

การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทฉนวน
ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
เมษายน 2558

การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทฉนวน
ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2558

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทฉนวน
ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
เมษายน 2558

ปิยชาติ จันทรานนท์. (2558). การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภท
ฉนวนที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก วิทยานิพนธ์
วศ.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล,
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก
แบบใช้อากาศเป็นสารทำงาน และใช้วัสดุประเภทฉนวนเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ในระดับ
ห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำงานที่ระดับอุณหภูมิสูงสุด 300°C โดยศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง
วัสดุที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์สามชนิดได้แก่ เม็ดดินเผา เซรามิก และลูกแก้ว ที่ระดับเปอร์เซ็นต์
ช่องว่างแตกต่างกันสามระดับคือ 40%, 45% และ 50% จากผลการทดลองพบว่าวัสดุทั้งสามชนิด
สามารถทำงานเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ได้โดยสามารถให้กำลังงานสูงสุดที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง
50% และวัสดุที่ให้ค่ากำลังงานสูงสุดได้แก่ลูกแก้ว สำหรับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ลูกแก้ว
เป็นรีเจนเนอเรเตอร์นั้นเริ่มทำงานที่นาที่ที่ 3 ของการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อน
ที่ 50°C และให้กำลังงานสูงสุดที่นาที่ที่ 14 ที่ระดับอุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อนที่ 186°C และ
เมื่อพิจารณาผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่มีต่อคุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ จะพบว่าเมื่อ
ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เครื่องยนต์มีแนวโน้ม เริ่มการทำงาน
และให้กำลังงานสูงสุดได้เร็วขึ้นจึงทำให้สามารถลดอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนให้ต่ำลงได้
เมื่อต้องการให้เครื่องยนต์เริ่มทำงานและให้กำลังงานสูงสุดคงเดิม

คำสำคัญ : เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก / รีเจนเนอเรเตอร์

TITLE A STUDY OF EFFECTS OF INSULATED REGENERATORS
CHARACTERISTICS 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

Piyachat Jantranon.(2015). *Title A Study Of Effect Of Insulated Regenerator Charecteristics On Performance Of Thermoacoustic Engine*. Master thesis, M.Eng Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.
Advisor Committee; Asst. Prof. Dr.Pracha Bunyawanichakul,
Asst. Prof. Dr. Bancha Kongtrakool.

This reseach aim to study working characteristic of laboratory scale thermo-acoustic engine using air as working fluid and insulation material as regenerator which operated at temperatures up to 300°C. The effects of changes in the materials on the working charateristics are studies for clayball, ceramic and glassball of different porosity levels form 40%, 45% and 50%. The results showed that the regenerator made from three types of insulation materials provide maximum power at a porosity of 50% and materials that provide maximum power is glassball. For thermo-acoustic engines using glassball as regenerator start working at 3 minutes of testing with the temperature of the heat source of 50°C and obtain a maximum power at 14 minutes of testing with temperature of heat source of 186°C. When considering the effect of porosity on the working characteristics of engine, it was found that the increase of regenerator porosity tend to fastened the starting point and reach the maximum power that could reduce the temperature of the heat source to lower level for start the engine while the maximum power remains the same.

Keywords: thermoacoustic engine / regenerator

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอร์เตอร์ประเภทฉนวน
ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก
ของ
ปิยชาติ จันทรานนท์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

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

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวนิชกุล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณุช แจ่มสว่าง)

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

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

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.มนัส แป้งใส)

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล ประธานคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำวิจัยเรื่องนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องด้วยความกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำแนวทางแนวคิด วิธีแก้ปัญหาตลอดการดำเนินการวิจัยตั้งแต่ต้นจนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์มณฑล ชูโซนาท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการทดลองจนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่อดทนสนับสนุนลำบากเพื่อการศึกษาของลูก อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจตลอดจนสนับสนุนการศึกษาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณญาติพี่น้องและเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และความร่วมมือในการทำวิจัยเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

ปิยชาติ จันทรานนท์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในประเทศไทย.....	4
การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในต่างประเทศ.....	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเทอร์โมอะคูสติก.....	14
รูปแบบการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.....	15
วัฏจักรของพาร์เซล.....	15
การถ่ายเทความร้อนผ่านรีเจนเนอเรเตอร์.....	18
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับรีเจนเนอเรเตอร์.....	19
หลักการถ่ายเทพลังงานด้วยรีเจนเนอเรเตอร์.....	21
การหาความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์.....	21
คลื่นยืนในท่ออากาศแบบท่อปิด.....	22
งานและประสิทธิภาพ.....	24
เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง.....	25
ความหนาแน่นของวัสดุ.....	26
การนำความร้อน.....	26
ความจุความร้อน.....	26
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	27
อุปกรณ์ในการทดลอง.....	27
อุปกรณ์ในการทดลองส่วนของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.....	27
อุปกรณ์ในการทดสอบส่วนของเครื่องมือวัดและควบคุม.....	28

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

3 (ต่อ)

การเตรียมการทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและติดตั้งเครื่องมือวัด และรีเจนเนอเรเตอร์.....	33
ขั้นตอนการทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.....	34

4 ผลและการวิเคราะห์..... 35

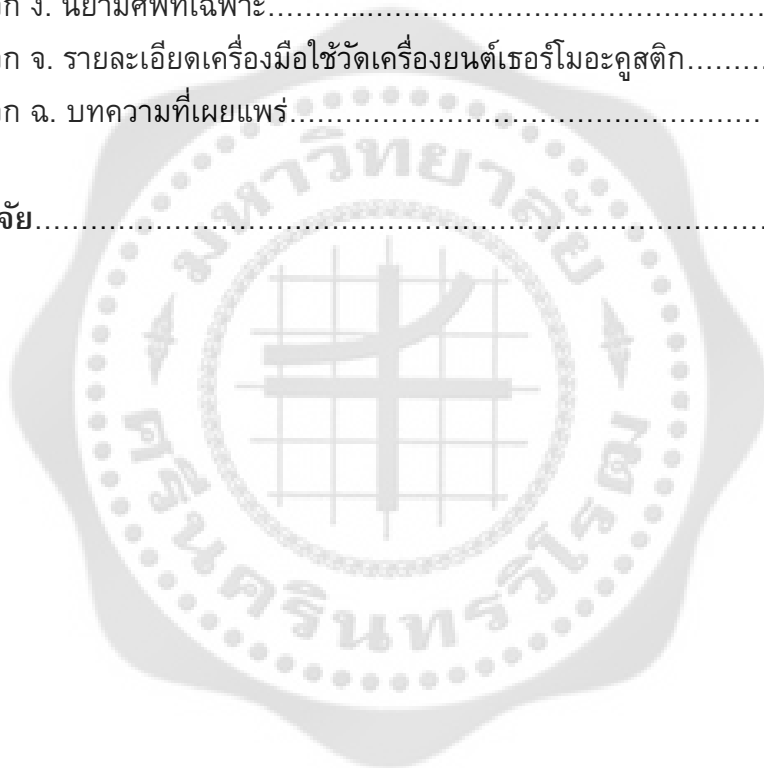
ผลของชนิดฉนวนที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โม อะคูสติก.....	36
ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงาน ของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%.....	36
ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงาน ของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%.....	40
ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงาน ของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%.....	44
ผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังงานของเครื่องยนต์ เทอร์โมอะคูสติก.....	49
ผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อระยะเวลาเริ่มทำงานของเครื่องยนต์ เทอร์โมอะคูสติก.....	49
ผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อเวลาขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ให้งานสูงสุด.....	50
ผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่ออุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์ เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงาน.....	51
ผลของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่ออุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์ เทอร์โมอะคูสติกให้งานสูงสุด.....	52
งานที่ได้รับสูงสุดที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่างๆของเครื่องยนต์ที่มี รีเจนเนอเรเตอร์ทำจากวัสดุฉนวน 3 ชนิด.....	53

5 สรุปและข้อเสนอแนะ..... 54

สรุปผลการวิจัย.....	54
ข้อเสนอแนะ.....	54

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก. รายการสัญลักษณ์.....	62
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ.....	64
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงผลการทดลอง.....	71
ภาคผนวก ง. นิยามศัพท์เฉพาะ.....	74
ภาคผนวก จ. รายละเอียดเครื่องมือใช้วัดเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก.....	76
ภาคผนวก ฉ. บทความที่เผยแพร่.....	81
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	97



บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยด้านวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานเป็นรีเจนเนอเรเตอร์.....	12
2 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างจากวิธีวัดแบบแทนที่ด้วยน้ำกับวิธีใช้ค่าความหนาแน่น.....	25
3 ลำดับการทดลองรีเจนเนอเรเตอร์ในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.....	33
4 ผลการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างแบบแทนที่ด้วยน้ำ.....	67
5 การทดสอบเปอร์เซ็นต์ช่องว่างแบบใช้ค่าความหนาแน่น.....	68
6 รายละเอียดค่าต่างๆในการเตรียมรีเจนเนอเรเตอร์เพื่อทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.....	70
7 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ 40%.....	72
8 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ 45%.....	72
9 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ 50%.....	73

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 (ก) ภาพรวมของสแต็ก (ข) ภาพขยายของแผ่นบาง.....	14
2 หลอดเสียงอย่างง่าย.....	15
3 หลอดเสียงที่มีรีเจนเนอเรเตอร์.....	15
4 สแต็ก.....	17
5 การถ่ายเทความร้อนของพาร์เซล.....	17
6 วัฏจักรการทำงานของพาร์เซล.....	18
7 การถ่ายเทความร้อนผ่านสแต็ก.....	19
8 กรณีอุณหภูมิแก๊สไอน้ำของพาร์เซลชั้นมากกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์.....	19
9 กรณีอุณหภูมิแก๊สไอน้ำของพาร์เซลชั้นน้อยกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์.....	20
10 กรณีอุณหภูมิของพาร์เซลเท่ากับรีเจนเนอเรเตอร์.....	20
11 แสดงตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์ในเครื่องทดสอบเทอร์โมอะคูสติก.....	21
12 แสดงลักษณะ 3 แบบของคลื่นยื่นในท่ออากาศเรียงตามค่าความถี่จาก น้อยไปหามาก.....	22
13 แสดงสองอุณหภูมิของกลจักรความร้อน.....	24
14 เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและเครื่องมือวัดและควบคุม.....	27
15 รีเจนเนอเรเตอร์ (ก) เม็ดดินเผา (ข) เซรามิก (ค) ลูกแก้ว.....	28
16 สายเทอร์โมคัปเปิล Type K.....	28
17 เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล ยี่ห้อ OMRON รุ่น E5CC.....	29
18 แอมป์มิเตอร์แบบเข็ม ยี่ห้อ SALZER รุ่น SD-80.....	29
19 โวลท์มิเตอร์แบบเข็ม ยี่ห้อ SALZER รุ่น SD-80.....	30
20 เครื่องวัดอุณหภูมิดิจิทัลและสวิตช์วัดอุณหภูมิ.....	30
21 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ TESTO รุ่น 425.....	31
22 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ SEIKO STOPWATCH รุ่น S23589P1.....	31
23 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Pioneer PA413.....	32
24 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง.....	32

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

[illegible]

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
36 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%.....	42
37 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%.....	42
38 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%.....	43
39 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%.....	44
40 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%.....	44
41 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%.....	45
42 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%.....	45
43 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%.....	46
44 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%.....	46
45 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%.....	47
46 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อระยะเวลาเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.....	49
47 ผลกระทบของเวลาขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้งานสูงสุด.....	50
48 ผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงาน.....	51
49 ผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้งานสูงสุด.....	52

50 งานที่ได้รับสูงสุดที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่างๆของเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ ทำจากวัสดุฉนวน 3ชนิด.....	53
51 อุปกรณ์วัดตวง (ก) บีกเกอร์แก้ว 2000 มิลลิลิตร (ข) กระบอกตวง 100 มิลลิลิตร,กระบอกตวง 10 มิลลิลิตรและกรวยแก้ว.....	66
52 วัสดุที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์นำมาทดสอบเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง (ก) เม็ดดินเผา (ข) เซรามิก (ค) ลูกแก้ว.....	67



บทที่ 1

บทนำ

1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานทวีความสำคัญมากขึ้น ในขณะที่พลังงานจากบรรพชีวินมีปริมาณจำกัด และลดปริมาณลงอย่างต่อเนื่อง การหาแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานบรรพชีวินจึงเป็นสิ่งจำเป็น ที่ควรจะต้องให้ความสนใจเพื่อรองรับความต้องการพลังงานในอนาคต

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก (Thermoacoustic engine) เป็นอีกหนึ่งเครื่องยนต์ที่เหมาะสมกับการศึกษาและเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นมิตรต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมโดยไม่ปลดปล่อยมลพิษใดๆเลย เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกได้ถูกศึกษาวิจัยและพัฒนาในระดับที่สูงขึ้น ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โดยในปี ค.ศ. 1984 ได้มีการจดสิทธิบัตรเครื่องจักรเทอร์โมอะคูสติกในสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องสูบลมร้อน (Acoustical heat pump) เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีความซับซ้อนไม่มากจึงส่งผลให้ต้นทุนในการสร้างและค่าซ่อมบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหว อาทิเช่น ข้อต่อหรือแหวนลูกสูบทำให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีอายุใช้งานยาวนาน และลดความซับซ้อนของกลไกเครื่องยนต์ คุณลักษณะเด่นที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกคือการสันดาปเกิดขึ้นภายนอกกระบอกสูบ เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่เป็นวัสดุที่เผาไหม้หลากหลายรวมถึงความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะเด่นต่างๆที่กล่าวมาแล้วเป็นเหตุผลที่สมควรจะศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในรายละเอียดต่างๆรอบด้านเพื่อพัฒนา

ปัจจุบันการศึกษาวิจัยเรื่องเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในประเทศไทยโดยเฉพาะการพัฒนาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการยังมีน้อย จึงทำให้ขาดองค์ความรู้ในการพัฒนางานวิจัยเชิงวิชาการเพื่อสร้างองค์ความรู้สำหรับการแข่งขันพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ โดยเฉพาะด้านการทำควมเย็นและเครื่องยนต์ต้นกำลัง จากหลักการเทอร์โมอะคูสติกโดยใช้พลังงานทดแทนเช่น แสงอาทิตย์ ก๊าซชีวมวล ก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

