometer is installed, connected while input type is not set to 4. To clear the SFP display, connect terminal and open the power supply.

Conformance to EN/IEC Standards

Conformance to Safety Standards

Reinforced insulation is provided between power supply, relay outputs, and between other terminals.

Error Display (troubleshooting)

(Operation stopped, Control alarm is both stopped.)

No. display	Meaning	Action
SFP	Input error	Check the input wiring and the input type setting.
E11	Memory error	Turn the power OFF then back ON again. If the display repeats the error, the controller must be replaced. The display is related to normal operation and cannot be external noise affecting the control system. Check for external noise.

If the input value exceeds the display limit (1999 to 9999), though it is within the control range, E11 will be displayed until 1999 and E12 will be displayed until 9999. Under these conditions, control output and alarm output will operate normally. Refer to the ESCSEC Digital Controllers User's Manual (Cat. No. H74) for the controller range.

*Error shown only for "Process value / Set point". Not shown for other status.

OMRON EUROPE B.V.

Postbus 1818, NL-2120 JD Hoofddorp The Netherlands

Phone: 31-2356-81-300

FAX: 31-2356-81-388

OMRON ELECTRONICS LLC

One Commerce Drive Schaumburg, IL 60193-5302 U.S.A.

Phone: 1-847-843-7900

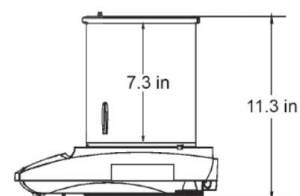
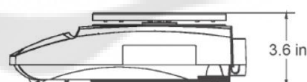
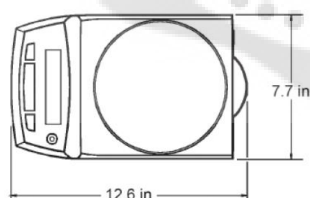
FAX: 1-847-843-7787

OMRON ASIA PACIFIC PTE. LTD.

สายเทอร์โมคัปเปิล Type K ตามมาตรฐาน JIS C 1610 – 1981

Inter- national IEC 584-3	Inter- national IEC 584-3 Intrinsically Safe	USA Canada ANSI	Czech British BS 1843	German Nether- lands DIN 43710	Japanese JIS C 1610-1981	French NFC 42-324	Type	Comments Environment - Bare Wire	Alloy Combination		Maximum Temperature Useful Range	EMF (mV) Over Max. Temperature Range	Limits of Error (Whichever is Greater)	
									+ Lead	- Lead			Standard	Special
							K	Clean Oxidising and Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Wide Temperature range most popular calibration	Nickel - Chromium Ni-Cr	Nickel- Aluminium Ni-Al (magnetic)	-200 to 1250°C Therm. Grade 0 to 200°C Ext. Grade	-6.458 to 54.886	-200 to 1250°C 2.2°C or 0.75% above 0°C 2.0% below 0°C	
							J	Reducing, Vacuum, Inert. Limited Use in Oxidising at high Temperatures not recom- mended for low Temperatures	± Fe (magnetic)	Copper- Nickel Cu-Ni	0 to 750°C Therm. Grade 0 to 200°C Ext. Grade	-8.095 to 69.553	0 to 750°C 2.2°C or 0.75% 1.1°C or 0.4%	
							S	Oxidising or Inert. Do not insert in metal tubes. Beware of Contamination. High Temperature	Platinum 10% Rhodium Pt-10% Rh	Platinum Pt	0 to 1450°C Therm. Grade 0 to 150°C Ext. Grade	-0.236 to 18.693	0 to 1450°C 1.5°C or 0.25% 0.6°C or 0.1%	
							T	Mild Oxidising, Reducing Vacuum or Inert. Good where moisture is present, low Temperature and cryogenic applications	Copper Cu	Copper- Nickel Cu-Ni	-200 to 350°C Therm. Grade -60 to 100°C Ext. Grade	-6.528 to 20.872	-200 to 1250°C 2.2°C or 0.75% above 0°C 2.0% below 0°C	
				No standard Use IEC 584-3 Color Codes			N	Alternative to Type K. More stable at high Temperatures	Omega-P Horsall Ni-Cr-Si	Omega-N Nial Ni-Si-Mg	-270 to 1300°C Therm. Grade 0 to 200°C Ext. Grade	-4.345 to 47.513	0 to 1450°C 2.2°C or 0.75% above 0°C 2.0% below 0°C	
							R	Oxidising or Inert. Do not insert in metal tubes. Beware of contamination. High Temperature	Platinum 13% Rhodium Pt-13% Rh	Platinum Pt	0 to 1450°C Therm. Grade 0 to 150°C Ext. Grade	-0.226 to 21.101	0 to 1450°C 1.5°C or 0.25% 0.6°C or 0.1%	
							E	Oxidising or Inert. Limited use in Vacuum or Reducing. Highest EMF change per degree	Chromega Nickel- Chromium Ni-Cr	Copper- Nickel Cu-Ni	-200 to 900°C Therm. Grade 0 to 200°C Ext. Grade	-9.835 to 76.373	-200 to 900°C 1.7°C or 0.5% above 0°C 1.0% below 0°C	
							B	Oxidising or Inert. Do not insert in metal tubes. Beware of contamination. High Tempe- rature. Common use in glass industry	Platinum 30% Rhodium Pt-30% Rh	Platinum 6% Rhodium Pt-6% Rh	0 to 1700°C Therm. Grade 0 to 100°C Ext. Grade	0 to 13.820	0 to 1700°C 0.5% above 800°C None established	

เครื่องชั่งดิจิตอล OHAUS รุ่น Pioneer (PA413) พิกัดน้ำหนัก 410 g ค่าละเอียด 0.001 g
แท่นชั่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 cm. จานชั่งเป็นสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm
สามารถอ่านค่าน้ำหนักจากการแขวนได้พร้อมตุ้กระจกใบใหญ่ป้องกันลม พร้อมช่องต่อสาย
RS232C







การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53 “Smart Agriculture “The future of Thailand”
ของ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระหว่างวันที่ 3-6 กุมภาพันธ์ 2558
ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
จัดโดย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53
The 53rd Kasetsart University Annual Conference
วันที่ 3 - 6 กุมภาพันธ์ 2558

สารนิพนธ์

Smart Agriculture "The future of Thailand"

72 ปี
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 Kasetsart University

ดูฉบับจริง การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53

คณะกรรมการฝ่ายจัดพิมพ์เอกสาร

ดร.นิรุช ภาชนะทิพย์
ที่ปรึกษา

นายปัญญา ชีอตรง
ประธานกรรมการ

นายพลวัฒน์ ตันหัน
รองประธานกรรมการ

นายจรูญศักดิ์ สอนสวรรค์
กรรมการ

นางสาวลิลลา วุฒิวนิชยกุล
กรรมการ

นางวัชรีย์ ทองทิพย์
กรรมการ

นางสาวจิราวรรณ สุริยกุล ณ อยุธยา
กรรมการ

นางสาวยลรวิวรร วิบุรณวงศ์
กรรมการ

นางสาวสุดธิดา มีสวัสดิ์
กรรมการ

นายวิทยา วงษ์เอี่ยม
กรรมการ

นางนฤมล อินตา
กรรมการ

นางสาวพัชกร กรวณยภาคณัช
กรรมการ

นางสาวธิดา จันทาพูน
กรรมการ

นางสาวสิริกัญญา มณีนิล
กรรมการ

นายภาณุวัฒน์ บุญชัยกมลอากร
กรรมการ

นางสาวปฐมมาตี กุลวัฒน์ไพศาล
กรรมการและเลขานุการ

นางสาวกฤษฎี ปรีวัตรกุล
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางปนัดดา ดีหะริง
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวธัญญ์นัฐดา กุณอก
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ



**ผู้ทรงคุณวุฒิภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์**

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร		1. รศ.ดร.ศิริ ชัยเสรี	
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์		2. รศ.ดร.อรรจน์ มุ่งเจริญ	
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์			
3. ผศ.ดร.พงศ์ธร พรหมบุตร	4. ผศ.ดร.อรรจน์ พุทธาพิทักษ์ผล	5. ผศ.ดร.ธเนศ อรุณศรีโสภณ	6. ผศ.ดร.ชวลิต กิตติชัยการ
7. ผศ.ดร.อภิชาติ แจงบำรุง	8. ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์		
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์			
9. ผศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี	10. ผศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์	11. ผศ.ดร.อภิชาติ โชติสังกา	12. ผศ.ดร.ทรงวุฒิ เสงี่ยมพรธานี
13. ผศ.ดร.วีระเกษมธร สอนมาก	14. ผศ.ดร.สุวิมล สังขวานิชย์	15. รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร	16. รศ.ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา
17. ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	18. รศ.ดร.สันติ ชินาวัฒน์วงศ์	19. ดร.จักรพันธ์ เทือกตะ	20. รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์			
21. รศ.ดร.เอกชัย ไพศาลกิตติสกุล	22. ดร.มิตี ฐานุรักษ์	23. ดร.เชาวลิต มิตรสันติสุข	24. รศ.ดร.มงคล รักษาพัชรวงค์
25. ดร.สัณชัย เดชานานาพุทธา	26. รศ.ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ	27. ผศ.ดร.สมหญิง ไทยนิมิต	28. ผศ.ดร.ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม
ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์		29. ดร.มนต์ชัย สุระรัตน์ชัย	
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์		30. รศ.ดร.จันทนา จันทราพรชัย	
ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์		31. รศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดากร	32. ผศ.ดร.สิตาณัฏ์ พิไลย์ล้ำ
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์			
33. ผศ.ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์	34. ผศ.ดร.นุชนภา ตั้งบริบูรณ์	35. ผศ.ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ	36. ผศ.ดร.ราชธีร เดชไพศาลเจริญกิจ
37. ผศ.ดร.อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล	38. ดร.ยุรพันธ์ หาญล้ำยง	39. ดร.ปริญญา ชากาจาโรดม	
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์			
40. รศ.ภัสราภรณ์ สุวรรณวิทยา	41. รศ.ดร.วิไล เจียมไชยศรี	42. ผศ.ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์	43. ผศ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์			
44. รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา	45. รศ.ดร.รุ่งรัตน์ ภัสยุพเพ็ญ	46. ดร.ปณณมี สังข์มงคล	47. ดร.สุวิกรมน์ วิชกุล
48. ผศ.ดร.จันทศิริ สิงห์เถื่อน	49. ผศ.ดร.ชนะ รักศิริ	50. รศ.ดร.พิรยทธิ์ ขาวเศรษฐิกุล	51. รศ.พิภพ ลีดาภรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน			
52. รศ.วิชา นันทน์ทาการ	53. รศ.ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์	54. ดร.วันรัฐ อับดุลลาฮาซิม	55. รศ.ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล
56. ดร.เอกชัย ศิริกิจพานิชย์กุล			
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน		57. ดร.ธนา ชีพลมทรง	
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์			
58. ศ.กักร กุลชล	59. รศ.เลศวิทย์ รังสิรักษ์	60. รศ.พาสินี สุนาก	61. ผศ.ดร.วันดี พินิจวรสิน
62. ผศ.ดร.ม.ล.วุฒิพงษ์ ทวีวงศ์	63. ผศ.ดร.ชนิกานต์ ยิ้มประยูร	64. ดร.โสภา วิเศษศักดิ์	65. ผศ.อรเมศ ตั้งกิจงามวงศ์
66. ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ	67. ดร.ศิริเดช สุริต	68. ดร.อาทิตย์ ลิ้มปิยากร	69. ดร.ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รังค์
70. ผศ.ธนาศรี สัมพันธ์รักษ์ เพ็ชรยิ้ม			

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1. รศ.ดร.สายประสิทธิ์ เกิดนิยม	2. รศ.ดร.จุฬาลักษณ์ คำไม้	3. รศ.ดร.พิเชษฐ์ อุดมวรรัตน์	4. ผศ.ดร.อิสรา ชัยกิตติรัตนนา
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์		5. รศ.ดร.ผศ.ดร.มรกต ระวีวรรณ	7. รศ.ดร.เกรียงไกร เดชกานนท์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย		8. รศ.ดร.นัยกานต์ มั่นสปียะ	10. รศ.ดร.สุพจน์ เดชวรสินสกุล
11. ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ	12. ศ.ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์	9. รศ.ดร.กิตติพัฒน์ สีมานนท์	14. ผศ.ดร.อรจรรย์ เศรษฐบุตร
15. ผศ.ดร.พีรศรี โพพาทอง		13. ดร.ปัญญาวัชร วัจยาว	
มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		16. ดร.วรวรรณ นาคะวิโร	17. ผศ.ดร.สุพักตรา สุทธสุภา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (คลองหก)		18. ดร.ระพี กาญจนะ	19. รศ.ดร.ฉัตรชัย วีระนิตติสกุล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี		20. ศ.ดร.สำเริง จักรใจ	21. ศ.ดร.สมชาย วงศ์พิเศษ
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่		22. รศ.ดร.วัสนีย์ วรธนัจฉริยา	23. ศ.ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
มหาวิทยาลัยศรีปทุม		24. รศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์	25. รศ.ดร.กิตติ ชะยะกุลศิริ
มหาวิทยาลัยศิลปากร		26. รศ.วีระ อินพันทัง	27. ผศ.ดร.สาธิต ศุภรัตน์เมธี
โรงพยาบาลสัตว์แพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์		28. น.สพ.ดร.ชัยกร จูติญาณพร	
มหาวิทยาลัยบูรพา		29. รศ.ดร.ธีรศักดิ์ ฤกษ์สมบูรณ์	30. รศ.ดร.ยิ่งสวัสดิ์ ไชยะกุล
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์		31. อ.รักพงศ์ สายแก้ว	32. ดร.นัยรัตน์ มณีเทศ
กรมทางหลวงชนบท			

5 กุมภาพันธ์ 2558 สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และ วิศวกรรมศาสตร์ ห้อง 205

13.20 – 13.40 น. การศึกษาเชิงทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ลูกแก้วเป็น
รีเจนเนอเรเตอร์ (สธ.วศ.62/O344)

โดย ปิยชาติ จันทรานนท์ และคณะ

13.40 – 14.00 น. การศึกษาผลกระทบของรีเจนเนอเรเตอร์ลูมิเนียมที่มีต่อ
เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่ง
เปิด (สธ.วศ.81/O380)

โดย ภูมิศักดิ์ ผดวาลัย และคณะ

14.00 – 14.20 น. การศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากระบบทำความเย็นแบบ
ลดหลั่นเพื่อใช้ในการผลิตน้ำร้อน (สธ.วศ.46/O305)

โดย ทิมาณ เณรแก้ว และคณะ

14.20 – 14.40 น. พักรับประทานอาหารว่าง

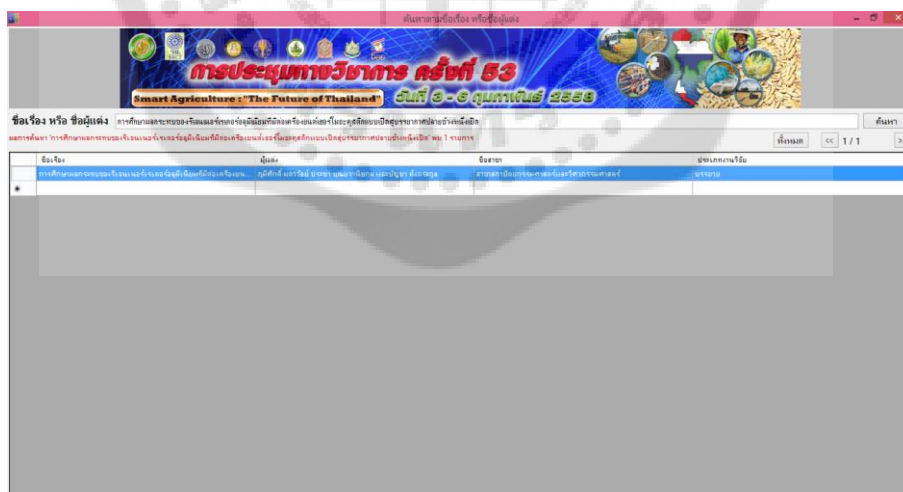
ประธาน ผศ.ดร.มิตี รุจามุรักษ์

เวลา

เรื่อง

14.40 – 15.00 น. ระบบเตือนภัยทางข้ามแยกรถไฟอัจฉริยะด้วย GPS
(สธ.วศ.17/O96)

โดย วชิรวิทย์ โกมลพิสิฐ และคณะ



การศึกษาผลกระทบของรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมที่มีต่อเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิด สู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด

A Study of Effect of Aluminums Regenerator for Open-air the Thermoacoustic Engine

ภูมิศักดิ์ ผดวาลย์¹ ประชา บุญยวานิชกุล¹ และ บัณฑา คังตระกูล²

Poomsak Padawan¹, Pracha Boonyavanichkul¹ and Bancha Kongtrakool²

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกที่น่าสนใจมาก เนื่องจากมีเพียงตัวกลางที่เป็นอากาศเคลื่อนไหวขณะเครื่องยนต์ทำงาน โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลที่เกิดจากการขยายตัวและบีบอัดของอากาศที่เป็นสารตัวกลาง การศึกษาเรื่องของวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์กับความพรุนของวัสดุที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน ความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก ความเร็วของการสั่นของอากาศตัวกลางที่ปลายท่อของเครื่องยนต์ โดยบทความนี้ได้นำเสนอผลการทดลองที่ใช้วัสดุอลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ โดยแบ่งความพรุนออกเป็น 3 ระดับ คือ ความพรุน 95%, 96.5% และ 98% ตามลำดับ โดยแต่ละความพรุนให้อุณหภูมิที่เริ่มทำงาน (start) ของเครื่องยนต์ที่ 7 นาที, 5 นาที และ 4 นาที ตามลำดับ ความเร็วของการสั่นของอากาศที่ปลายท่อ 0.28 m/s, 0.53 m/s และ 0.58 m/s ตามลำดับ แสดงว่าวัสดุอลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ ลักษณะความพรุนมากจะส่งผลให้การเริ่มทำงานของเครื่องยนต์ที่รวดเร็วขึ้นและความเร็วของการสั่นของอากาศที่ความเร็วขึ้น

ABSTRACT

Thermoacoustic is an interesting external combustion engine because of using air is working fluid for operated convert heat energy to mechanical energy by compress and expand of working fluid, study about material for regenerator and porosity that effect to phenomenon thermoacoustic generate it relation between porosity, heat input is effective for thermoacoustic generate and air vibration at end of engine tube. This paper is present experimental result of aluminums regenerator at 3 porosity level is 95%, 96.5 % and 98% respectively, result show engine start temperature is 7 minute, 5 minute and 4 minute respectively, and velocity of air at end tube is 0.28 m/s, 0.53 m/s and 0.58 m/s respectively result show regenerator made from aluminum highest porosity cause engine start time and velocity of air end tube is faster

Key Words: thermo acoustic engine, regenerator

*Corresponding author; e-mail address: mansan_me@hotmail.com

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ.องครักษ์ จ.นครนายก

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhonnayok

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่ อ.หางดง จ.เชียงใหม่

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, North-Chiang Mai University, Hang Dong, Chiang Mai.

คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยต้องมีการนำเข้าน้ำมัน เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งราคาน้ำมันในตลาดโลกมีผันผวน โดยมีแนวโน้มที่จะมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการพยายามหาพลังงานชนิดอื่นเพื่อมาทดแทน

ความน่าสนใจมากที่สุดของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก (Thermo acoustic engine) คือกลไกของเครื่องยนต์ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกจะใช้ปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก โดยป้อนพลังงานความร้อนให้สารตัวกลาง เกิดการขยายตัวและอัดตัวเป็นผลให้เกิดการสั่นไปมา ทำให้เกิดเป็นคลื่นเสียงในระดับการสั่นพ้องเนื่องจากการอัดและทำให้สารตัวกลางเคลื่อนที่ โดยบรรจุสารตัวกลางในหลอดเสียง (Sound tube หรือ Resonator) เพื่อขยายคลื่นเสียงและใช้รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) หรือ Stack ในการเก็บสะสมความร้อนและคายความร้อน คลื่นเสียงที่ได้สามารถนำไปพัฒนาและนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแกรเดียนต์ (Temperature gradient) กับรีเจนเนอเรเตอร์ แบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์ต่ำกว่าพาร์เซล พาร์เซลจะรับความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่ปลายด้านเย็น เมื่อพาร์เซลเคลื่อนที่มายังปลายด้านร้อนก็จะระบายความร้อนกลับคืนให้แก่รีเจนเนอเรเตอร์ (Figure 1) ความชันของอุณหภูมิแกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์ไม่ชันมากเท่ากับของพาร์เซล ดังนั้นจึงมีการเคลื่อนที่ของความร้อนขึ้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้พาร์เซลเคลื่อนที่เป็นวงรี พาร์เซลจะเปลี่ยนพลังงานเสียงของคลื่นเสียงเป็นพลังงานป้อนเข้า ทำให้ปลายด้านร้อนมีความร้อนมากขึ้น

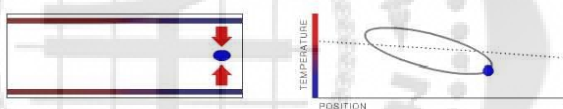


Figure 1 The temperature gradient of Parcel is over than temperature gradients of the regenerator.

กรณีที่ 2 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์สูงกว่าพาร์เซลจะมีความชันมากกว่าของพาร์เซล ในกรณีนี้พาร์เซลจะรับความร้อนจากปลายด้านร้อนแล้วส่งกลับคืนที่ปลายด้านเย็น ซึ่งเป็นการให้พลังงานแก่คลื่นเสียงโดยใช้แหล่งความร้อนเป็นแหล่งให้พลังงาน ทำให้เครื่องยนต์ใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เกิดเสียงที่ความถี่พ้อง (Resonant frequency) ขึ้น (Figure 2)

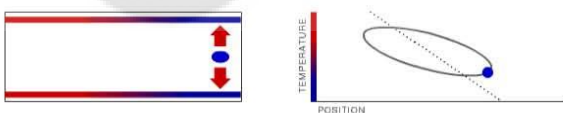


Figure 2 The temperature gradient of Parcel is less than temperature gradients of the regenerator.

กรณีที่ 3 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับพาร์เซล ที่สภาวะนี้ปลายด้านหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์จะร้อนและปลายอีกด้านจะเย็นถ้าไม่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิแกรเดียนต์

ของรีเจนเนอเรเตอร์จะเท่ากับอุณหภูมิแก๊สเดินที่ของพาร์เซลในสภาวะนี้จะไม่เกิดงานขึ้นและไม่มีพลังงานไหลเข้าหรือไหลออก (Figure 3)

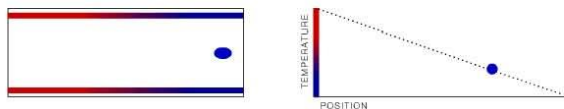


Figure 3 The temperature gradient of Parcel is equal to temperature gradients of the regenerator.

แม้ว่าหลักการในเชิงทฤษฎีของเทคโนโลยีฮีโมอะคูสติคค่อนข้างจะมีความซับซ้อน แต่การรังสรรค์ใช้งานในทางปฏิบัตินั้นสามารถทำได้ง่าย ซึ่งสิ่งนี้เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบอื่นๆ อีกดังนี้

1. ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวนำมาทำให้เกิดวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ ดังนั้นจึงมีความไว้วางใจได้สูงมาก และมีอายุการใช้งานยาวนาน
2. สารตัวกลางที่ใช้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
3. การใช้อากาศหรือก๊าซเฉื่อยอื่นๆ เป็นสารตัวกลางซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะทำให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง
4. ไม่มีความต้องการพิเศษใดๆ เกี่ยวกับวัสดุ สามารถใช้วัสดุที่หาได้ง่ายๆ ทั่วไปซึ่งมีราคาค่อนข้างถูกได้
5. สามารถนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลายบนพื้นฐานของเทคโนโลยีเดียวกัน

การศึกษางานวิจัยเครื่องยนต์ฮีโมอะคูสติคพบว่ามีการศึกษาค้นคว้าอยู่ในวงแคบๆ งานวิจัยที่ผ่านมา มีดังนี้ Zhou & Matsubara, 1998 ได้ทดสอบเครื่องยนต์ฮีโมอะคูสติคโดยใช้สแต็กทำด้วยตะแกรงทองแดง เพื่อศึกษาอุณหภูมิและความถี่ที่เริ่มทำงานของเครื่องยนต์พบว่ากำลังที่ได้สูงสุด 26 W ที่ความถี่ 73 Hz กำลังที่ป้อนเข้า 833 W และอุณหภูมิฮีเตอร์ 700 K, Ki & Jeong, 2013 ได้ศึกษารูปร่างและสมรรถนะของเครื่องยนต์พัลส์ทูป ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพคาร์โนของเครื่องยนต์พัลส์ทูปอยู่ที่ 40 ถึง 50 % Backhaus; & Swift, 2000 ได้ศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์จิงฮีโมอะคูสติคโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ยาว 7.3 cm ทำด้วยตาข่ายสแตนเลสสตีล 120 mesh เส้นศูนย์กลาง 8.89 cm พบว่างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จเพื่อใช้เป็นแนวทางสู่การวิจัยเครื่องยนต์สเตอร์จิงฮีโมอะคูสติคแบบไฮบริดจ์ในอนาคต Huifang Kang; et al, 2013 ศึกษารูปร่างของตัวขับตัวระบายความร้อนที่ตรงกับเครื่องยนต์ฮีโมอะคูสติค ประกอบด้วยเครื่องยนต์ฮีโมอะคูสติคคั่นนั่งเครื่องยนต์ฮีโมอะคูสติคคั่นเดินทาง จากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์ฮีโมอะคูสติคประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 26.2 % ถึง 34.3 % อับดุลราฮ์มและคณะ Abdulrahman; et al, 2009 ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ฮีโมอะคูสติคโดยเลือกใช้วัสดุทำรีเจนเนอเรเตอร์ต้นทุนต่ำได้แก่ ตะแกรงโลหะ เซรามิกและฝอยสแตนเลสสตีล พบว่าตะแกรงโลหะให้สมรรถนะที่ดีที่สุด เซรามิกให้ผลพอใช้และฝอยสแตนเลสสตีลให้สมรรถนะแย่มากที่สุดในวัสดุที่นำมาทดสอบสามชนิด Ueda; et al, 2004 ได้ศึกษาทดลองฮีโมอะคูสติคและประยุกต์ตัวระบายความร้อน พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน 30 % W.V.Slaton, 2010 ได้ศึกษาเครื่องยนต์ฮีโมอะคูสติคแบบเปิดสู่อากาศความถี่ต่ำ โดยใช้ stack ชนิดและขนาดความพรุนต่างกัน พบว่าอุณหภูมิแตกต่างกันที่ stack เท่ากับ 185 K โดยป้อนกำลังไฟฟ้า 276 W

จากการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาฮีเจนเนอเรเตอร์ ในการออกแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกดังที่ได้พบทวนมาข้างต้น ซึ่งพบว่าไม่สามารถเปรียบเทียบพลังงานและประสิทธิภาพกันได้ เนื่องจากลักษณะการทดลองที่ต่างกันและขนาดชนิดเครื่องที่ต่างกันของฮีเจนเนอเรเตอร์ ดังนั้นการศึกษาวิจัยอิทธิพลของชนิดวัสดุและรูปแบบของฮีเจนเนอเรเตอร์ ในงานวิจัยนี้จึงจำกัดการศึกษาโดยทำการทดสอบที่เครื่องยนต์ที่มีขนาดเท่ากัน แต่ต่างกันวัสดุซึ่งใช้สำหรับทำฮีเจนเนอเรเตอร์และระดับความพรุนของวัสดุที่ใช้ทำเป็นสำคัญ