การศึกษาพารามิเตอร์และปัจจัยต่าง ๆ ในการออกแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีความสำคัญมากในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกสามารถทำงานได้ดีให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานได้ดีที่สุด โดยเมื่อพิจารณาจากรายงานการวิจัยต่างๆที่ผ่านมา พบว่าพารามิเตอร์และปัจจัยต่างๆในการออกแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกพบว่ามีข้อมูลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน จากปัจจัยของปัญหาข้างต้นเครื่องยนต์เทอร์

โมอะคูสติคจึงเป็นเครื่องยนต์ที่ควรศึกษาในเชิงลึกด้านวิชาการและการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้องค์ความรู้เชิงวิชาการและสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ได้จริงจากแหล่งพลังงานทดแทนซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในอนาคต

การถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคจะเกิดขึ้นภายในรีเจนเนอเรเตอร์โดยเรียกในเครื่องยนต์สตูบร้อนในเครื่องทำความเย็นจะเรียกว่า สแต็ก รีเจนเนอเรเตอร์จึงเป็นส่วนสำคัญในการสร้างปรากฏการณ์วัฏจักรการทำงานของพาร์เซลที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติค วัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์จึงน่าสนใจที่จะศึกษา จากการพิจารณาเอกสารงานวิจัยและพัฒนา รีเจนเนอเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติควัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์จะเป็นโลหะเช่น สแตนเลสสตีล เหล็ก ทองแดง อลูมิเนียม ซึ่งสามารถใช้ทดลองที่อุณหภูมิสูงมากได้ ในส่วนของวัสดุประเภทนวนมีข้อมูลไม่มากทั้งทางด้านการเลือกใช้วัสดุและคุณสมบัติที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคดังแสดงในตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยซึ่งเป็นข้อมูลทางด้านการเลือกใช้วัสดุที่เป็นประเด็นสำคัญที่น่าศึกษาเป็นอย่างยิ่งเพื่อเป็นองค์ความรู้สำหรับการประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคเพื่อการผลิตพลังงานทดแทนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยในปริญญานิพนธ์นี้มุ่งหมายในการเลือกใช้ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่หาได้ง่ายและราคาไม่แพงในท้องถิ่นมาทำเป็นรีเจนเนอเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติค

2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

2.1 เพื่อสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) แบบใช้อากาศเป็นสารทำงาน โดยมีรีเจนเนอเรเตอร์เป็นวัสดุประเภทนวนที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและราคาไม่แพง

2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติค

2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติค

3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ทำการวัดกำลังงานและประสิทธิภาพทางกำลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคที่ใช้ อากาศเป็นสารทำงาน 1 เครื่อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104 มิลลิเมตรโดยมีตัวแปรที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ สำหรับทดลองได้แก่ เม็ดดินเผา, เซรามิก และ ลูกแก้ว
ขนาดความยาว 111 มิลลิเมตร

3.2 รีเจนเนอเรเตอร์มีเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอยู่ในช่วง 40% 45% 50%

4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

4.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาไปสู่เครื่องยนต์
เทอร์โมอะคูสติกใช้พลังงานทางเลือกในอนาคตรวมทั้งการใช้เป็นต้นกำลังในภาคเกษตรกรรมโดยใช้
พลังงานสะอาดเช่น แสงอาทิตย์หรือวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมเป็นเชื้อเพลิง

4.2 ได้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อนำไปปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก
ให้ดีขึ้นและสามารถขยายขนาดกำลังการทำงานได้



บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกในประเทศไทย

สว่างทิพย์ และคณะ (Sawangtit; et al. 2004) สร้างชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเรอร์โมอะคูสติกประกอบด้วยลำโพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.06 เซนติเมตร ความต้านทาน 8 โอห์ม กำลังสูงสุดขนาด 10 วัตต์ บรรจุในกล่องพลาสติก โดย Function Generator ส่งสัญญาณรูปไซน์ ฝากส่งลำโพงต่อเข้ากับท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ความยาวท่อ 55 เซนติเมตร และหนา 0.15 เซนติเมตร ใช้อากาศเป็นสารทำงานรีเจนเนอเรเตอร์เป็นแบบกันหอยโดยรีเจนเนอเรเตอร์มีความยาว 10 เซนติเมตร รีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้ทดลองทำจากแผ่นพลาสติกบางจำนวน 3 แบบ ระยะห่างระหว่างชั้นแผ่นบางของรีเจนเนอเรเตอร์ 0.2, 0.8 และ 1.1 มิลลิเมตร และรีเจนเนอเรเตอร์อีกแบบทำจากแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะห่างระหว่างชั้นของรีเจนเนอเรเตอร์ 1.1 มิลลิเมตร ผลการทดลองที่ความถี่คลื่นเสียง 360 เฮิรซ์ แบบคลื่นนิ่งโดยใช้กำลังไฟฟ้า 2.6 วัตต์ ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างสองด้านของรีเจนเนอเรเตอร์ประมาณ 5 องศาเซลเซียสโดยใช้ รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างชั้น 0.8 มิลลิเมตร ระยะห่าง 0.8 มิลลิเมตร พบว่ารีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากพลาสติกให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมากกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากอลูมิเนียมอย่างชัดเจน

สุรเดช ศรีคำ (Suradaj; 2004) นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี ได้ออกแบบสร้างและการทดสอบเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกขนาดความจุกระบอกสูบกำลัง 14.04 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีอัตราส่วนการอัด 4.25:1 โดยใช้ปิโตรเลียมเหลวมีอัตราการป้อนค่าความร้อน 1940.337 จูลต่อวินาที เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกให้แรงบิดสูงสุด 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 ซึ่งผู้วิจัยจึงใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีสมการเชิงเดี่ยว (Simplex Model) และหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งผลจากการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ Hoffer

บัญชา คังตระกูล (Bancha; 2008) ได้นำเสนอการศึกษาหลักการทำงาน และพารามิเตอร์ในการออกแบบที่สำคัญของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบลูกสูบ ผลจากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของหลอดเสียงกับปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกขนาดเล็กพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 5 โดยประมาณ

สกล วิรุทธิกิจ (Sakon; 2008) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้โลหะสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเท่ากับ 101.4 มิลลิเมตร และ 98.7 มิลลิเมตรตามลำดับ ความยาว 600 มิลลิเมตร โดยเครื่องยนต์ให้ความเร็วรอบสูงสุดที่ 68.1 รอบต่อวินาที ที่ความดันภายในท่อเชื้อเพลิงไปยังเตาหัวเผาเท่ากับ 1.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สุรัชย์ และคณะ (Surachai; et al. 2009) นำเสนอผลการศึกษาเชิงการทดลองการทำงานเป็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยชุดทดลองนี้ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ท่อเสียงและรีเจนเนอเรเตอร์ ใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง จากผลการทดลองสามารถสร้างสภาวะคลื่นนิ่งภายในท่อเสียงของชุดทดลองได้ โดยพบว่าที่ความถี่ป้อนให้ลำโพงขนาด 145 เฮิรตซ์ ทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแตกต่างกันมากที่สุด

นราและบัญชา (Nara; & Bancha. 2011) ออกแบบการสร้างและการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกความจุกระบอกสูบ 14.04 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีอัตราส่วนการอัด 4.25:1 จากการทดสอบที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.04218 กรัมต่อวินาที ความร้อนที่ป้อนเข้า 1940.337 จูลต่อวินาที พบว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้กำลังบิดสูงสุด 0.007699 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็วรอบ 53.4 รอบต่อวินาที กำลังเพลาสุงสุด 52 มิลลิวัตต์ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 92 รอบต่อวินาทีและประสิทธิภาพเชิงความร้อน 0.0026 เปอร์เซนต์ที่ความเร็วรอบ 92 รอบต่อวินาทีที่อัตราการไหลของอากาศน้อยกว่านี้เครื่องยนต์จะให้กำลังเพล่าและแรงบิดต่ำกว่าที่ได้กล่าวมาแล้ว

อิสเรศ ฐุชกัลยา (Isares; 2011) กล่าวว่าเทคโนโลยีเทอร์โมอะคูสติกเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ที่สะอาดและน่าสนใจ ต้องการการบำรุงรักษาที่ต่ำและไม่มีสารเคมีอันตราย เนื่องจากใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นสารทำงานซึ่งเป็นมิตรกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเทคโนโลยีนี้จึงเป็นที่ดึงดูดนักวิจัยทั้งหลายเพื่อมาพัฒนาเทคโนโลยีนี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

อิสเรศ ฐุชกัลยา (Isares; 2012) ได้ศึกษาทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งโดยใช้สแต็กเป็นแบบแผ่นบางซ้อนกัน (slab stack) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วทำด้วย สแตนเลสตีลหนา 0.3 มม. มาวางซ้อนกันระยะห่างระหว่างแผ่น 0.5 มม. และใช้อากาศอัดที่ความดัน 10

บาร์ และ 5 บาร์ ผลการทดลองที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกันและอัตราส่วนกำลังขับที่ได้จากเครื่องยนต์นี้เป็นที่น่าพอใจสำหรับนำไปขับเคลื่อน

1.2 การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกในต่างประเทศ

เรย์ไลซ์ (Rayleigh; 1878) ในศตวรรษก่อน มีความเข้าใจในรูปลักษณะเชิงปริมาณของการแกว่งที่เกิดขึ้นจากความร้อนนี้ว่า “ถ้าให้ความร้อนแก่อากาศในขณะที่อากาศเกิดการควบแน่นสูงสุด (ความหนาแน่นมากที่สุด) หรือเอาความร้อนออกจากอากาศในขณะที่อากาศเบาบางที่สุด จะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น”

เฟลแมน (Feldman; 1968) ได้ศึกษา Sondhauss oscillations เครื่องเป่าแก้วที่เกิดก่อน Taconis oscillations เกณฑ์(Criterion)ของRayleigh เป็นที่ทราบกันว่าถูกนำมาใช้กับ Rijke oscillations การแกว่งที่คล้ายคลึงกันสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อการเผาไหม้ในโพรง (Cavity)

รอตท์ (Rott; 1969) ทำให้ความหมายของคำว่าเรอร์โมอะคูสติกว่าเป็นผลรวมกันของความถี่และความถี่ โดยได้พัฒนาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการแกว่งของเสียงในก๊าซที่อยู่ในช่องที่มี Temperature gradient ตามแนวแกน โดยขนาดตามแนวขวางของช่องอยู่ในอันดับของ Thermal penetration depth (ตามแบบฉบับ จะอยู่ในอันดับของ 1 มิลลิเมตร) โดย Rayleigh และ Kirchhoff ได้ศึกษาปัญหาเหล่านี้มาแล้วแต่ไม่มีความคืบหน้าทางทฤษฎี ในยุคของ Rott เมื่อพิจารณาแรงจูงใจที่จะทำให้เกิดความเข้าใจในปัญหานี้เพิ่มขึ้นจากปรากฏการณ์เย็นยิ่งยวดที่เรียกว่า Taconis oscillations ซึ่งเมื่อท่อที่มีก๊าซบรรจุอยู่มีอุณหภูมิลดจากอุณหภูมิบรรยากาศลงไปสู่อุณหภูมิเย็นยิ่งยวด โดยก๊าซจะแกว่งด้วยความถี่ที่ก๊าซสร้างขึ้นเอง โดยมีความร้อนจำนวนมากถ่ายเทจากบรรยากาศสู่สิ่งแวดล้อมเย็นยิ่งยวด

เซปเพอร์เลย์ (Ceperley; 1979) ได้เพิ่มเติมแนวคิดทางเสียงให้แก่เครื่องยนต์และเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง โดยตระหนักว่า Time phasing ระหว่างการแกว่งของความดันกับการเคลื่อนที่ที่เป็นหัวใจของเครื่องทำความเย็นทั้งหลาย คือคลื่นเสียงแบบเดินทาง

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

ซินน์ (Zinn; 1986) การแกว่งจะเกิดขึ้นเองถ้าการเผาไหม้แพร่อย่างรวดเร็วมากขึ้น หรือมีประสิทธิผลขึ้นในระหว่าง Compression phase ของการแกว่งของความดันมากกว่าในระหว่าง rarefaction phase การแกว่งเช่นนี้ในจรวดจะต้องถูกลดทอนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Catastrophic

damage แต่สภาวะนี้ต้องการให้เกิดขึ้นในเตาเผาก๊าซครัวเรือนและเครื่องทำน้ำร้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสภาวะดังกล่าว

สวิฟท์ (Swift; 1988) ทฤษฎีทางเทอร์โมอะคูสติกเริ่มต้นในปี 1868 เมื่อ Kirchhoff คำนวณการลดทอนลงของเสียงในท่อเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวท่อ และคลื่นเสียงในก๊าซ ต่อมา Kramers ได้ทำการทดลอง โดยพัฒนาการทดลองมาจาก Taconis ซึ่งเป็นการทดลองที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมอะคูสติก แต่ผลที่ได้ไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากขนาดของเครื่องที่ใหญ่เกินไป หลังจากนั้นอีก 20 ปี Rott ได้สร้างผลงานมากมายที่เป็นจุดเริ่มต้นของความเข้าใจในการทดลองของ Taconis ในที่สุด Rott และคณะก็กำหนดรากฐานของทฤษฎีเสียงที่เหมาะสมเพื่อเป็นพื้นฐานการทดลองทางเทอร์โมอะคูสติกทั้งแบบเครื่องยนต์หรือเครื่องต้นกำลังและแบบเครื่องทำความเย็น จะเป็นการใส่พลังงานความร้อนแล้วได้งานออกมา ส่วนแบบเครื่องทำความเย็นจะเป็นการใส่งานแล้วได้พลังงานความร้อนออกมา

รอต (Rott; 1991) กล่าวว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกสามารถใช้สูดความร้อนโดยใช้คลื่นเสียงหรือสูดคลื่นเสียงโดยใช้อุณหภูมิก๊าซได้ โดยพื้นฐานการเตรียมเป็นก๊าซเติมท่อเรโซแนนซ์ด้วยตำแหน่งของเอลิเมนต์เทอร์โมอะคูสติก เทอร์โมอะคูสติกสองชนิดที่ใช้ในเครื่องยนต์เหล่านี้คือตัวแลกเปลี่ยนความร้อนในคลื่นอะคูสติกระหว่างตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและกำเนิดหรือดูดซับกำลังอะคูสติก ผลที่ผ่านมาได้พัฒนาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกความพรุนรูปทรงเรขาคณิตแบบกลม, แผ่นขนาน, ก๊าซเติมเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก รวมทั้งรูปพรุนของหน้าตัดเรขาคณิตเข้าสู่การวิเคราะห์การไหลของพลังงานและการวัดทางอะคูสติก