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าการศึกษาถึงผลกระทบของฮีเจนเนอเรเตอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกนั้นมีการวิจัยกันน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษอิทธิพลของชนิดวัสดุและความพรุนของฮีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

อุปกรณ์หรือวิธีการ

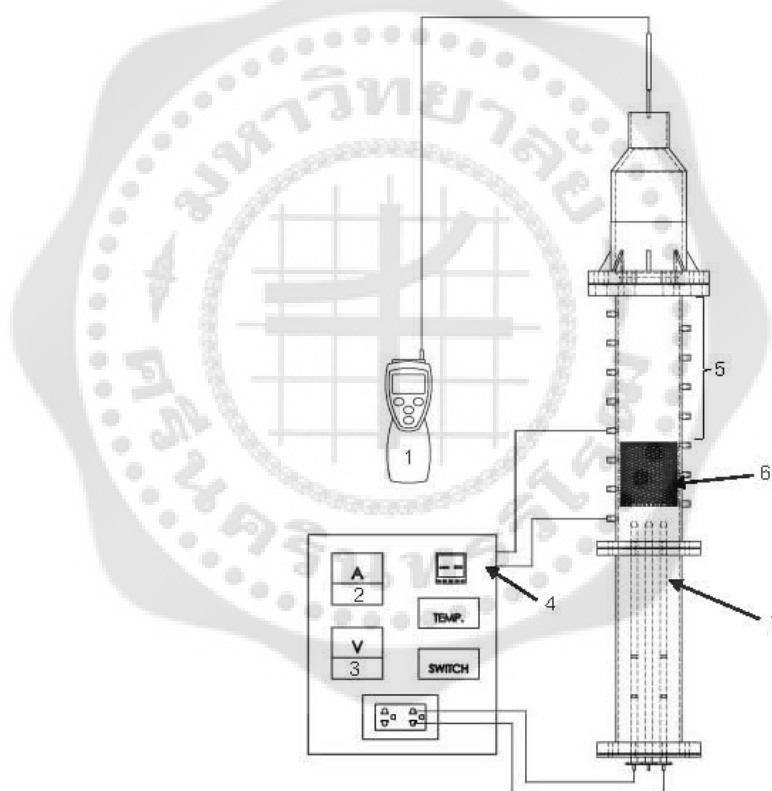


Figure 4 A location material of Thermoacoustic engine

- | | | |
|-------------------------|------------|----------------|
| 1. Anemometer | 2. Ammeter | 3. Voltmete |
| 4. Temperature Control. | 5. Cooling | 6. Regenerator |
| 7. Heater | | |

เครื่องยนต์เฮอร์โมอะคูสติคแบบเปิดสู่บรรยากาศ มีส่วนประกอบหลักคือ ชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ รีเจนเนอเรเตอร์และฮีตเตอร์ลักษณะการของเครื่องยนต์เฮอร์โมอะคูสติค (Figure 4) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104.7 mm แหล่งพลังงานให้ความร้อนฮีตเตอร์ที่ 2000 W ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ที่ทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ ที่ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ และที่ทางออกเครื่องยนต์ วัดความเร็วลมที่ทางออกเครื่องยนต์ วัดแรงดันไฟฟ้า วัดกระแสไฟฟ้า สำหรับรีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นอลูมิเนียมขนาดความยาว 111 mm โดยการวัดความพรุนจาก อัตราส่วนร้อยละของปริมาตรช่องว่างในเนื้อวัสดุพูนกับปริมาตรรวม (Figure 5)

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \times 100\% \quad (1)$$

โดย ε คือ ความพรุน (porosity), V_b คือปริมาตรรวม (bulk volume) และ V_s คือ ปริมาตรเนื้อของแข็ง (solid volume) ในวัสดุพูน

การทดสอบเริ่มจากการเปิดฮีตเตอร์และเริ่มบันทึกข้อมูล วัดความเร็วลม วัดแรงดันไฟฟ้า วัดกระแสไฟฟ้า โดยบันทึกข้อมูลทุก 1 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิ ถึง 300 °C พลังงานลมที่ไหลในท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานจลน์ของอากาศ โดยความเร็วเริ่มต้นที่ปลายปิดด้านล่างของเครื่องยนต์เท่ากับศูนย์ ความเร็วลมที่ปลายทางออกด้านบนของเครื่องยนต์ v_{out}

จะได้

$$W_{net,out} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad \text{โดย } \dot{m} = \rho A v$$

$$W_{net,out} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

โดย $W_{net,out}$ คือพลังงานลม, ρ คือความหนาแน่นอากาศ, A คือพื้นที่หน้าตัดท่อทางออก, m^2 และ $v = v_{out}$ คือความเร็วลมปลายทางออก



Figure 5 Show the materials used to make regenerator.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุและความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบปลายเปิดสู่บรรยากาศ โดยใช้ฮีตเตอร์ 2000 W เป็นแหล่งให้พลังงาน ให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 300 °C ผลของระดับความพรุนต่อกำลังงานของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากอลูมิเนียม เพื่อทดสอบผลของระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก จึงทำการทดสอบการทำงาน โดยใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ 3 ระดับความพรุนคือที่ ความพรุน 96.5 % และ 95 % 98 % ผลการทดสอบมีดังนี้

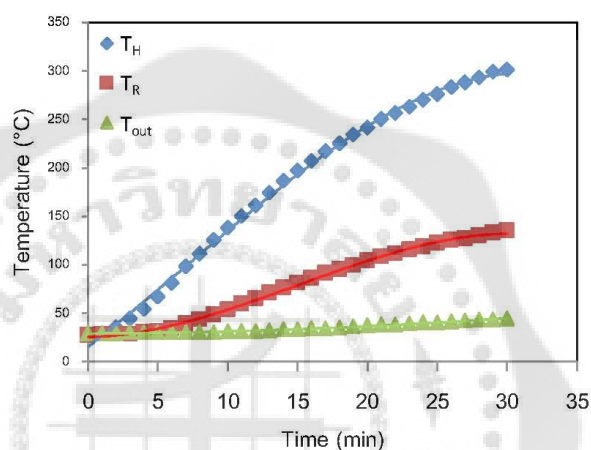


Figure 6 Graph shows temperature change of Inputs/Outputs Regenerator temperature and Thermoacoustic. By use of aluminum as the regenerator has a porosity of 95%.

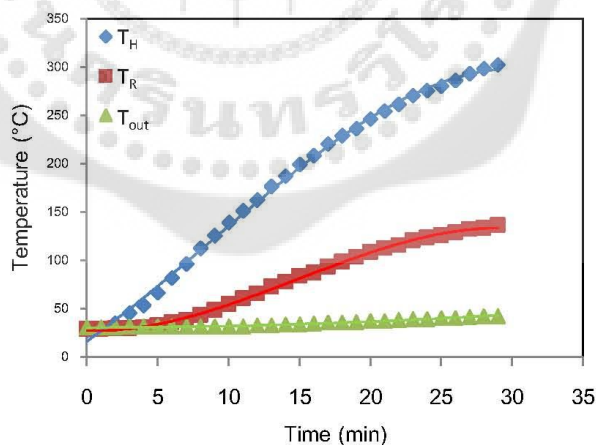


Figure 7 Graph shows temperature change of Inputs/Outputs Regenerator temperature and Thermoacoustic. By use of aluminum as the regenerator has a porosity of 96.5%

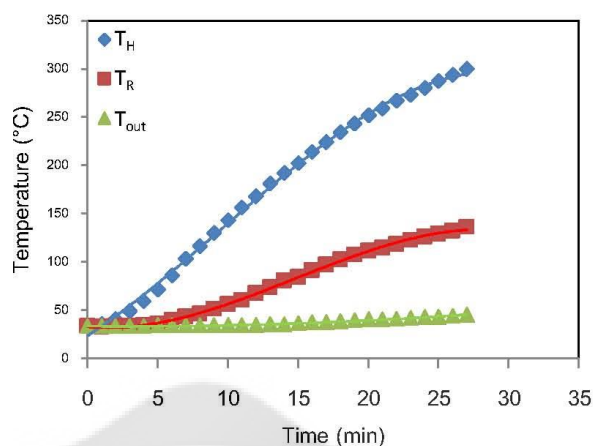


Figure 8 Graph shows temperature change of Input/Output Regenerator temperature and Thermoacoustic. By use of aluminum as the regenerator has a porosity of 98%.

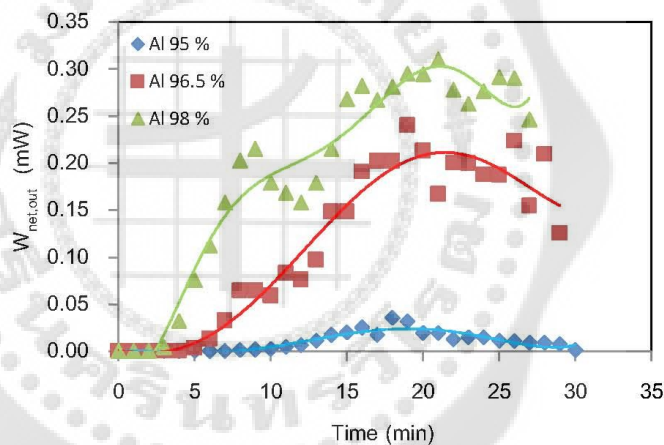


Figure 9 Graph compares temperature change of Thermoacoustic engine. The regenerator of porosity is 95%, 96.5% and 98% respectively.