ซู และมัตซึบารา (Zhou; & Matsubara. 1998) ทดลองวิจัยตัวขับเคลื่อนหลักเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก โดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์เป็นตาข่ายทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 49 มม. ยาว 140 และ 112 มม. และใช้ฉนวนเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและใช้ในโตรเจนและฮีเลียมเป็นสารทำงาน จากการทดลองได้ค่ากำลังสูงสุด 26 วัตต์ ความถี่, กำลังและความร้อนที่ป้อนเข้า 73 เฮิร์ต 833 วัตต์ และ 700 เคลวินตามลำดับ

คิมและคณะ (Kim; et al. 1998) ทดลองสมรรถนะอะคูสติกของเครื่องกำเนิดเทอร์โมอะคูสติกปิดปลายข้างหนึ่งที่ตำแหน่งสแต็กที่แตกต่างกัน จุดประสงค์ในการออกแบบแนะนำที่ คุณลักษณะของสแต็กทั้งทางด้านคำนวณและการวัดตำแหน่งของสแต็กสามารถหาตำแหน่งที่เหมาะสมได้จากความโปร่งของความถี่และความถี่เสียงที่ลดลง

ซูและมัตซึบารา (Zhou; & Matsubara.1998) ได้ทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยใช้ไส้ตะเกียงด้วยตะแกรงทองแดงและศึกษาอุณหภูมิและความถี่ที่เริ่มทำงานพบว่ากำลังสูงสุด 26 วัตต์ที่ความถี่ 73 เฮิร์ต กำลังที่ป้อนเข้า 833 วัตต์และอุณหภูมิฮีทเตอร์ 700 เคลวิน

แอตเตฟและฮอฟเลอร์ (Adeff & Hofler. 2000) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์พลังงานแสงอาทิตย์ขับเคลื่อนเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ผลการทดลองอุณหภูมิของไส้ตะเกียง 475 องศาเซลเซียส เครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกผลิตได้ 2.5 วัตต์ได้อุณหภูมิทำความเย็นที่ 5 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแตกต่างกัน 18 องศาเซลเซียส

แบคคาส และสวift (Backhaus; & Swift. 2000) ได้ศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเทอร์โมอะคูสติกโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ยาว 7.3 ซม. ทำด้วยตาข่ายสเตนเลสสตีล 120 แมช เส้นศูนย์กลาง 8.89 ซม. การวิเคราะห์นี้ประสบความสำเร็จเป็นแนวทางสู่การวิจัยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเทอร์โมอะคูสติกแบบไฮบริดในอนาคต

บิว่าและคณะ (Biwa; et al. 2001) ทำการทดลองวัดการไหลของงานในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบทอวนประกอบด้วยตัวระบายความร้อนและได้พัฒนาเทคนิคการทดลองหาการไหลของงานในอุปกรณ์เทอร์โมอะคูสติกและประยุกต์สู่เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกประกอบในท่อเรโซแนนซ์แบบวนรอบ ใช้ไส้ตะเกียงจากเซรามิกมีช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ ความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์ 35 มิลลิเมตรและช่องเล็กๆขนาด 1.03 มิลลิเมตร

รัสเซลและไวบูล (Russell; & Weibull. 2002) สร้างเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกตั้งโต๊ะเพื่อการสาธิตโดยใช้กล่องลำโพง ท่ออะคลิลิกและแผ่นซีท ฟิมล์ม้วน 35 มิลลิเมตร เอ็นटकปลาและอลูมิเนียมปลั๊ก จากการทดลองได้อุณหภูมิแตกต่างกันมากกว่า 15 องศาเซลเซียส

สวift (Swift; 2002) ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ต่อจาก Rott เพื่ออธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกที่เกิดจากของไหลเมื่อถูกสั่นด้วยคลื่นเสียงแบบคลื่นนิ่ง ที่มีแผ่นบางวางขนานกับทิศทางการสั่นของคลื่นนิ่ง หรือ รีเจนเนอเรเตอร์ ที่เป็นอุปกรณ์หลักของเครื่องทำความเย็น สมการคณิตศาสตร์หามาจากสมการต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงานของของไหลที่สั่นบนแผ่นบาง แล้วทำการลดรูปสมการลงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ จากนั้นหาผลเฉลยด้วยวิธี Complex Exponential ได้ผลเฉลยของอุณหภูมิ, Heat Flux, กำลังเสียง, ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) และประสิทธิภาพ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังยกตัวอย่างเครื่องทำความเย็น หรือทำความร้อน และเครื่องต้นกำลังในแบบต่างๆ เพื่อให้เข้าใจการทำงานยิ่งขึ้น ปัจจุบันทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกของ Swift ได้รับการยอมรับ และนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง จึงถือได้ว่าเป็นทฤษฎีพื้นฐานในการสร้างเครื่องจักรกลเทอร์โมอะคูสติก นอกจากนี้ Swift และผู้ร่วมงานยังได้พัฒนา

โปรแกรม DELTAEC (Design Environment for Low-amplitude Thermo Acoustic Energy Conversion) ขึ้นมาใช้ในการศึกษา และออกแบบเครื่องเรอร์โมอะคูสติก

ยูดาและคณะ (Ueda; et al. 2004) ได้ศึกษาทดลองทางเรอร์โมอะคูสติกและประยุกต์ตัวระบายความร้อน กล่าวว่าเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกมีแบบเดียวกันมีรายงานทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 30 เปอร์เซ็นต์และจากการทดลองเครื่องระบายความร้อนเรอร์โมอะคูสติกนี้ได้กำเนิดอุณหภูมิที่ -25 องศาเซลเซียสโดยไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่เลย

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

ซากาโมโตะและวาตานาเบะ (Sakamoto; & Watanaabe; 2004) ได้ศึกษาทดลองตัวระบายความร้อนของอุปกรณ์เรอร์โมอะคูสติก การทดลองศึกษาตัวระบายความร้อนที่ประกอบในเครื่องทดลองเรอร์โมอะคูสติกแบบวนรอบใช้อากาศและแก๊สฮีเลียมเป็นสารทำงานหรือเปิดสู่บรรยากาศ รีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้เป็นเซรามิกมีช่องเล็กๆ 1200 ช่อง ความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์ 50 มิลลิเมตร จากการทดลองได้เสนอการปรับปรุงระบบโดยเปลี่ยนตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์

แลมปี (Lamp; 2008) ออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เรอร์โมอะคูสติกโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีต้นแบบรวดเร็ว (Rapid prototyping) วัสดุที่ใช้ทำเป็นแบ่งในลอน 3 แบบคือ แบบสี่เหลี่ยม, แบบแผ่นขนานและแบบเข็ม โดยใช้เครื่องขยายขนาด 12 วัตต์ 130 มิลลิวัตต์ ความถี่ 275 เฮิร์ต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเสต็กแบบแผ่นขนานให้ค่าตอบสนองดีที่สุด

คอนสแตนตินและคณะ (Konstantin; et al. 2008) ได้สร้างเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกขนาดยาว 58 มิลลิเมตรและ 93 มิลลิเมตร ใช้อากาศเป็นสารทำงานที่ความดันบรรยากาศ ทดสอบโดยใช้สแต็กเป็นอาร์วีซีและฝอยเหล็ก เครื่องยนต์กำเนิดเสียงที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิแตกต่างระหว่างร้อนกันเย็นของชิ้นส่วนของระบบ ประสิทธิภาพการผลิตกำลังอะคูสติกและประสิทธิภาพเรอร์โมอะคูสติกของเครื่องยนต์คือ 20-70 มิลลิวัตต์และ 2-4 เปอร์เซ็นต์

เซตตาร์ (Settar; 2008) ได้ทำการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของรีเจนเนอเรเตอร์ในเรอร์โมอะคูสติก โดยรีเจนเนอเรเตอร์เป็นแบบแผ่นขนาน,แบบม้วนขดและแบบรังผึ้ง ทำด้วยกระดาษและฟิล์มหนา 0.1 และ 0.2 มิลลิเมตร ใช้ท่อพีวีซีเป็นท่อเรโซแนนท์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเสต็กแบบแผ่นบางทำจากแผ่นฟิล์มให้ค่าแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดเปรียบเทียบกับรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำด้วยกระดาษ อุณหภูมิที่ได้ต่ำกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 3.5 องศาเซลเซียส

ชาเชนและคณะ (Chao Shen; et al. 2009) ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยใช้ของไหลทำงานที่แตกต่างกันและทดสอบที่มุมเอียงที่ -90 ถึง 90 องศาปรับครั้งละ 45 องศาผลที่ได้รับจากการทดลองทำให้เห็นว่ามุมเอียงมีผลต่ออุณหภูมิเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

การ์ตเนอร์ และโฮวเวิร์ด (Gardner; & Howard. 2009) ได้ศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและเครื่องทำความเย็น ขับเคลื่อนด้วยพลังงานความร้อนทั้ง โดยรีเจนเนอเรเตอร์รูปทรงรังผึ้ง ทำด้วยสแตนเลสสตีลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 155 มม. มีความยาวของแอสติกเท่ากับ 12 มม. ซึ่งแหล่งความร้อนได้มาจากความร้อนทิ้งจากไอเสียเครื่องยนต์สันดาปภายใน

อับดุลราฮ์มันและคณะ (Abdulrahman; et al. 2009) ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยเลือกใช้วัสดุทำรีเจนเนอเรเตอร์ต้นทุนต่ำได้แก่ ตะแกรงโลหะ เซรามิกและฟอยล์สแตนเลสสตีล พบว่าตะแกรงโลหะให้สมรรถนะที่ดีที่สุด เซรามิกให้ผลพอใช้และฟอยล์สแตนเลสสตีลให้สมรรถนะแย่ที่สุดในวัสดุที่นำมาทดสอบสามชนิด

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

มาตาวิฟปี (Matveev; 2010) ได้วิเคราะห์พลังงานเทอร์โมอะคูสติกของสแต็กแบบเข็มขวาง และแบบซับซ้อนซึ่งนำผลจากการทดลองและโมเดลมาเปรียบเทียบ

ทาสนิม (Tasnim; 2011) ได้วิเคราะห์ความไม่สามารถย้อนกลับได้ในสแต็กเทอร์โมอะคูสติกในทอมของเอนโทรปีรีเจนเนอเรชัน โดยใช้สแต็กทำจากทองแดง อลูมิเนียมและอาร์วีซีการทดลองทำการวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นปลายสแต็กผลการทดลองที่ได้รับด้านคุณภาพพอยอมรับได้ระหว่างการทดลองและผลการวิเคราะห์

อับดุลราฮ์มัน และคณะ (Abdulrahman; et al. 2011) ทำการศึกษาวัดผลการเลือกวัสดุพรุนราคาต่ำสามชนิดใช้เป็นวัสดุของรีเจนเนอเรเตอร์ในการออกแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเคลื่อนเดินทาง วัสดุที่ใช้ทดสอบคือ เซรามิกเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็กๆ, ฟอยล์เหล็กสำหรับขัดและใยสแตนเลสสตีลคล้ายขนสัตว์, สแตนเลสสตีลสานเป็นตะแกรง ปรากฏว่าสมรรถนะของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจาก ฟอยล์เหล็กสำหรับขัดและใยสแตนเลสสตีลคล้ายขนสัตว์นั้นแย่กว่าใช้สแตนเลสสตีลที่สานเป็นตะแกรงและเสนอการให้เซรามิกช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็กๆเป็นทางเลือกเพื่อลดต้นทุน

ทาสนิม (Tasnim; 2011) ได้ศึกษากระบวนการและการวัดของรีเจนเนอเรเตอร์ทางเทอร์โมอะคูสติกแบบพรุนพบว่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันผ่านปลายรีเจนเนอเรเตอร์ เปรียบเทียบการทดลอง

กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับผลลัพธ์ที่ดีและยอมรับได้ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง ทั้งนี้ยังได้ทดลองโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์แบบประกบกับเป็นชั้นทำด้วย อาร์วีเอโฟม, เซรามิกและอลูมิเนียมโฟม ทั้งหมด 8 แบบ ผลการทดลองพบว่ารีเจนเนอเรเตอร์ที่ประกอบด้วย เซรามิกประกบหน้าหลังด้วยอาร์วีเอโฟม ได้ผลดีที่สุดและเสนอแนะสำหรับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกต้องการให้ความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์สั้นลง

ฮาริฮารันและคณะ (Hariharan; et al. 2012) กล่าวว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นคลื่นเสียงโดยใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกหรือตัวทำความเย็นพัลส์ทูปโดยเปลี่ยนแทนลูกสูบทางกลเช่น คอมเพรสเซอร์รวมทั้งศักยภาพของเทคโนโลยีเทอร์โมอะคูสติกไม่มีวัฏศุนีพิช ต้นทุนที่ต่ำและมีความเชื่อมั่นสูงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นอัดไอ ในการทดลองจะปรับและออกแบบพารามิเตอร์ง่าย ๆ เครื่องยนต์ผลิตพลังงานอะคูสติกที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 350-450 เคลวินตามยาวสแต็คของระบบ งานเป็นผลจากอิทธิพลพารามิเตอร์ของ สแต็คเช่น ความหนาแน่นและช่องว่างของแผ่นกับความยาวตัวเรโซแนนซ์ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก การวัดในเทอมของความดันที่แตกต่างกันของอุณหภูมิเริ่มทำงาน ความถี่เรโซแนนซ์และแอมพลิจูดความดันใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน ผลที่ได้รับจากการทดลองได้ผลดียอมรับได้ตามทฤษฎีจากผลลัพธ์ของเดลต้าอีซี

ลินและคณะ (Lin; et al. 2013) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอ็กเซอียและพลังงานอะคูสติกของต้นแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกวัฏจักรไมโคร อธิบายได้ว่าความต้านทานความร้อนได้วิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์โวลุ่มเทอร์โมอะคูสติกตลอดจนจุดประสงค์ของฟังก์ชันกล่าวว่าเราไม่เพียงแต่ได้รับประสิทธิภาพเอ็กเซอียสูงแต่ยังรับกำลังอะคูสติกสูงในเวลาเดียวกัน เราศึกษาเน้นประสิทธิภาพเอ็กเซอียเท่านั้น เราได้รับผลสรุปโดยการคำนวณเชิงตัวเลขผลที่ได้รับจะนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกจริง

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

กิและจอง (Ki; & Jeong. 2013) ได้ศึกษารูปร่างและสมรรถนะของเครื่องยนต์พัลส์ทูปเป็นการประดิษฐ์คิดค้นและค้นคว้าในงานวิจัยนี้ แนวคิดการไหลของพลังงานและความคล้ายคลึงของเครื่องจักรอะคูสติกสามารถทำให้ออกแบบได้หลากหลายชนิดของเครื่องยนต์พัลส์ทูป เป็นการจำแนกด้วยส่วนประกอบของพัลส์ทูปด้วยสองลูกสูบหรือลูกสูบเดี่ยวและแบบเรียง โดยเฉพาะ

เครื่องยนต์พัลส์ทูปลูกสูบเดี่ยวเป็นพื้นฐานเป็นที่รู้จักกันดีในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพคาร์โนของเครื่องยนต์พัลส์ทูปอยู่ที่ 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์

หวัฟางกั้งและคณะ (Huifang Kang; et al. 2013) ศึกษาวิจัยโดยทดสอบรูปร่างของตัวขับเคลื่อนระบายความร้อนต่อตรงกับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ประกอบด้วยเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเคลื่อนที่ เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเคลื่อนที่เดินทาง จากการคำนวณเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแปลงประสิทธิภาพของสามระยะได้คือประสิทธิภาพระยะที่ 1 เท่ากับ 26.2 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพที่ 2 เท่ากับ 34.3 เปอร์เซ็นต์ และค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นเท่ากับ 2.67

ตารางที่ 1 สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยด้านวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานเป็นรีเจนเนอเรเตอร์

นักวิจัย	วัสดุที่ใช้ทำ รีเจนเนอเรเตอร์	เปอร์เซ็นต์ ช่องว่าง	ผลที่ได้รับ
Zhou & Matsubara (1998) ชู และ มัตซึบารา	Stainless	-	ป้อนกำลัง 833 วัตต์ ความถี่ 73 เฮิร์ต อุณหภูมิ 700 K ได้กำลังสูงสุด 26 วัตต์
Ki & Jeong.(2013) กิ และ จวง	Stainless steel	-	ได้ประสิทธิภาพคาร์โนอยู่ระหว่าง 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์
Backaus & Swift (2000) เบคคาลัส และ สวิฟท์	Stainless steel	72%	เครื่องยนต์ให้กำลังที่ 710 วัตต์ และ 41 เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพคาร์โน
Huifang Kang; et al. (2013) หวัฟางกั้งและคณะ	Stainless steel	65%-75%	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ระหว่าง 26.2 ถึง 34.3 เปอร์เซ็นต์ และค่า COP =2.67
Abdulrahman; et al. (2009) อับดุลราฮ์มและคณะ	Stainless steel Ceramic	70%-95%	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิ เริ่มทำงานขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดรีเจน เนอเรเตอร์
Ueda; et al. (2004) ยูดา และคณะ	Stainless steel	-	ป้อนกำลัง 210 วัตต์ ทำความเย็นได้ที่ -20 องศาเซลเซียส

นักวิจัย	วัสดุที่ใช้ทำ รีเจนเนอเรเตอร์	เปอร์เซ็นต์ ช่องว่าง	ผลที่ได้รับ
W.V.Slaton. (2010) ดับเบิลยู วี สลาตัน	Aluminium	55%-99%	ให้พลังงานไฟฟ้า 276 วัตต์ อุณหภูมิ แตกต่างของสแต็ก 185 เคลวิน
Tasnim. (2011) ทาสนิม	Copper Aluminium RVC	-	การทดลองทำการวัดอุณหภูมิที่แตกต่าง ที่เกิดขึ้นปลายสแต็กผลการทดลองที่ ได้รับด้านคุณภาพพอยอมรับได้ระหว่าง การทดลองและผลการวิเคราะห์
Russell & Weibull. (2002). รัสเซล และ ไวบูล	Film Sheet	-	จากการทดลองได้อุณหภูมิแตกต่างกัน มากกว่า 15 องศาเซลเซียส
Konstantin; et al. (2008). คอนสแตนติน และคณะ	RVC Steel wool	-	เครื่องยนต์กำเนิดเสียงที่อุณหภูมิ 250- 350 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิแตกต่าง ระหว่างร้อนกันเย็นของชิ้นส่วนของระบบ ประมาณการผลิตกำลังอุณหภูมิต่ำและ ประสิทธิภาพเทอร์โมอะคูสติกของ เครื่องยนต์คือ 20-70 มิลลิวัตต์และ 2-4 เปอร์เซ็นต์
Lamp. (2008). แลมปี	Nylon powder	-	ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสแต็กแบบ แผ่นขนานให้ค่าตอบสนองดีที่สุด
Sakamoto & Watanaabe. (2004). ซากาโมโตะและ วาทานาเบะ	Ceramic	-	จากการทดลองได้เสนอการปรับปรุง ระบบโดยเปลี่ยนตำแหน่งของรีเจนเนเร เตอร์
Abdulrahman; et al. (2010). อับดุลราฮ์มและคณะ	Ceramic Steel Stainless Steel Wire mesh	88.7 90.7,94.2 91.6 72.7,67.5	ฝอยเหล็กสำหรับขัดและใยสแตนเลสดีล คล้ายขนสัตว์นั้นแยกกว่าใช้สแตนเลสดีล สานเป็นตะแกรงและเสนอการใช้เซรามิค เป็นทางเลือกเพื่อลดต้นทุน

จากการทบทวนวรรณกรรมและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาจีโนมเอนเรเตอร์ ในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกดังตารางที่สรุปสาระสำคัญพบว่า ไม่สามารถเปรียบเทียบพลังงานและประสิทธิภาพกันได้ เนื่องจากความแตกต่างของขนาด, ชนิดเครื่องยนต์และลักษณะการทดลองของจีโนมเอนเรเตอร์ ดังนั้นการศึกษาในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาโดยใช้เครื่องยนต์ที่ขนาดเท่ากัน ต่างกันที่วัสดุที่ใช้ทำจีโนมเอนเรเตอร์และระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของวัสดุที่ใช้ทำเป็นสำคัญ

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 โดยการประมาณค่าปริมาณต่าง ๆ ที่สั่นด้วยความถี่ ω 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 และสมมุติว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วของของไหลในแนวความยาวท่อ $\mu_m = 0$ สำหรับ

สมการทั่วไปที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกประกอบด้วยสมการคลื่น 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

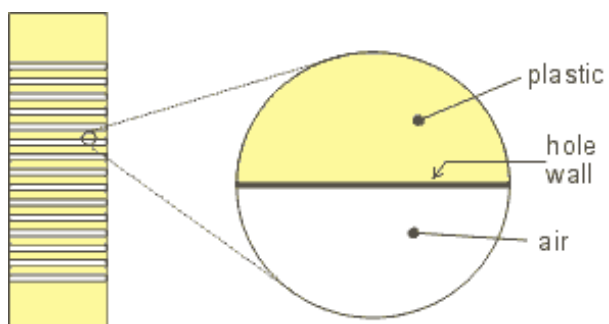
พิจารณารีเจเนอเรเตอร์ที่สร้างจากพลาสติก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยรูขนาดเล็กเจาะทะลุโดยตลอด อุณหภูมิของผนังรูมีความแตกต่างกัน โดยปลายรีเจเนอเรเตอร์ด้านขวามือต่อเข้ากับท่อทองแดงร้อนและปลายรีเจเนอเรเตอร์ด้านซ้ายมือต่อกับท่อทองแดงซึ่งเย็นกว่า สมมติว่าอุณหภูมิของผิวรูใน รีเจเนอเรเตอร์นี้เปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 5 พิจารณาลูกกลมๆ ไปถึงอากาศที่อยู่ภายในรูเล็กๆ ส่วนหนึ่งที่อยู่ติดกับผิวรูเล็กๆ นี้ เลือกปริมาตรของอากาศส่วนหนึ่ง อากาศส่วนนี้ควรมีขนาดพอสมควรที่จะเป็นไปตามกฎทางอุณหพลศาสตร์ เรียกอากาศส่วนนี้ว่าพาร์เซล (Parcel) ของอากาศ แล้วพิจารณาการเคลื่อนที่ของพาร์เซลไปตามรูเล็กๆ นี้

ภาพประกอบ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิววูรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator temperature gradient) ซึ่งขึ้นอยู่กับโคออร์ดิเนต x ซึ่งอากาศเกิดการแกว่งไปตามแนวแกนของรู ซึ่งการเคลื่อนที่แบบแกว่งนี้จะเป็นในรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal motion) ในขณะที่พาร์เซลอยู่ที่จุด 1 อุณหภูมิของพาร์เซลจะเท่ากับผิววูที่พาร์เซลติดอยู่ เมื่อพาร์เซลเคลื่อนที่ไปอยู่ที่จุด 2 อุณหภูมิของพาร์เซลจะสูงขึ้นเพราะว่าในขณะที่พาร์เซลเคลื่อนที่พาร์เซลจะถูกอัดด้วย แต่อุณหภูมิของพาร์เซลยังคงต่ำกว่าผิววู ดังนั้นในช่วงนี้พาร์เซลจะได้รับความร้อนจากผิววู อุณหภูมิของพาร์เซลจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับผิววู (จุด 3) ระหว่างกระบวนการ 2-3 นี้ พาร์เซลจะขยายตัว ดังแสดงในรูปที่ 6 ในขั้นต่อไป พาร์เซลจะเคลื่อนที่กลับไปสู่ตำแหน่งเดิม เป็นจุด 4 เนื่องจากพาร์เซลได้รับความร้อนในกระบวนการ 2-3 อุณหภูมิของพาร์เซลจึงสูงกว่าผิววู ดังนั้นในช่วงนี้พาร์เซลจึงถ่ายเทความร้อนให้ผิววูและเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับผิววู เป็นจุด 1 เมื่อพาร์เซลเย็นตัวลงปริมาตรของพาร์เซลจึงลดลง

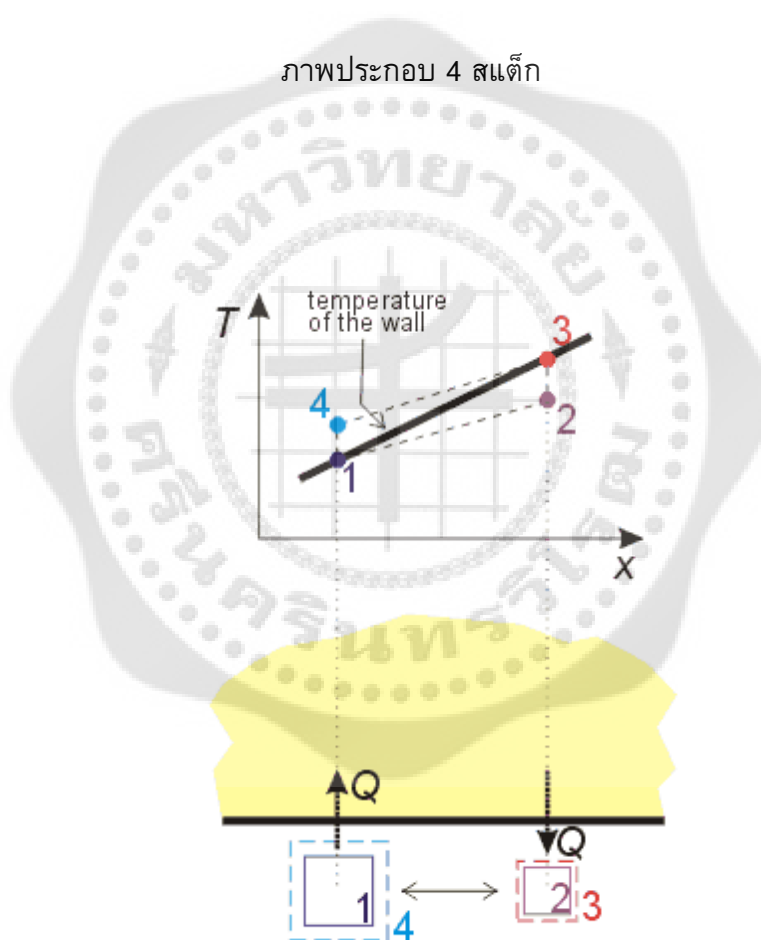
ในวัฏจักรที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พาร์เซลนำความร้อนจากผิววูที่อุณหภูมิสูงไปส่งให้แก่ผิววูที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวมาแล้วประกอบด้วยกระบวนการอาเดียบาติก 2 กระบวนการ (1-2 และ 3-4) และกระบวนการความดันคงที่ 2 กระบวนการ (2-3 และ 4-1) พื้นที่ที่ถูกล้อมรอบด้วยกระบวนการทั้ง 4 ในแผนภาพความดัน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

วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวมาแล้วนั้นคล้ายกันกับวัฏจักรหนึ่งซึ่งรู้จักกันในชื่อของวัฏจักรสเตอร์ลิง โดยคลื่นเสียงทำหน้าที่เป็นลูกสูบทั้งสองลูกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ด้วยหลักการของเทอร์โมอะคูสติก จึงเป็นไปได้ที่จะสร้างและขยายคลื่นเสียงโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ พลังงานความร้อนถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานเสียงซึ่งสามารถพิจารณาให้เป็นพลังงานกลรูปหนึ่งได้