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่อากาศ
ปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมที่มีความพรุน 95 % (Figure 6, 9) เริ่มทำงานนาที่ที่ T_H
98 °C, T_R 39 °C, T_{out} 30 °C, v_{out} 0.04 m/s งานที่ได้ 0.0001 mW งานสูงสุดนาที่ที่ 18 T_H 225 °C, T_R 95 °C, T_{out} 35
°C, v_{out} 0.28 m/s งานที่ได้ 0.0355 mW และนาที่ที่ 30 T_H 301 °C, T_R 135 °C, T_{out} 44 °C, v_{out} 0.09 m/s งานที่ได้
0.0011 mW

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศ ปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมที่มีความพรุน 96.5 % (Figure 7, 9) เริ่มทำงานนาที่ที่ 5 T_H 66 °C, T_R 32 °C, T_{out} 31 °C, v_{out} 0.13 m/s งานที่ได้ 0.0036 mW งานสูงสุดนาที่ที่ 19 T_H 236 °C, T_R 103 °C, T_{out} 36 °C, v_{out} 0.53 m/s งานที่ได้ 0.2398 mW และนาที่ที่ 29 T_H 302 °C, T_R 136 °C, T_{out} 42 °C, v_{out} 0.43 m/s งานที่ได้ 0.1255 mW

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศ ปลายข้างหนึ่งเปิด โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์อลูมิเนียมที่มีความพรุน 98 % (Figure 8, 9) เริ่มทำงานนาที่ที่ 4 T_H 49 °C, T_R 33 °C, T_{out} 33 °C, v_{out} 0.14 m/s งานที่ได้ 0.0045 mW งานสูงสุดนาที่ที่ 21 T_H 259 °C, T_R 114 °C, T_{out} 40 °C, v_{out} 0.58 m/s งานที่ได้ 0.3100 mW และนาที่ที่ 31 T_H 301 °C, T_R 145 °C, T_{out} 47 °C, v_{out} 0.40 m/s งานที่ได้ 0.0993 mW

เมื่อเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิด ที่ใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ ที่ความพรุน 95 %, 96.5 % และ 98 % เป็นการเปรียบเทียบงานทั้ง 3 ค่าความพรุน จะเห็นได้ว่าที่ความพรุน 98 % เหมาะสมสำหรับใช้งานในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกนี้

สรุป

จากการทดลองจะเห็นว่าอุณหภูมิแก๊สเคลื่อนที่ของรีเจนเนอเรเตอร์ในช่วงแรกจะมีค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันมากและไม่มีการสะสมความร้อนในโลหะ จึงทำให้เครื่องทำงานได้ในอุณหภูมิที่ต่ำ เวลาผ่านไปคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์ คือสามารถสะสมความร้อนในโลหะสำหรับทำรีเจนเนอเรเตอร์ เมื่อมีการระบายร้อนที่เท่าเดิม จึงทำให้รีเจนเนอเรเตอร์มีความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิแก๊สเคลื่อนที่ของรีเจนเนอเรเตอร์แตกต่างกันลดลงทำให้พลังงานลดลงไปด้วยดังสภาวะที่ 3 เมื่ออุณหภูมิแก๊สเคลื่อนที่ของรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับพาร์เซล สภาวะที่ปลายด้านหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์ร้อนโดยที่ปลายอีกข้างหนึ่งเย็น ถ้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิที่ไม่เพียงพอ อุณหภูมิแก๊สเคลื่อนที่ของรีเจนเนอเรเตอร์ เริ่มเท่ากับอุณหภูมิแก๊สเคลื่อนที่ของพาร์เซล จะลดกำลังงานลงและที่น้อยลงพลังงานไหลเข้าหรือไหลออกเวลาผ่านไปเครื่องก็หยุดการทำงาน

จากทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก คุณสมบัติของอุณหภูมิและความร้อนจำเพาะซึ่งอิทธิพลต่อการทำงานตามวัฏจักรทางเทอร์โมอะคูสติก สำคัญอีกข้อหนึ่งคือต้องเก็บความร้อนและคายความร้อนอย่างรวดเร็ว อลูมิเนียมสามารถทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำ ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ ก็มีอิทธิพลต่อการทำงาน เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกจากการทดสอบจะพบว่าที่ความพรุนที่ 98 % สามารถกำลังงานสูงสุดในนาที่ที่ 21 อุณหภูมิฮีตเตอร์ 259 °C, อุณหภูมิรีเจนเนอเรเตอร์ 114 °C, อุณหภูมิที่ปลายทางออก 40 °C ความเร็ว 0.58 m/s กำลังงานที่ได้ 0.3100 mW ที่มากจะให้กำลังที่สูงตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการทดสอบครั้งนี้เป็นอย่างดี ฝ่ายวิศวกรรม สถาบันคันคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือวัดในการทดสอบครั้งนี้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณคณะ

อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในระหว่างการทำนงานวิจัยเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- Shuliang Zhou and Yoichi Matsubara, 1998. Experimental research of thermo acoustic prime mover. *Cryogenics* 387 :. 813-822.
- Kang et al. 2013. Design and analysis of highly effective pulse tube engine. *Applied Thermal Engineering* 53 : 31-36.
- S. Backhaus and G. W. Swift, 2000. A thermo acoustic-Stirling heat engine Detailed study. *J. Acoust. Soc. Am* 107 (6). June 2000 : 3148-3166.
- Huifang Kang et al. 2013. Thermo acoustic travelling-wave cooler driven by cascade thermo acoustic engine. *Applied Thermal Engineering* 59 : pp. 223-231.
- Abdulrahman S. et al. 2009. Performance Studies of Travelling-wave Thermo acoustic Engine for Selected Low-Cost Regenerators, *Proceeding of the SEM Annual Conference*. June 1-4, Albuquerque New Mexico USA. 2009.
- Y. Ueda et al. 2004. Experimental studies of a thermo acoustic Stirling prime mover and its application to a cooler. *J. Acoust. Soc. Am* 115 (3), March 2004 : 1134-1141.
- W. V. Slaton, 2010. An open – air infrasonic thermo acoustic engine. *Applied Acoustics* 71 : 236-240.
- อภิรัฐ จันทลักษณ์, วัชรพล ชยประเสริฐ และ เอนก สุขเจริญ. 2555. การวัดความพูนโดยการเปรียบเทียบ อัตราการลดลงของความดัน. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9 6-7 ธันวาคม 2555. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน : 65-72.



การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงาน ความร้อน
และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 14
ของ
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 19-20 มีนาคม 2558
ณ โฮไรซันวิลเลจแอนด์ รีสอร์ทและสวนพฤกษศาสตร์ทวีชล เชียงใหม่
จัดโดย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล

ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 14)

วันที่ 19-20 มีนาคม 2558

ณ ออโรจินวิลเลจแอนดรีสอร์ทและสวนพฤกษศาสตร์วัชระ

อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่



คณะกรรมการการจัดการประชุมวิชาการ
เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ
(ครั้งที่ 14)

ระหว่างวันที่ 19-20 มีนาคม 2558

ณ โอไรซันวิลเลจแอนด์รีสอร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทวีชล จังหวัดเชียงใหม่

ที่ปรึกษาคณะกรรมการจัดการประชุม

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการจัดการประชุม

- | | | |
|-----------------------------|------------------|------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ | เกียรติศิริโรจน์ | ประธานคณะกรรมการ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.นคร | ทิพย์วงศ์ | กรรมการ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์ | สัมพันธ์ตะกุล | กรรมการ |

คณะอนุกรรมการฝ่ายพิจารณาบทความ

- | | | |
|-------------------------------|------------------|---------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ | เกียรติศิริโรจน์ | ประธานคณะอนุกรรมการ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.นคร | ทิพย์วงศ์ | กรรมการ |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวั | อัจฉริยวิริยะ | กรรมการ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์ | สัมพันธ์ตะกุล | กรรมการ |

คณะอนุกรรมการฝ่ายติดต่อประสานงาน/ต้อนรับ

- | | | |
|---------------------|------------|---------------------|
| 1. อาจารย์ ดร.ณัฐนี | วรยศ | ประธานคณะอนุกรรมการ |
| 2. อาจารย์ ดร.ชาย | รังสียากุล | อนุกรรมการ |
| 3. นายวันรบ | กิตินาน | อนุกรรมการ |
| 4. นางสาววาสนา | คำโสภาส | อนุกรรมการ |

คณะอนุกรรมการฝ่ายลงทะเบียน/การเงิน

- | | | |
|---------------------|---------|---------------------|
| 1. อาจารย์ ดร.ณัฐนี | วรยศ | ประธานคณะอนุกรรมการ |
| 2. นายวันรบ | กิตินาน | อนุกรรมการ |
| 3. นางสาววาสนา | คำโสภาส | อนุกรรมการ |
| 4. นางสาวเจนทิรา | อุ้นแสง | อนุกรรมการ |

คณะอนุกรรมการฝ่ายเอกสาร

- | | | |
|-----------------------------|------------------|---------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ | เกียรติศิริโรจน์ | ประธานคณะอนุกรรมการ |
| 2. อาจารย์ ดร.ณัฐนี | วรยศ | อนุกรรมการ |
| 3. นายวันรบ | กิตินาน | อนุกรรมการ |
| 4. นายนเรศ | ใหญ่วงศ์ | อนุกรรมการ |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ
 เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ
 (ครั้งที่ 14)
 ระหว่างวันที่ 19-20 มีนาคม 2558
 ณ โฮโรชันวิลเลจแอนด์รีสอร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทวีชล จังหวัดเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.คณิต วัฒนวิเชียร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา

ผศ.ดร.ชูรัตน์ ชารารักษ์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

รศ.ดร.สันติ ห่วงนิพนพานโต

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รศ.ดร.สัมพันธ์ ฤทธิเดช

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ดร.อดิพงษ์ นันทพันธุ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.จิรวรรณ เตียรฤ์สุวรรณ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผศ.ดร.ชยุต นันทดุสิต

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พันเอก ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร. อิบดินทร์ แสงสว่าง

มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร.ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์

41	แก่งกล้า กุณรักษ์ สมศักดิ์ เพ็ชรกุล สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด	คุณลักษณะสมรรถนะทางความร้อนในท่อผิวบ่มที่มีการใส่ แผ่นบด	15.30 – 15.45
42	รัฐกาญจน์ เกตุเรน วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์ สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด	การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบท่อสองชั้นโดยการใส่แผ่นบดคู่	15.45 – 16.00

ประธาน Section ห้องจันทระกะหื้อ : ศ.ดร.สัมพันธ์ อุทธิเดช, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อบทความ	เวลา
43	Mustafa Yapha Pracha Bunyanichakul	Phenomenon of Drying Rough Rice by Must Flow Dryer	16.00 – 16.15
44	ศุภวัชร กาญจนมานนท์ สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด	การถ่ายเทความร้อนในท่อที่ติดตั้งแผ่นบดหลวมที่มีปีกกลาง แผ่น	16.15 – 16.30
45	ภูมิศักดิ์ ผดุงวัลย์, มุสตาฟา ยะภา มณฑล ชูโซนา, ประชา บุญวานิชกุล บัญชา คังตระกูล	การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ เรอร์โมะคัสติก	16.30 – 16.45
46	อภิชาติ ศรีไชยรัตน์, มักดาร์ แวหะยี่ ภาสกร เวสสะโกศล, ชยุต นันทดุสิต	การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งซี่ฟันปลาที่ปากทางออก	16.45 – 17.00
47	วิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง, จิตกร กนกนัยการ สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์ ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์, พงษ์เจต พรหมวงศ์	การศึกษาอิทธิพลของแผ่นกันเสียงในเครื่องแลกเปลี่ยนความ ร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส	17.00 – 17.15
48	สันติ หวังนิพนพานโต, พิษณุ ศรีธงชัย ทศพร พรหมสิทธิ์, ดุสิต งามรุ่งโรจน์ มุสตาฟา ยะภา	การศึกษาสภาพการติดไฟจากแก๊สที่ได้จากกิ่งไม้ธรรมชาติ	17.15 – 17.30

**การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทโลหะที่มีต่อสมรรถนะ
ของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก**

**A STUDY OF EFFECTS OF METALLIC REGENERATORS CHARACTERISTICS ON
PERFORMANCE OF A THERMO ACOUSTIC ENGINE**

ภูมิศักดิ์ ผดวาลัย

มูสดาฟา ยะกา

มณฑล ชูโชนาค

ประชา บุญยานิชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ที่ 7 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบล

องครักษ์ อำเภองครักษ์ จังหวัดนครนายก

26120 Tel: 087-911-3147

E-mail: mansan_me@hotmail.com

บัญชา คังตระกูล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ท-

เชียงใหม่ อ.หางดง จ.เชียงใหม่

E-mail: bancha@northcm.ac.th

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในระดับห้องปฏิบัติการแบบใช้อากาศเป็นสารทำงาน โดยมีรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากวัสดุประเภทโลหะขนาดยาว 111 mm ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยการเปลี่ยนชนิดของวัสดุ และระดับความพรุนที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ วัสดุทั้ง 3 ชนิดได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม ซึ่งมีระดับความพรุนอยู่ระหว่าง 80 - 99 % ผลการทดสอบพบว่ารีเจนเนอเรเตอร์ที่สามารถใช้งานได้ดี คือแบบแผ่นบางเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งสามารถเก็บและคายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้การทำงานเป็นไปตามวัฏจักรเทอร์โมอะคูสติก สำหรับวัสดุทดสอบ 3 ชนิด พบว่าที่ระดับความพรุน 98 % เครื่องยนต์สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี โดยมีแนวโน้มลักษณะการทำงานแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ โลหะกลุ่มที่ 1 คือโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำและความจุความร้อนจำเพาะสูง ได้แก่ อลูมิเนียม ซึ่งมีความสามารถในการเก็บและคายความร้อนสูง พลังงานที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอีกกลุ่มพบว่ามีความสูงว่า โลหะกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นสูงและความจุความร้อนจำเพาะต่ำ ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง ซึ่งมีความสามารถในการเก็บและการคายความร้อนต่ำกว่า

คำสำคัญ: เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก, รีเจนเนอเรเตอร์

Abstract This research aims to fabricate a thermo acoustic engine using air as working fluid equipped with metallic regenerator of 111 mm length. Engine efficiency test is conducted for various kinds of metallic materials (copper, brass and aluminum) and porosities (in range of 80-99%) of regenerator. The experimental results show that the most appropriate shape of metallic regenerator is the thin and small shredded metal sheet which can store and release heat quickly. For all metallic regenerators, the most appropriate workable porosity is 98%. From the working characteristics, the material could be classified into 2 groups. Group 1 metals that have low density and high specific heat capacity. Which is aluminum that could store and release heat quickly. This one could generate higher power compared with another group, Group 2 covers brass and copper, that has higher density and lower specific heat capacity so these metals have lower ability to store and release heat.

Keywords : thermo acoustic engine, regenerator

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยต้องมีการนำเข้าน้ำมัน เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจในภาคอุตสาหกรรมซึ่งราคาน้ำมันในตลาดโลกมีผันผวน โดยมีแนวโน้มที่จะมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการพยายามหาพลังงานชนิดอื่นเพื่อมาทดแทน

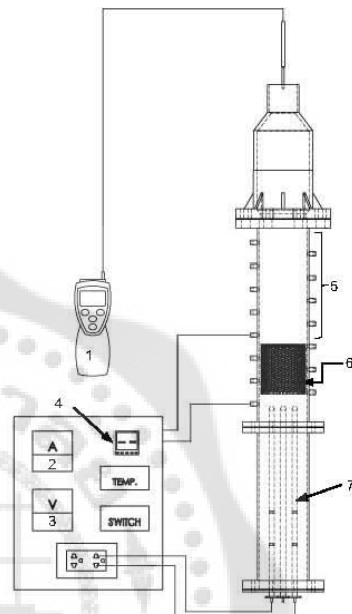
เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก (Thermo acoustic engine) เมื่อป้อนพลังงานความร้อนเกิดคลื่นเสียง โดยการรับความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิสูงแล้วระบายออกให้แก่แหล่งอุณหภูมิต่ำ ความน่าสนใจมากที่สุดของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก คือกลไกของเครื่องยนต์ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกจะใช้ปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก โดยป้อนพลังงานความร้อนให้สารตัวกลาง เกิดการขยายตัวและอัดตัวเป็นผลให้เกิดการสั่นไปมา ทำให้เกิดเป็นคลื่นเสียงในระดับการสั่นพ้องเนื่องจากการอัดและทำให้สารตัวกลางเคลื่อนที่ โดยบรรจุสารตัวกลางในหลอดเสียง (Sound tube หรือ Resonator) เพื่อขยายคลื่นเสียงและใช้รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) หรือ Stack ในการเก็บสะสมความร้อนและคายความร้อน คลื่นเสียงที่ได้สามารถนำไปพัฒนาและนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้

การศึกษานานวิจัยเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกพบว่ายังมีการศึกษาค้นคว้าอยู่ในวงแคบๆ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มี ชูและวัชรบุราร (1998) [1] ได้ทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยใช้สแต็กทำด้วยตะแกรงทองแดงเพื่อศึกษาอุณหภูมิและความถี่ที่เริ่มทำงานของเครื่องยนต์ พบว่ากำลังที่ได้สูงสุด 26W ที่ความถี่ 73Hz กำลังที่ป้อนเข้า 833 W และอุณหภูมิฮีทเตอร์ 7000K และจวง (2013) [2] ได้ศึกษารูปร่างและสมรรถนะของเครื่องยนต์ฟิลล์ทูป ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพภายในของเครื่องยนต์ฟิลล์ทูปอยู่ที่ 40 ถึง 50 % แบบคลาส และสรีฟท์ (2000) [3] ได้ศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์จอร์โมอะคูสติกโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ยาว 7.3 cm ทำด้วยตาข่ายสแตนเลสสตีล 120 mesh เส้นศูนย์กลาง 8.89 cm พบว่างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จเพื่อใช้เป็นตัวนำทางสู่การวิจัยเครื่องยนต์สเตอร์จอร์โมอะคูสติกแบบไฮบริดจ์ในอนาคตทั้งทางทฤษฎีและคณะ (2013) [4] ศึกษารูปร่างของตัวขับตัวระบายความร้อนที่สอดคล้องกับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ประกอบด้วยเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกคลื่นนิ่ง เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกคลื่นเดินทาง จากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 26.2 % ถึง 34.3% อับดุลราฮ์มีและคณะ (2009) [5] ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยเลือกใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทนทานได้แก่ ตะแกรงโลหะ เซรามิก และฝอยสแตนเลสสตีล พบว่าตะแกรงโลหะให้สมรรถนะที่ดีที่สุด เซรามิกให้ผลพอใช้และฝอยสแตนเลสสตีลให้สมรรถนะแย่ที่สุดในวัสดุที่นำมาทดสอบสามชนิดนี้ และคณะ (2004) [6] ได้ศึกษาทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและประยุกต์ตัวระบายความร้อน พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน 30% ดับเบิลยู วี สลาตัน (W.V.Slaton 2010) [7] ได้ศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่อากาศความถี่ต่ำ โดยใช้ stack ชนิดและขนาดความพรุนต่างกัน พบว่าอุณหภูมิแตกต่างกันที่ stack เท่ากับ 185 K โดยป้อนกำลังไฟฟ้า 276 W

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าการศึกษาถึงผลกระทบของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกนั้นมีการวิจัยกันน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้

ทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุและความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

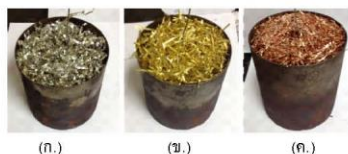
2. วิธีการดำเนินการ



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งอุปกรณ์ของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

1. เครื่องวัดความเร็วลม
2. แอมป์มิเตอร์แบบเข็ม
3. โวลต์มิเตอร์แบบเข็ม
4. เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ
5. ชุดระบายความร้อน
6. รีเจนเนอเรเตอร์
7. ฮีทเตอร์

เครื่องเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเปิดสู่บรรยากาศ มีส่วนประกอบหลักคือชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ รีเจนเนอเรเตอร์ และฮีทเตอร์ ลักษณะการของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104.7 mm แหล่งพลังงานให้ความร้อนฮีทเตอร์ที่ 2000 W ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ที่ทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ที่ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และที่ทางออกเครื่องยนต์วัดความเร็วลมที่ทางออกเครื่องยนต์วัดแรงดันไฟฟ้าวัดกระแสไฟฟ้า สำหรับรีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้ทดสอบซึ่งทำจากวัสดุ 3 ชนิดคือ ทองแดง ทองเหลือง และ อลูมิเนียมขนาดความยาว 111 mm โดยการวัดความพรุนจากอัตราส่วนร้อยละของปริมาตรช่องว่างในเนื้อวัสดุพูนกับปริมาตรรวม ดังรูปที่ 2 การทดสอบเริ่มจากการเปิดฮีทเตอร์และเริ่มบันทึกข้อมูลวัดความเร็วลม วัดแรงดันไฟฟ้าวัดกระแสไฟฟ้าโดยบันทึกข้อมูลทุก 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิ T_H ถึง 300 °C

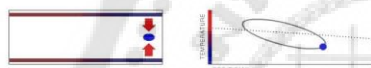


รูปที่ 2 แสดงวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์
(ก.) อลูมิเนียม (ข.) ทองเหลือง (ค.) ทองแดง

3. หลักการและแนวคิด

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแกระเตียนท์ (Temperature gradient) กับรีเจนเนอเรเตอร์ แบ่งได้เป็น 3 กรณีคือ

กรณีที่ 1 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกระเตียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์ต่ำกว่าพาร์เซล พาร์เซลจะรับความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่ปลายด้านเย็น เมื่อพาร์เซลเคลื่อนที่มายังปลายด้านร้อนก็จะระบายความร้อนกลับคืนให้แก่รีเจนเนอเรเตอร์จากรูปที่ 3 ความร้อนของอุณหภูมิแกระเตียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์ ไม่ร้อนมากเท่ากับพาร์เซล ดังนั้นจึงมีการเคลื่อนที่ของความร้อนขึ้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้พาร์เซลเคลื่อนที่เป็นวงจรพาร์เซลจะเปลี่ยนพลังงานเสียงของคลื่นเสียงเป็นพลังงานป้อนเข้า ทำให้ปลายด้านร้อนมีความร้อนมากขึ้น



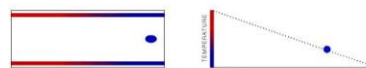
รูปที่ 3 กรณีอุณหภูมิแกระเตียนท์ของพาร์เซลน้อยกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์

กรณีที่ 2 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกระเตียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์สูงกว่าพาร์เซลจะมีความร้อนมากกว่าของพาร์เซลในกรณีที่พาร์เซลจะรับความร้อนจากปลายด้านร้อนแล้วส่งกลับคืนที่ปลายด้านเย็น ซึ่งเป็นการให้พลังงานแก่คลื่นเสียงโดยใช้แหล่งความร้อนเป็นแหล่งให้พลังงาน ทำให้เครื่องใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เกิดเสียงที่มีความถี่พ้อง (Resonant frequency) ขึ้น แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กรณีอุณหภูมิแกระเตียนท์ของพาร์เซลน้อยกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์

กรณีที่ 3 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกระเตียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับพาร์เซลที่สภาวะนี้ปลายด้านหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์จะร้อนและปลายอีกด้านจะเย็นถ้าไม่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิแกระเตียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับอุณหภูมิแกระเตียนท์ของพาร์เซลในสภาวะนี้จะไม่เกิดงานขึ้นและไม่มีการไหลเข้าหรือไหลออก แสดงรูปที่ 5



รูปที่ 5 กรณีอุณหภูมิของพาร์เซลเท่ากับรีเจนเนอเรเตอร์

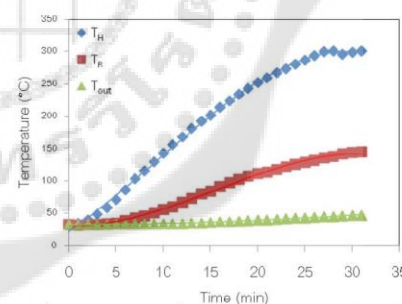
แม้ว่าหลักการในเชิงทฤษฎีของเทคโนโลยีเซอร์โมอะคูสติกค่อนข้างจะมีความซับซ้อน แต่การสร้างเพื่อใช้งานในทางปฏิบัตินั้นสามารถทำได้ง่าย ซึ่งสิ่งนี้เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบอื่นๆอีกดังนี้

1. ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวในการทำให้เกิดวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ ดังนั้นจึงมีความไว้วางใจได้สูงมาก และมีอายุการใช้งานยาวนาน
2. สารตัวกลางที่ใช้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
3. การใช้อากาศหรือก๊าซเฉื่อยอื่นๆเป็นสารตัวกลางซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะทำให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง
4. ไม่มีความต้องการพิเศษใดๆเกี่ยวกับวัสดุ สามารถใช้วัสดุที่หาได้ง่ายๆทั่วไปซึ่งมีราคาถูกน่าพอใจได้
5. สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายบนพื้นฐานของเทคโนโลยีเดียวกัน

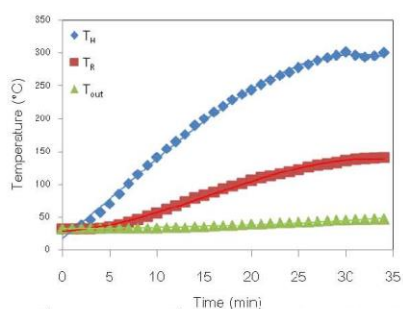
4. การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาวัฏจักรของชนิดวัสดุและความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติกแบบปลายเปิดสู่บรรยากาศโดยใช้ฮีตเตอร์ 2000 W เป็นแหล่งให้พลังงานให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 300 °C วัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์แตกต่างกันตามชนิดและค่าความพรุนตั้งแต่ 95-98 % ผลที่ได้ดังนี้

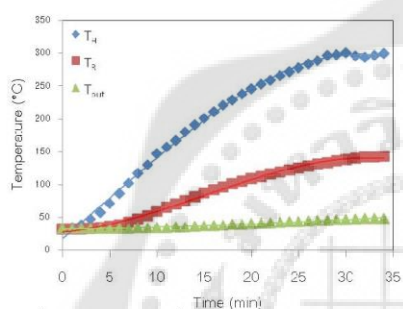
- 4.1 ผลกระทบของชนิดโลหะที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงานของเครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติกที่ระดับความพรุน 98%



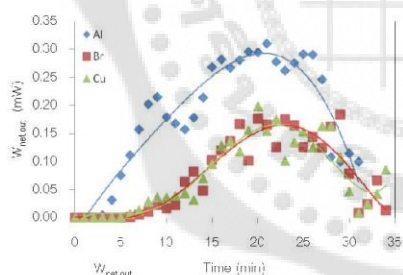
รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติกที่ใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ มีความพรุน 98 %



รูปที่ 7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติค ที่ใช้ทองเหลือง เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ มีความพรุน 98 %



รูปที่ 8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติค ที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ ทองแดงความพรุนที่ 98 %



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติค ที่ใช้อลูมิเนียม ทองเหลืองและทองแดงเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ มีความพรุน 98 %

จากรูปที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติคแบบปลายข้างหนึ่งเปิดสู่บรรยากาศ โดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ 3 ชนิด คือ อลูมิเนียม ทองเหลืองและทองแดง มีค่าความพรุน 98 % ซึ่งมีแนวโน้มคุณสมบัติการทำงานที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 โลหะที่มีคุณสมบัติความหนาแน่นต่ำและความจุความร้อนจำเพาะสูงได้แก่ อลูมิเนียมซึ่งมีความสามารถในการเก็บและคายความร้อนสูงจนทำให้ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังงานกับโลหะอีกกลุ่มพบว่ามีการทำงานสูงกว่า