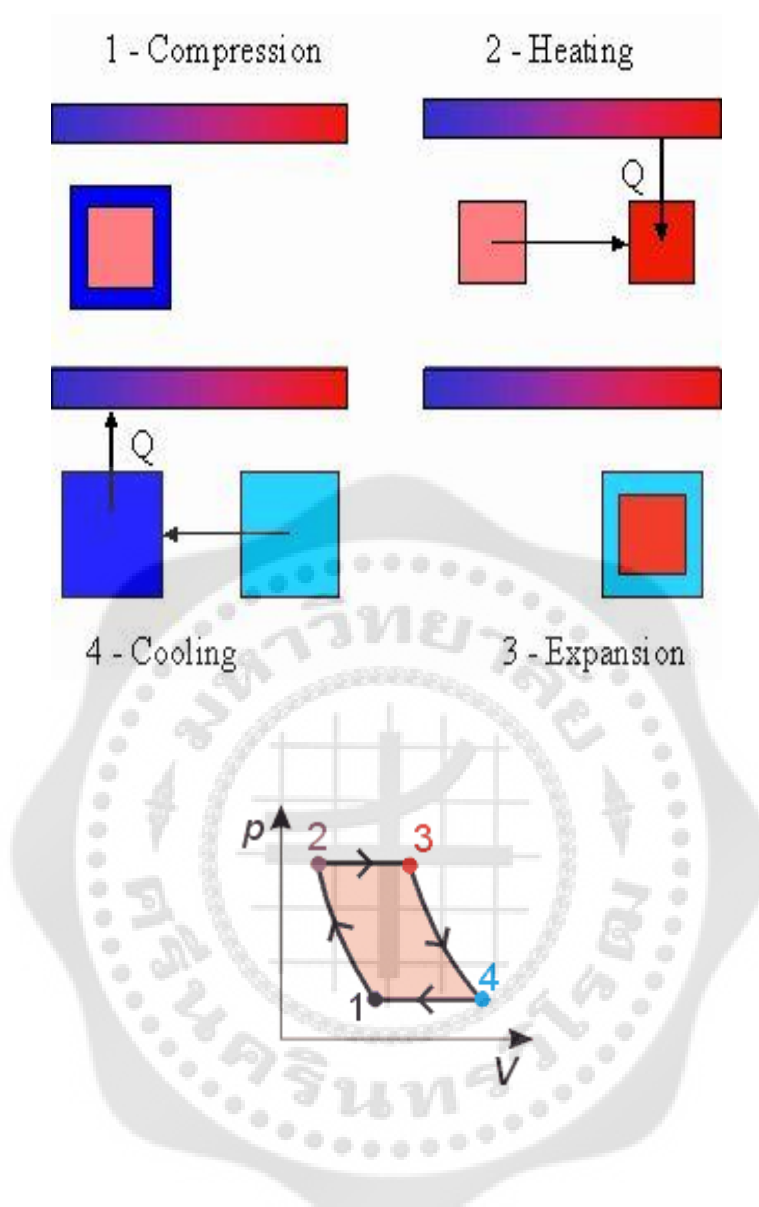
ลักษณะการทำงานของวัฏจักรที่กล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่าพาร์เซลรับความร้อนจากผิววูที่มีอุณหภูมิสูงกว่าแล้วคายความร้อนให้กับผิววูที่มีอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนระหว่างพาร์เซลกับผิววูของวัฏจักรได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 6 ระหว่างการทำงานในแต่ละวัฏจักร จะเห็นได้ว่าพาร์เซลถูกอัดที่อุณหภูมิต่ำและขยายตัวที่อุณหภูมิสูง นั้นหมายความว่าเกิดงานขึ้นกับพาร์เซล ผลของงานที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้คลื่นเสียงเกิดการแกว่งของความดันขึ้น



ภาพประกอบ 4 สแต็ก



ภาพประกอบ 5 การถ่ายเทความร้อนของพาร์เซล

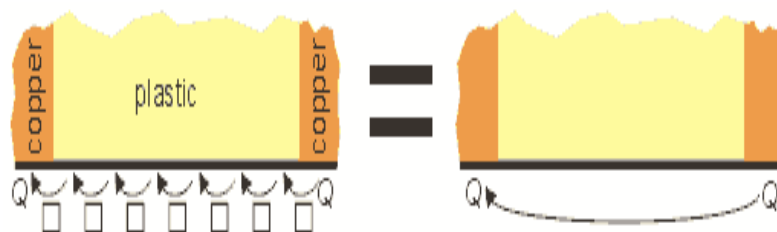


ภาพประกอบ 6 วัฏจักรการทำงานของพาร์เซล

2.4 การถ่ายเทความร้อนผ่านรีเจนเนอเรเตอร์

สำหรับพาร์เซลอื่นๆที่อยู่ติดกันก็จะเกิดผลทางเทอร์โมอะคูสติกในทำนองเดียวกันแต่ละพาร์เซลจะได้รับงานแล้วเคลื่อนย้ายความร้อนสู่ด้านซ้ายมือ ความร้อนที่แต่ละพาร์เซลได้รับในวัฏจักรหนึ่งจะถูกส่งต่อไปสู่พาร์เซลที่อยู่ติดกันวัฏจักรถัดไปในวัฏจักรหนึ่งพาร์เซลทั้งหมดจะถ่ายเทความร้อนจากด้านร้อน (ขวามือ) ไปสู่ด้านเย็น ดังแสดงในภาพประกอบ 7 งานที่พาร์เซลได้รับคือพลังงานเสียงที่เพิ่มขึ้นของหลอดเสียง เมื่อหลอดเสียงเกิดการสะท้อน (Resonate) พลังงานเสียงก็

จะแผ่กระจายออกไปเพื่อจะหยุดส่งเสียงทันทีที่ไม่ได้รับพลังงานชดเชยเข้ามา พลังงานที่สูญเสียไปจะเปลี่ยนไปเป็นงานที่พาร์เซลได้รับ



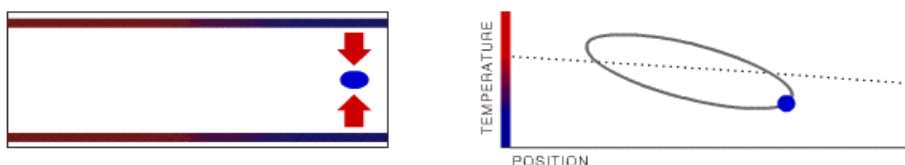
ภาพประกอบ 7 การถ่ายเทความร้อนผ่านสแต็ก

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแกรเดียนต์กับรีเจนเนอเรเตอร์ แบ่งได้เป็น 3 กรณี
คือ

2.5.1 สภาวะเมื่ออุณหภูมิแกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์ ต่ำกว่าพาร์เซล

ถ้ามีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและอากาศมีการแกว่งรีเจนเนอเรเตอร์จะรับพลังงานเสียงแล้วจะเปลี่ยนไปเป็นเครื่องสูบลมความร้อนก็ต่อเมื่อ อุณหภูมิแกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์ต่ำกว่าอุณหภูมิแกรเดียนต์ของพาร์เซลในกรณีนี้พาร์เซลจะรับความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ ที่ปลายเย็นในการเคลื่อนที่ของพาร์เซลแล้วระบายความร้อนนี้กลับคืนให้แก่รีเจนเนอเรเตอร์ที่ปลายด้านร้อน

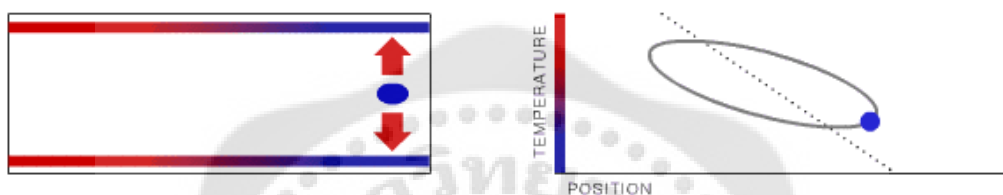
จากภาพประกอบ 8 ความชันของอุณหภูมิแกรเดียนต์ของรีเจนเนอเรเตอร์ ไม่ชันมากเท่ากับของพาร์เซล ดังนั้นจึงมีการไหลของความร้อนขึ้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้พาร์เซลเคลื่อนที่เป็นวงรีพาร์เซลจะเปลี่ยนพลังงานเสียงของคลื่นเสียงเป็นพลังงานบ้อนเข้า ทำให้ปลายด้านร้อนมีความร้อนมากขึ้นและปลายด้านเย็นมากขึ้น ในกรณีนี้การทำงานจะเป็นเครื่องสูบลมความร้อนหรือเครื่องทำความเย็น



ภาพประกอบ 8 กรณีอุณหภูมิแกรเดียนต์ของพาร์เซลชันมากกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์

2.5.2 สภาวะเมื่ออุณหภูมิการเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์สูงกว่าพาร์เซล

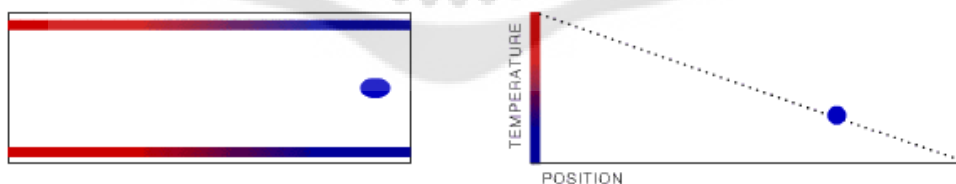
เมื่ออุณหภูมิการเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์ มีความชันมากกว่าของพาร์เซลในกรณีนี้ พาร์เซลจะรับความร้อนจากปลายด้านร้อนแล้วส่งกลับคืนที่ปลายด้านเย็น ซึ่งเป็นการให้พลังงานแก่คลื่นเสียง โดยใช้แหล่งความร้อนเป็นแหล่งให้พลังงาน ในกรณีนี้การทำงานเป็นแหล่งพลังงานเสียง พลังความร้อนเป็นเครื่องต้นกำลังซึ่งบางครั้งเรียกว่า Howler นั่นคือเครื่องยนต์ใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เกิดเสียงที่ความถี่พ้อง (Resonant frequency) ขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 กรณีอุณหภูมิการเดียนท์ของพาร์เซลชันน้อยกว่าของรีเจนเนอเรเตอร์

2.5.3 สภาวะเมื่ออุณหภูมิการเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับพาร์เซล

สภาวะที่ปลายด้านหนึ่งของรีเจนเนอเรเตอร์ ร้อนโดยที่ปลายอีกข้างหนึ่งเย็นถ้าไม่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิการเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์ จะเท่ากับอุณหภูมิการเดียนท์ของพาร์เซลจะไม่เกิดงานขึ้นและไม่มีพลังงานไหลเข้าหรือไหลออก แสดงภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 กรณีอุณหภูมิของพาร์เซลเท่ากับรีเจนเนอเรเตอร์

เพื่อให้ได้ปฏิสัมพันธ์ที่ดีระหว่างคลื่นเสียงกับรีเจนเนอเรเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์จึงสร้างขึ้นจากโลหะพรุน ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงโดยการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานความร้อนน้อยมากอุณหภูมิการเดียนท์ของรีเจนเนอเรเตอร์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนติดไว้ที่ปลายทั้งสองด้าน

2.6 หลักการถ่ายทอดพลังงานด้วยรีเจนเนอเรเตอร์

จากผลเรอร์โมอะคูสติกที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าสามารถนำเอาหลักการนี้ไปสร้างเป็นเครื่องยนต์และเครื่องสูบลมความร้อน ซึ่งมีหลักการทำงานโดยสังเขปดังนี้

2.6.1 การทำงานเป็นเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก

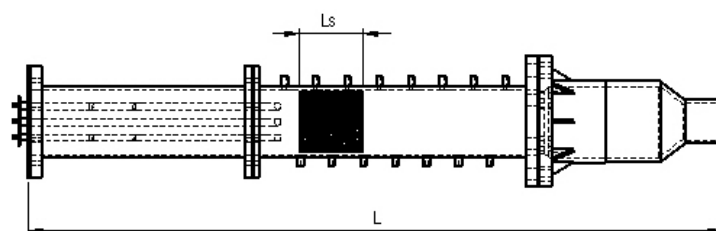
เมื่อรีเจนเนอเรเตอร์มีอุณหภูมิแปรผันขึ้นลงโดยการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่จากด้านเย็นผ่านพาร์เซล พาร์เซลจะถูกอัดด้วยคลื่นความดัน (Pressure wave) ที่อัดผ่าน พาร์เซลจึงเคลื่อนที่ไปสู่รีเจนเนอเรเตอร์ด้านร้อน เนื่องจากรีเจนเนอเรเตอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าพาร์เซล พาร์เซลจึงร้อนขึ้นคลื่นความดันซึ่งในตอนแรกอัดพาร์เซลในตอนนี้จะทำให้พาร์เซลขยายตัว สุดท้ายพาร์เซลจะเคลื่อนที่กลับไปสู่ตำแหน่งเดิมซึ่งพาร์เซลยังคงมีอุณหภูมิสูงกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ทำให้ความร้อนถ่ายเทจากพาร์เซลสู่รีเจนเนอเรเตอร์

2.6.2 การทำงานเป็นเครื่องสูบลมความร้อนเรอร์โมอะคูสติก

เครื่องสูบลมความร้อนจะทำงานโดยเกิดกระบวนการต่าง ๆ กลับกันกับของเครื่องยนต์ที่กล่าวมาแล้ว วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์เกิดขึ้นในทิศทางย้อนกลับ นั้นย่อหมายความว่า พลังงานเสียงถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน ในกรณีของเครื่องสูบลมความร้อน ความร้อนถูกสูบลมจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูง เนื่องจากสารตัวกลางเป็นอากาศ ดังนั้นจึงดูเหมือนกับว่าจะไม่มีข้อจำกัดในการใช้เครื่องสูบลมความร้อนแบบนี้ ไม่มีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติกกับเครื่องสูบลมความร้อนเรอร์โมอะคูสติก ความแตกต่างเพียงอย่างเดียวก็คือทิศทางที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ข้ามอุณหภูมิแปรผันขึ้นลง

2.7 การหาความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์

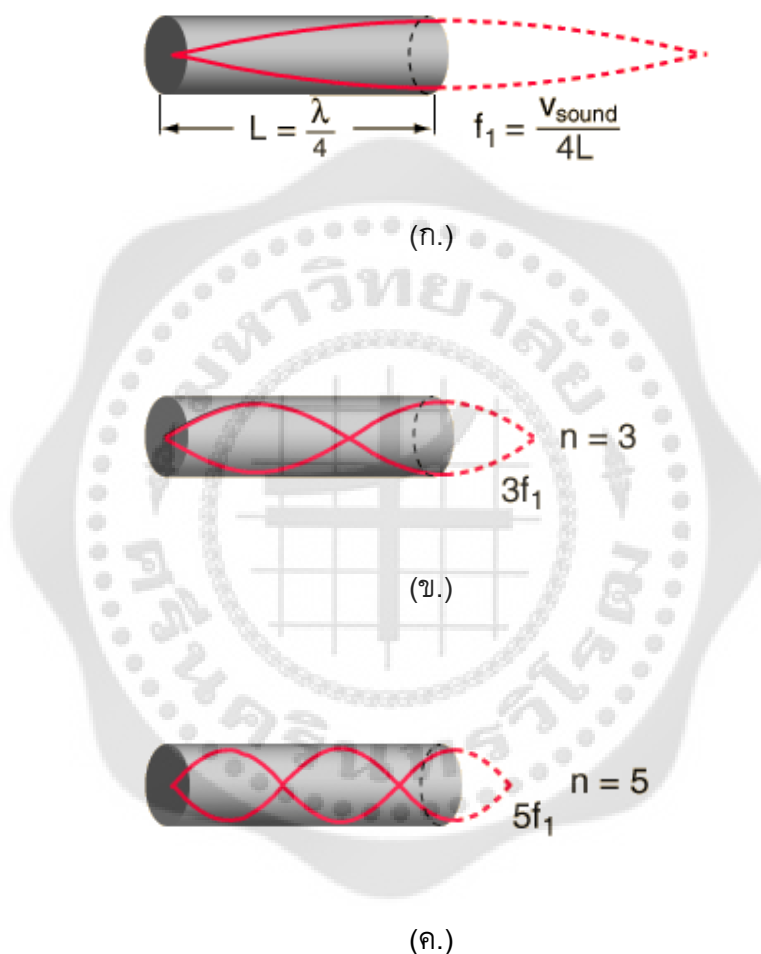
จากผลการศึกษาและวิจัยของผู้เชี่ยวชาญและคณะผู้วิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในปี ค.ศ. 1996 (พ.ศ. 2539) โดย Cao; et.al. ได้แนะนำความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์ $L_r = 2.4\% \text{ of } \lambda$ ในปี ค.ศ. 2001 (พ.ศ. 2544) โดย Tijani รีเจนเนอเรเตอร์ควรออกแบบให้สั้นเท่าที่ทำได้ $L_r \ll \lambda / 2\pi$ หรือ v/ω ในการทดลองนี้ติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ในตำแหน่งดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แสดงตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์ในเครื่องทดสอบเรอร์โมอะคูสติก

2.8 คลื่นยืนในท่ออากาศแบบท่อปิด

ท่อปิด ตามความหมายที่ใช้กันคือ เป็นท่อตรงซึ่งมีปลายข้างหนึ่งปิด ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งเปิด สมมติท่อปิดท่อหนึ่ง ซึ่งมีความยาว L มีอากาศอยู่ภายใน เกิดการสั่นพ้องของอากาศในท่อนี้มีเสียงดัง อันเนื่องมาจากจากอิทธิพลความถี่ต่างๆ กันของแหล่งต้นทางเสียง โดยมีคลื่นยืนในท่ออากาศท่อนั้น ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 แสดงลักษณะ 3 แบบของคลื่นยืนในท่ออากาศเรียงตามค่าความถี่จากน้อยไปหามาก

ที่มา: http://www.sa.ac.th/winyoo/mechanicswave/wa_resonance.htm

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

จำนวนลูปของคลื่นนิ่งในท่อปิด ยาว L จะสามารถเกิดคลื่นนิ่งที่มีความถี่ได้หลายค่า หรือเขียน เป็นสมการความสัมพันธ์

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

จากการลองจะพบว่า ณ ตำแหน่งปลายเปิดของท่อนั้น ยังไม่ใช่ปฏิบัติการกระจัดอย่างแท้จริง ความยาวยังผลของท่อนึ่งซึ่งคือ ความยาวของท่อที่ทำให้ผลการทดลองตรงตามทฤษฎี จะต้องมีความมากกว่าความยาวของท่อที่ใช้ทำการทดลองนั้น (L) โดยที่ค่าแก้ปลาย (End Correction) จากผลดังกล่าวสำหรับท่อบางท่อนึ่ง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางจะประมาณ $\frac{4d}{3\pi}$

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

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

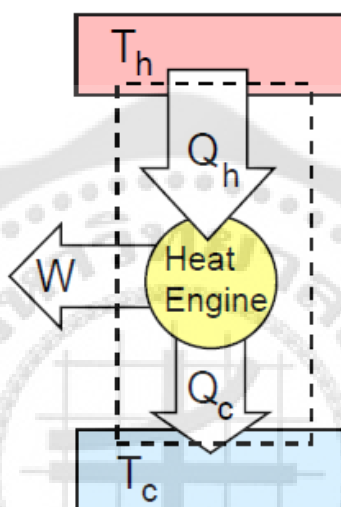
เมื่อ γ อัตราส่วนความจุความร้อน $\gamma = C_p / C_v$ (สำหรับอากาศ 1.4)

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

T อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ, K

2.9 งานและประสิทธิภาพ

กลจักรความร้อนสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนเป็นงานโดยตรง ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงสองอุณหภูมิของกลจักรความร้อน

จะได้ $Q_{in} = W_{net,out} + Q_{out}$, W (2.3)

พลังงานลมที่ไหลในท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานจลน์ของมวล โดยความเร็วเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

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

จะได้ $P_{net,out} = \frac{1}{2} \rho A v^3$ (2.4)

จากเครื่องยนต์ความร้อนสามารถหาประสิทธิภาพ

จะได้ $\eta = \frac{P_{net,out}}{Q_{in}}$ (2.5)

2.10 เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง

เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง ε คืออัตราส่วนร้อยละของปริมาตรช่องว่างในเนื้อวัสดุ (pore space, V_p) กับปริมาตรรวม (bulk volume, V_b) ของวัสดุพูน (Porous material)

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \times 100\% \quad (2.6)$$

โดยที่ V_s คือปริมาตรเนื้อของแข็ง (solid volume) ในวัสดุพูนเปอร์เซ็นต์ช่องว่างเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุพูนแล้วยังบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและต้านทานการไหลของอากาศผ่านวัสดุ การวัดปริมาตรของแข็งหรือปริมาตรช่องว่างของวัสดุพูนเป็นขั้นตอนสำคัญในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างวิธีการวัดปริมาตรทั้งสองนี้สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้หลักการพื้นฐานอย่างง่ายเช่น การวัดขนาด (dimension) โดยตรง หรือการแทนที่ด้วยของเหลว (liquid displacement method) มีข้อดีคือไม่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีข้อจำกัดในแง่ความละเอียดถูกต้องของการวัดและชนิดของวัสดุพูนที่สามารถวัดได้

จากการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างโดยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ (liquid displacement method) กับวิธีใช้ค่าความหนาแน่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการวัดเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของสองวิธีนี้ให้ค่าแตกต่างกันมากที่สุด 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแล้วการทดลองแบบวิธีใช้ค่าความหนาแน่นทำได้สะดวกและไม่ยุ่งยากและได้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากวิธีการทดลองหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของวัสดุโดยใช้วิธีใช้ค่าความหนาแน่นจึงได้นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างจากวิธีวัดแบบแทนที่ด้วยน้ำกับวิธีใช้ค่าความหนาแน่น

ชนิดวัสดุ	ความหนาแน่น Kg/m^3	เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง		
		วิธีแทนที่ด้วยน้ำ	วิธีใช้ค่าความหนาแน่น	ค่าความแตกต่าง
เม็ดดินเผา	680.20	45.00	39.00	6.00
เซรามิก	1375.74	45.50	46.95	1.15
ลูกแก้ว	2510.21	42.50	46.50	4.00

2.11 ความหนาแน่นของวัสดุ

ความหนาแน่น (density ρ) เป็นการวัดมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ยิ่งวัตถุมีความหนาแน่นมากขึ้น มวลต่อหน่วยปริมาตรก็ยิ่งมากขึ้น เช่น เหล็กจะมีปริมาตรน้อยกว่าวัตถุความหนาแน่นต่ำ เช่น น้ำ ที่มีมวลเท่ากัน หน่วยของความหนาแน่นคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) หาได้จากผลหารระหว่างมวลรวมกับปริมาตรรวม ดังสมการ

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.7)$$

โดยที่

ρ คือความหนาแน่นของวัตถุ (หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m คือมวลรวมของวัตถุ (หน่วย กิโลกรัม)

V คือปริมาตรรวมของวัตถุ (หน่วย ลูกบาศก์เมตร)

2.12 การนำความร้อน (heat conduction)

การนำความร้อน (heat conduction) คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นกระบวนการชีววิทยา ที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อน ในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ (คล้ายการนำไฟฟ้า) ในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียง ในก๊าซ การนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะท้อนระหว่างโมเลกุลหรือกล่าวคือ การนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่าน โดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน เช่น การเอามือไปจับกาน้ำร้อน จะทำให้ความร้อนจากกาน้ำถ่ายเทไปยังมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน เป็นต้น วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)

2.13 ความจุความร้อน (heat capacity)

วัสดุของแข็งเมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นด้วยการดูดซับพลังงานบางส่วน ความจุความร้อนเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับความร้อนจาก บริเวณรอบนอก ซึ่งเป็นปริมาณพลังงานที่ต้องการในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลองมีสองส่วนคือ ส่วนของเครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติกและส่วนของเครื่องมือวัดและควบคุม ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 เครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติกและเครื่องมือวัดและควบคุม

1.1 อุปกรณ์ในการทดลองส่วนของเครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติก

1. เครื่องยนต์เซอร์โมอะคูสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104 มิลลิเมตร มีฮีตเตอร์ให้ความร้อนขนาด 2000 วัตต์ จำนวน 1 เครื่อง ดังภาพประกอบ 14

2. รีเจนเนอเรเตอร์สำหรับการทดสอบ ทำจากวัสดุ 3 ประเภทคือ เม็ดดินเผา, เซรามิก และลูกแก้ว ขนาดความยาว 111 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 15



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 15 รีเจนเนอเรเตอร์ (ก) เม็ดดินเผา (ข) เซรามิก (ค) ลูกแก้ว

1.2 อุปกรณ์ในการทดสอบส่วนของเครื่องมือวัดและความคุม

เครื่องมือวัดและความคุมเป็นตู้ควบคุมประกอบด้วยเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า ความเร็วลม อุณหภูมิและตัวควบคุมอุณหภูมิดังภาพประกอบมีอุปกรณ์ทั้งหมดต่อไปนี้

1. สายเทอร์โมคัปเปิล Type K มาตรฐาน JIS C 1610-1981 ช่วงอุณหภูมิ -200°C ถึง 1250°C ค่าความถูกต้อง $\pm 0.4\%$ ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 สายเทอร์โมคัปเปิล Type K

2. เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล ยี่ห้อ OMRON รุ่น E5CC สำหรับวัดอุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์และควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่ 300°C ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล ยี่ห้อ OMRON รุ่น E5CC

3. แอมป์มิเตอร์แบบเข็ม ยี่ห้อ SALZER รุ่น SD-80 ดังภาพประกอบ 18



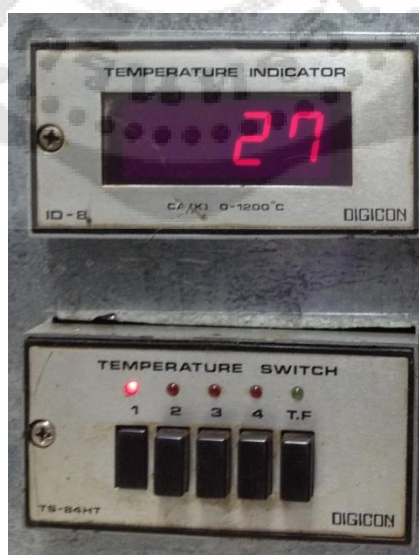
ภาพประกอบ 18 แอมป์มิเตอร์แบบเข็ม ยี่ห้อ SALZER รุ่น SD-80

4. โวลท์มิเตอร์แบบเข็ม ยี่ห้อ SALZER รุ่น SD-80 ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 โวลท์มิเตอร์แบบเข็ม ยี่ห้อ SALZER รุ่น SD-80

5. เครื่องวัดอุณหภูมิดิจิทัล ยี่ห้อ DIGICON รุ่น ID8 วัดได้ 0 ถึง 1200°C ความเที่ยงตรงสูงถึง 0.5% และสวิตช์วัดอุณหภูมิแบบหลายจุดรุ่น TS-84HT ใช้วัดอุณหภูมิทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 เครื่องวัดอุณหภูมิดิจิทัลและสวิตช์วัดอุณหภูมิ

6. เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ TESTO รุ่น 425 (Compact Thermal Anemometer, Meas.range 0 to +20 m/s, -20 to +70°C, Accuracy ± 0.03 m/s, Resolution 0.01 m/s, 0.1°C) ค่าความถูกต้อง $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (0 ถึง +60°C) $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ใช้วัดความเร็วลมทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและวัดอุณหภูมิทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ TESTO รุ่น 425

7. นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ SEIKO STOPWATCH รุ่น S23589P1 ใช้จับเวลาในการบันทึกรายละเอียดค่าที่ทำการวัดทุกๆหนึ่งนาที ดังภาพประกอบ 22

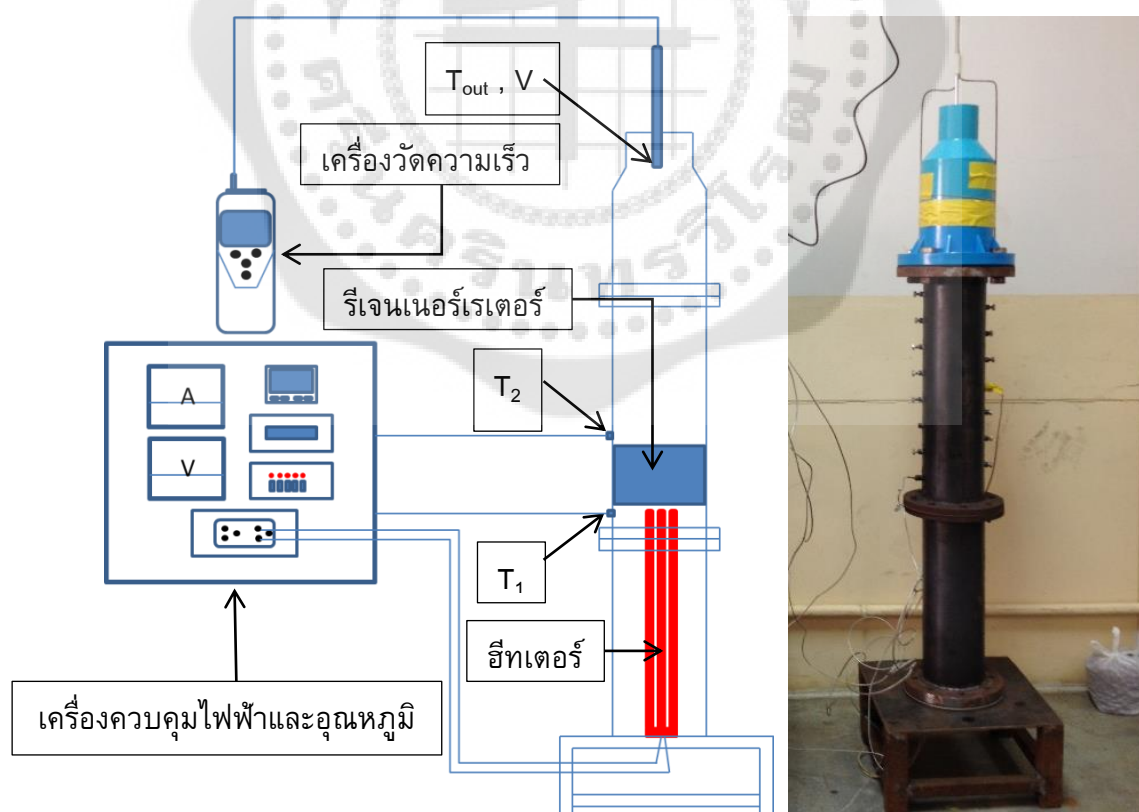


ภาพประกอบ 22 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ SEIKO STOPWATCH รุ่น S23589P1

8. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Pioneer PA413 ชั่งได้สูงสุด 410 กรัม
ค่าความละเอียด 0.001 กรัม ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Pioneer PA413



ภาพประกอบ 24 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง

2. การเตรียมการทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและติดตั้งเครื่องมือวัดและรีเจนเนอเรเตอร์

ก่อนการทดลองจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือวัดดังนี้คือ เทอร์โมคัปเปิลสองจุดที่ตำแหน่ง T_1 เพื่อวัดอุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์และตำแหน่ง T_2 เพื่อวัดอุณหภูมิทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ เครื่องวัดความเร็วลมโดยติดตั้งหัววัดที่ปลายทางออกของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกซึ่งเครื่องวัดความเร็วลมจะวัดสามารถวัดและแสดงผลความเร็วลมและอุณหภูมิที่ปากทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

การติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ติดตั้งตามตำแหน่งดังภาพประกอบ 24 รีเจนเนอเรเตอร์ที่ติดตั้งเพื่อทดลองมีทั้งหมด 3 ชนิดคือ เม็ดดินเผา เซรามิก ลูกแก้ว โดยติดตั้งทีละชนิดตามลำดับดังตารางที่ 3 ลำดับการทดลองรีเจนเนอเรเตอร์ในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก น้ำหนักของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้ในแต่ละลำดับการทดสอบแสดงในภาคผนวก ค การเตรียมรีเจนเนอเรเตอร์ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

ตารางที่ 3 ลำดับการทดลองรีเจนเนอเรเตอร์ในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

ลำดับการทดลอง	ชนิดวัสดุที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์	เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง	น้ำหนัก(m)(g)
1	เม็ดดินเผา	40	384
2		45	352
3		50	320
4	เซรามิก	40	776
5		45	711
6		50	647
7	ลูกแก้ว	40	1416
8		45	1298
9		50	1180

อุปกรณ์ที่ต้องจัดเตรียมในการจดบันทึกค่าที่วัดได้ก่อนการทดลองคือ นาฬิกาจับเวลาและตารางเพื่อจดบันทึกค่าต่างๆในการทดลอง

3. ขั้นตอนการทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

เมื่อเตรียมความพร้อมของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ตามหัวข้อ 2 การเตรียมการทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและติดตั้งเครื่องมือวัดและรีเจนเนอเรเตอร์เรียบร้อยแล้วเริ่มการทดลองได้ตามขั้นตอนการทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกดังนี้

1. จดบันทึกค่าเริ่มต้นก่อนการทดลองที่วัดได้จากเครื่องมือวัดบันทึกลงในตารางผลการทดลอง ค่าที่ต้องจดบันทึกจากการวัดสำคัญๆทุก 1 นาทีคือ

- 1.1 อุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ T_1
- 1.2 อุณหภูมิทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ T_2
- 1.3 อุณหภูมิทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก T_{out}
- 1.4 ความเร็วลมที่ทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก V
- 1.5 ระยะเวลาในการให้ความร้อน

2. จ่ายกระแสไฟให้อีตเตอร์พร้อมเริ่มต้นจับเวลาและจดบันทึกค่าต่างๆที่วัดได้ลงในตารางผลการทดลอง ทุกๆหนึ่งนาทีจนกระทั่งอุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ถึง 300°C

3. หยุดจ่ายกระแสไฟให้อีตเตอร์และหยุดการทดลอง รอจนกว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีอุณหภูมิลดลงเท่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งเมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นให้หยุดจ่ายไฟให้อีตเตอร์และรอจนกว่าอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้องนั้นใช้เวลานานหลายชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องจะทดลองในวันถัดไป

4. นำรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้วตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 ออกจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแล้วติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ที่ต้องการทดลองลำดับถัดไปลงไปที่เพื่อทดสอบต่อไป

5. ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 จนทดลองรีเจนเนอเรเตอร์ครบทั้งสามชนิดคือ เม็ดดินเผา เซรามิก ลูกแก้ว และเปอร์เซนต์ช่องว่างที่ 40 45 50 เปอร์เซนต์ ลำดับการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 ลำดับการทดลองรีเจนเนอเรเตอร์ในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์

การทดลองในครั้งนี้ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทนวนที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกทดลองโดยใช้วัสดุเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ 3 ชนิดคือ

1. เม็ดดินเผา
2. เซรามิก
3. ลูกแก้ว

จากผลการทดลองโดยเก็บข้อมูลในรูปแบบตารางและนำผลมาคำนวณเพื่อหาค่ากำลังที่ได้รับสูงสุดแสดงให้เห็นแนวโน้มผลกระทบของรีเจนเนอเรเตอร์ที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40% 45% 50% ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและจากการใช้วัสดุประเภทนวนเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ทั้งสามชนิด แสดงในรูปแบบของกราฟต่างๆดังนี้

1 ผลของชนิดนวนที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

1.1 ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%

1.2 ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%

1.3 ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%

2 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

2.1 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อระยะเวลาเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

2.2 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อเวลาขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้กำลังสูงสุด

2.3 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่ออุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงาน

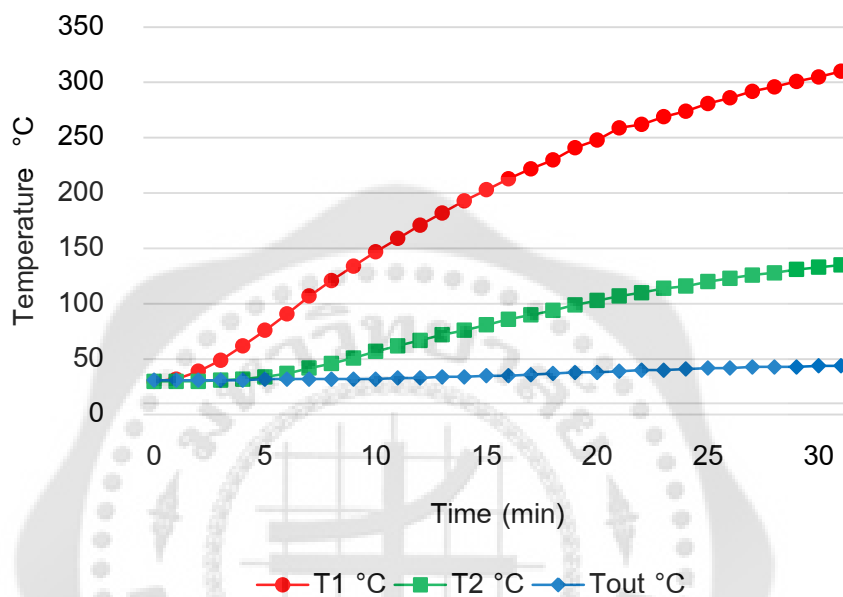
2.4 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่ออุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้กำลังสูงสุด

2.5 การเปรียบเทียบกำลังที่ได้รับสูงสุดกับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง

1. ผลของชนิดฉนวนที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

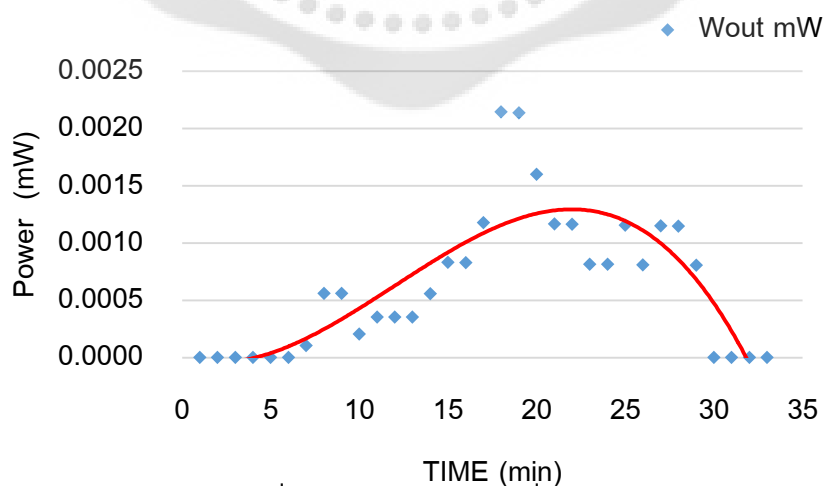
1.1 ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%

CLAY BALLS 40%

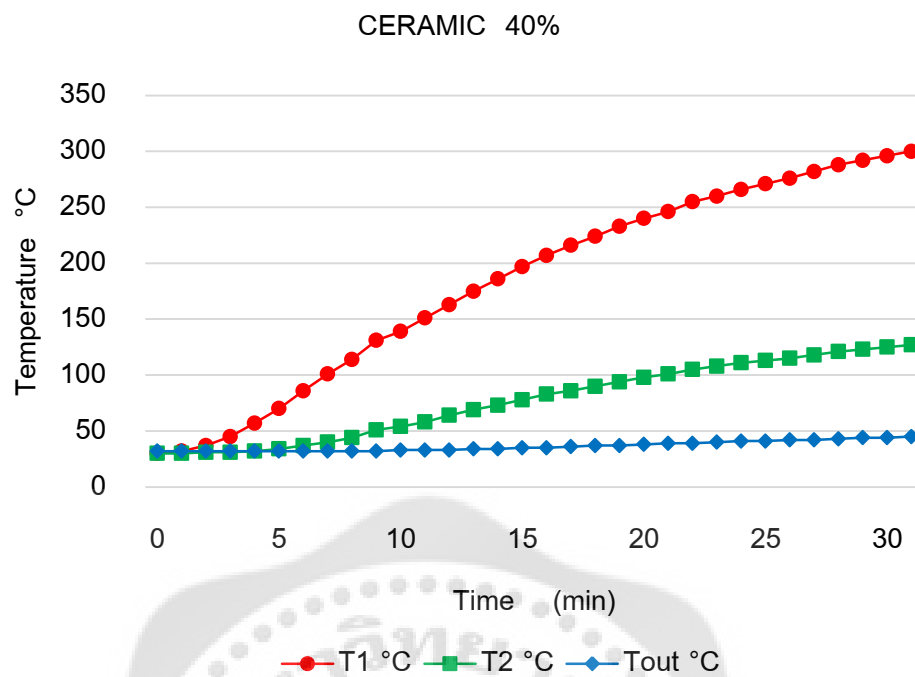


ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%

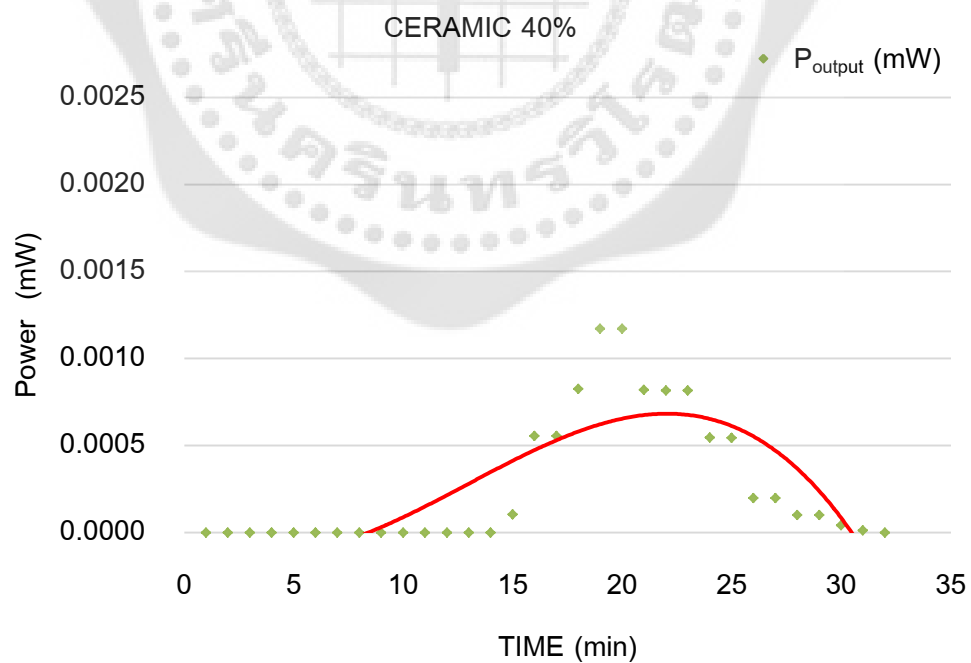
CLAY BALLS 40%



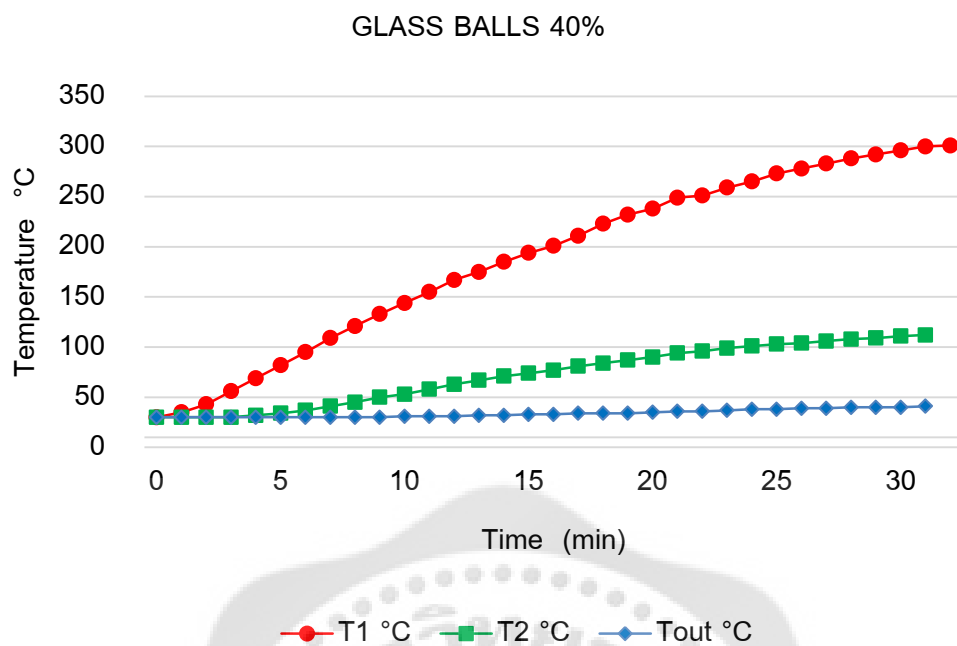
ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%