กลุ่มที่ 2 โลหะที่มีคุณสมบัติความหนาแน่นสูงและความจุความร้อนจำเพาะต่ำได้แก่ ทองเหลืองและทองแดง จะมีความสามารถในการเก็บและคายความร้อนต่ำ กำลังงานที่ได้เปรียบเทียบกับกำลังงานกับโลหะกลุ่มที่ 1 พบว่ามีกำลังงานต่ำกว่า

ตาราง 1 แสดงคุณสมบัติของโลหะที่ 20 °C

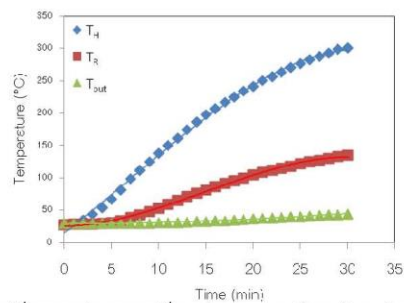
วัสดุ	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)
อลูมิเนียม	2.70×10^3	0.896
ทองเหลือง	8.6×10^3	0.385
ทองแดง	8.9×10^3	0.381

จากทดสอบการทำงานของเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติคที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งทำจากวัสดุทั้ง 3 ชนิดแล้ว พบว่าความหนาแน่นและความจุความร้อนจำเพาะมีอิทธิพลต่อการทำงานตามวัฏจักรทางเซอร์โมอะคูสติค คุณสมบัติของรีเจนเนอเรเตอร์ที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือต้องเก็บความร้อนและคายความร้อนอย่างรวดเร็ว อลูมิเนียมสามารถทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำและงานที่ได้สูงโดยมีค่าความจุความร้อนจำเพาะที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับทองเหลืองและทองแดง เหมาะสำหรับเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติคที่ใช้แหล่งพลังงานที่อุณหภูมิต่ำ อลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 660 °C ถ้าเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติคที่ใช้แหล่งพลังงานที่อุณหภูมิสูง ควรเลือกใช้ทองเหลืองหรือทองแดง โดยทองเหลืองจะมีจุดหลอมเหลวประมาณ 900 - 940 °C (ขึ้นอยู่กับส่วนผสม) ทองแดง จุดหลอมเหลวประมาณ 1,085 °C จากการสรุปที่ 9 เส้นแนวโน้มของทองเหลืองและทองแดงใกล้เคียงกัน แล้วแต่แหล่งให้พลังงานว่าสูงเท่าใด

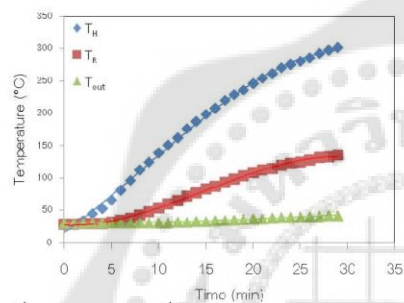
4.2 ผลของระดับความพรุนต่อกำลังงานของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากอลูมิเนียม

เพื่อทดสอบผลของระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงานของเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติค จึงทำการทดสอบการทำงาน โดยใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ 2 ระดับความพรุนคือที่ ความพรุน 96.5 % และ 95 % ผลการทดสอบมีดังนี้

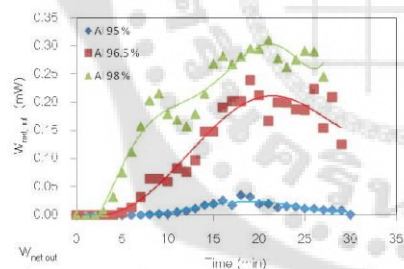
จากรูปที่ 12 เป็นการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติคแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่งเปิดที่ใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ที่ความพรุน 95 %, 96.5 % และ 98 % เป็นการเปรียบเทียบงานทั้ง 3 ค่าความพรุน จะเห็นได้ว่าที่ความพรุน 98 % เหมาะสมสำหรับใช้งานในเครื่องย่นต์เซอร์โมอะคูสติคแบบปลายข้างหนึ่งเปิดสู่บรรยากาศ



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโมเอคัสติกที่ใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ มีความพรุน 95 %



รูปที่ 11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโมเอคัสติกที่ใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ มีความพรุน 96.5 %



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโมเอคัสติก ที่ใช้อลูมิเนียมเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ ที่ความพรุน 95 % 96.5% และ 98 %

จากการทดลองจะเห็นว่าอุณหภูมิแก๊สที่ขึ้นที่ของรีเจนเนอเรเตอร์ในช่วงแรกจะมีค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันมากและไม่มีการสะสมความร้อนในโลหะ จึงทำให้เครื่องทำงานได้ในอุณหภูมิที่ต่ำ เวลาผ่านไปคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์ คือสามารถสะสมความร้อนในโลหะสำหรับทำรีเจนเนอเรเตอร์ เมื่อมีการระบายร้อนที่เท่าเดิม

จึงทำให้รีเจนเนอเรเตอร์มีความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิแก๊สที่ขึ้นที่ของรีเจนเนอเรเตอร์แตกต่างกันลดลงทำให้พลังงานลดลงไปด้วย

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแก๊สที่ขึ้นที่ของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโมเอคัสติกโดยการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุ และความพรุน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์จะมีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโมเอคัสติกแบบปลายข้างหนึ่งเปิดสู่บรรยากาศ รีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากอลูมิเนียมสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสมรรถนะที่สูงเนื่องจากมีค่าความจุความร้อนจำเพาะมาก และความหนาแน่นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับทองเหลืองและทองแดง
2. วัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์มี 3 ชนิด สามารถแยกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีความหนาแน่นต่ำและความจุความร้อนจำเพาะสูง คืออลูมิเนียมจะให้สมรรถนะที่สูง อีกกลุ่มความหนาแน่นสูงและความจุความร้อนจำเพาะต่ำ คือ ทองแดง ทองเหลืองจะให้สมรรถนะรองลงมา
3. ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโมเอคัสติกแบบปลายข้างหนึ่งเปิดสู่บรรยากาศพบว่าที่ค่าความพรุนมากสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโมเอคัสติกจะสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการทดสอบครั้งนี้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ระหว่างการทำนิพนธ์วิจัยเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shuliang Zhou and Yoichi Matsubara. "Experimental research of thermo acoustic prime mover". *Cryogenics* 387 : pp. 813-822, (1998).
- [2] Kang et al. "Design and analysis of highly effective pulse tube engine", *Applied Thermal Engineering* 53 : pp. 31-36, (2013).
- [3] S. Backhaus and G. W. Swift. "A thermoacoustic-Stirling heat engine Detailed study". *J. Acoust. Soc. Am* 107 (6). June 2000 : pp 3148-3166, (2000).
- [4] Huifang Kang et al. "Thermo acoustic travelling-wave cooler driven by cascade thermo acoustic engine". *Applied Thermal Engineering* 59 : pp. 223-231, (2013).
- [5] Abdulrahman S. et al. "Performance Studies of Travelling-wave Thermo acoustic Engine for Selected Low-Cost Regenerators, Proceeding of the SEM Annual Conference". June 1-4, Albuquerque New Mexico USA. 2009, (2009)
- [6] Y. Ueda et al. "Experimental studies of a thermo acoustic Stirling prime mover and its application to a cooler" *J.*

- Acoust. Soc. Am* 115 (3), March 2004 : pp. 1134-1141, (2004).
- [7] W. V. Slaton. "An open – air infrasonic thermo acoustic engine". *Applied Acoustics* 71 : pp. 236-240, (2010).
- [8] อภิวิฐ จันทลักษณ์, วัชรพล ชยประเสริฐ และ เอนก สุขเจริญ. "การวัดความพหุโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน". การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9.6-7 ธันวาคม 2555. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน : หน้า 65-72, (2555)
- [9] บัญชา ศังตระกูล. "การศึกษาหลักการของเครื่องจักรเทอร์โมอะคูสติกในเชิงทฤษฎี". วารสารเทคโนโลยีธนบุรี 2 มิถุนายน 2548. : หน้า 56-64., (2548)
- [10] บัญชา ศังตระกูล. "เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก: การศึกษาหลักการทางานและพารามิเตอร์ในการออกแบบ". วารสารเทคโนโลยีธนบุรี, 1, มกราคม 2551. : หน้า 231-254, (2551)





ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายภูมิศักดิ์ ผดวาลย์
วันเดือนปีเกิด	3 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	52/2 หมู่ 7 แขวงตลิ่งชัน เขตตลิ่งชัน จ. กรุงเทพมหานคร 10170 โทร 02-882-2547, 087-911-3147
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ 2539	ประถมศึกษา จากโรงเรียนวัดไก่อ่เตี้ย
พ.ศ 2542	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนมัธยมวัดดุสิตาราม
พ.ศ 2545	หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ ช่างอุตสาหกรรม ช่างยนต์ โรงเรียนเทคโนโลยีสยาม
พ.ศ 2547	หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ช่างอุตสาหกรรม ช่างยนต์ จากโรงเรียนเทคโนโลยีสยาม
พ.ศ 2550	ปริญญาตรี วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
พ.ศ 2557	ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