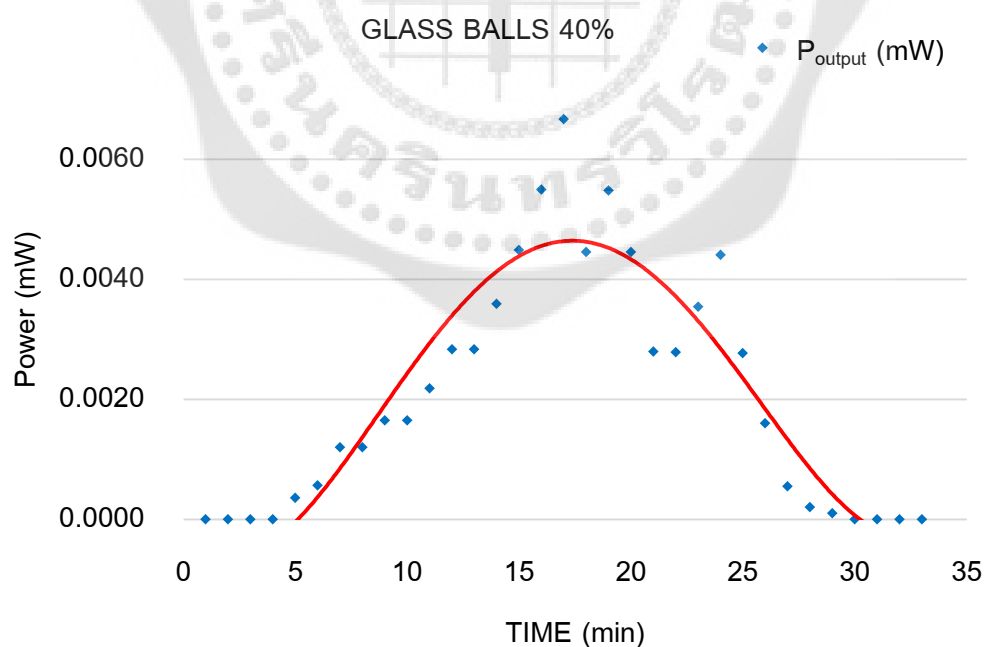
ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%



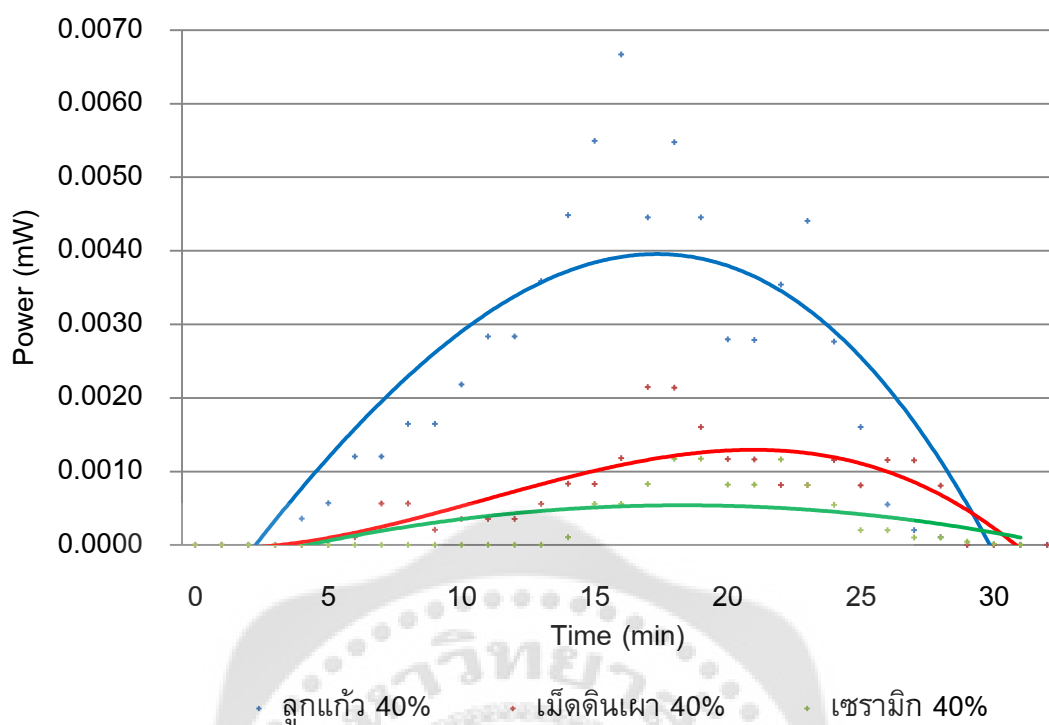
ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%



ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%



ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%



ภาพประกอบ 31 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกรักที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40%

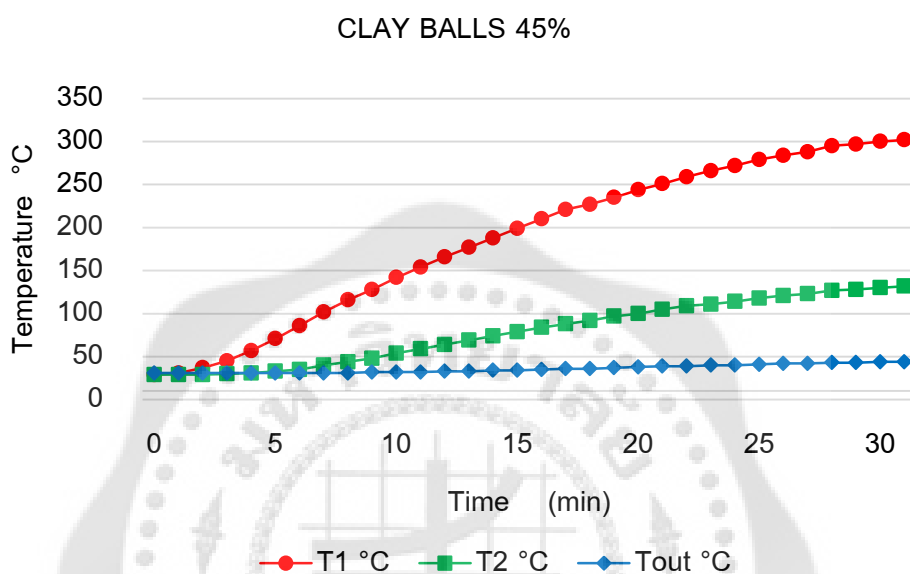
จากภาพประกอบ 25, 27 และ 29 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้าทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกรัก พบว่าเมื่อให้ความร้อนกับเครื่องยนต์อุณหภูมิทางออกรีเจนเนอเรเตอร์จะเริ่มเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 6 นาที สำหรับรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา 14 นาทีสำหรับรีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกและ 4 นาทีสำหรับรีเจนเนอเรเตอร์ลูกรัก ในส่วนของอุณหภูมิทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นน้อยมาก

จากภาพประกอบ 26, 28 และ 30 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกรัก พบว่ากำลังที่ได้รับในแต่ละวัสดุของรีเจนเนอเรเตอร์ให้ออกมาต่างกัน โดยรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาให้กำลังสูงสุด 0.002144 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 17 นาที รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกให้กำลังสูงสุด 0.00116 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 18 นาที และรีเจนเนอเรเตอร์ลูกรักให้กำลังสูงสุด 0.00667 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 16 นาที

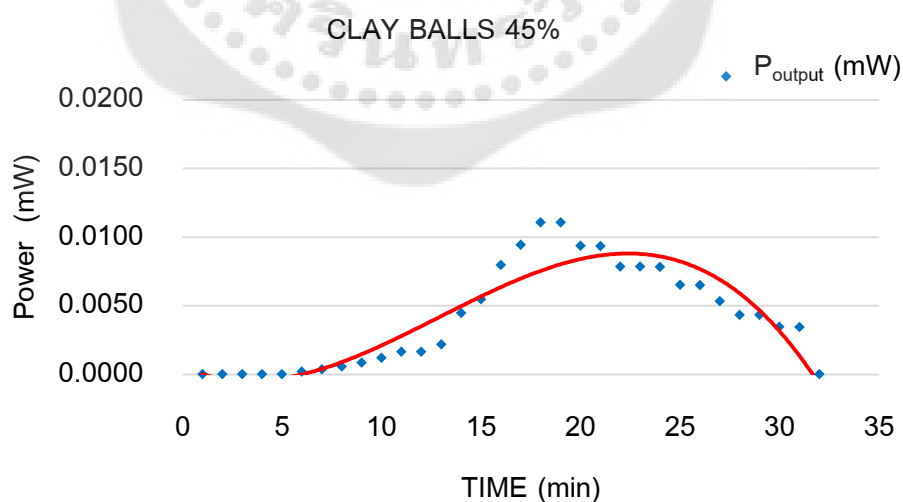
จากภาพประกอบ 31 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกรัก ที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40 % พบว่ารีเจน

เนอโรเรเตอร์ทั้งสามวัสดุให้กำลังออกมาได้สูงสุดแตกต่างกัน แต่พฤติกรรมการทำงานมีความคล้ายกันคือเมื่อให้ความร้อนระยะเวลาหนึ่งเครื่องยนต์จะเริ่มทำงานและเริ่มให้กำลังออกมาสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับที่เครื่องยนต์ให้กำลังสูงสุด จากนั้นเครื่องยนต์ก็จะเริ่มให้กำลังลดต่ำลง

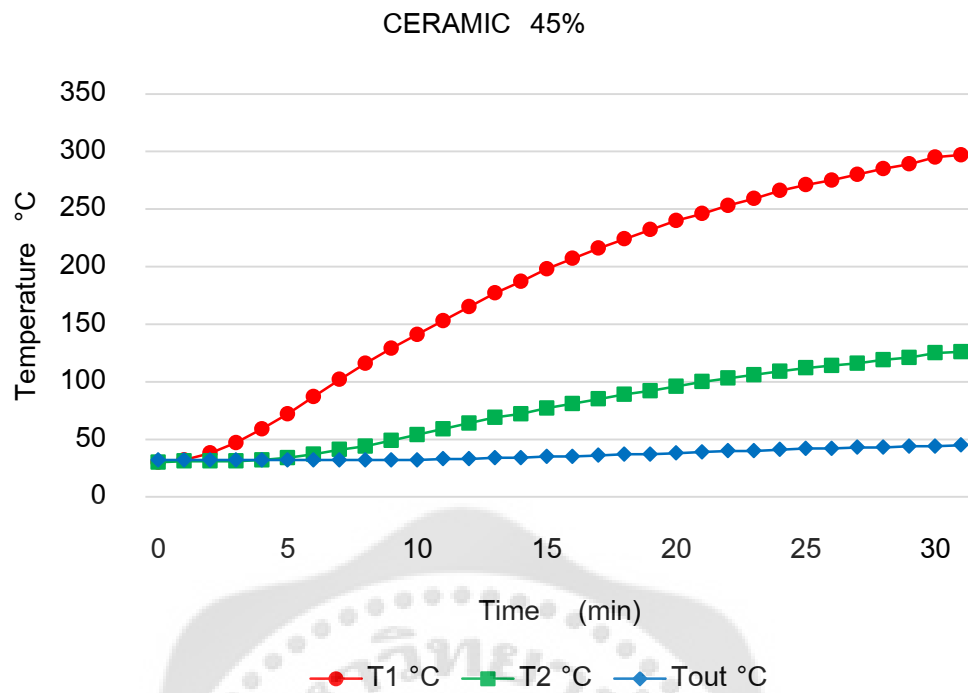
1.2 ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%



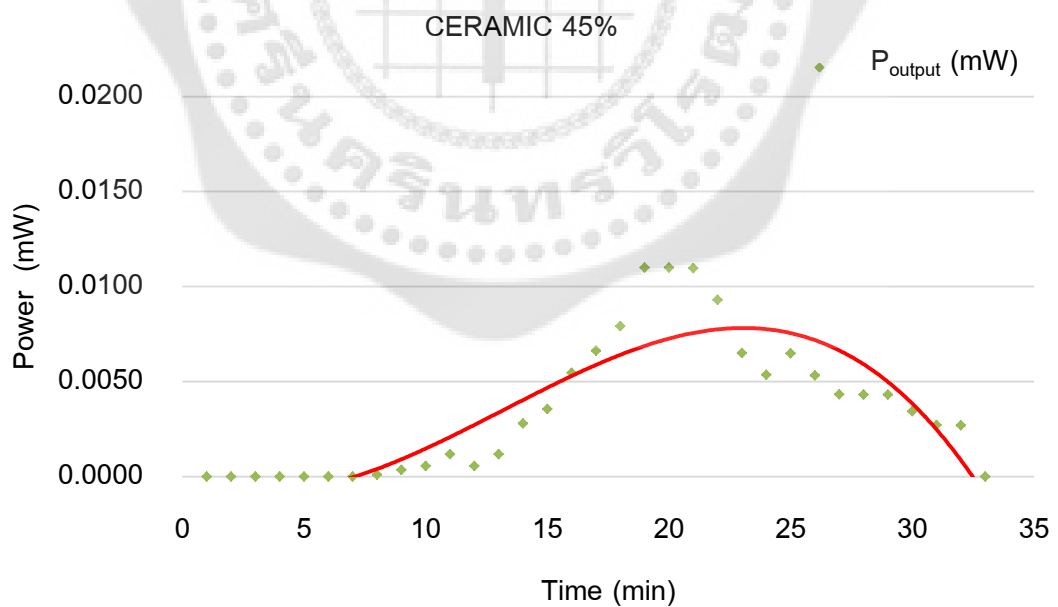
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%



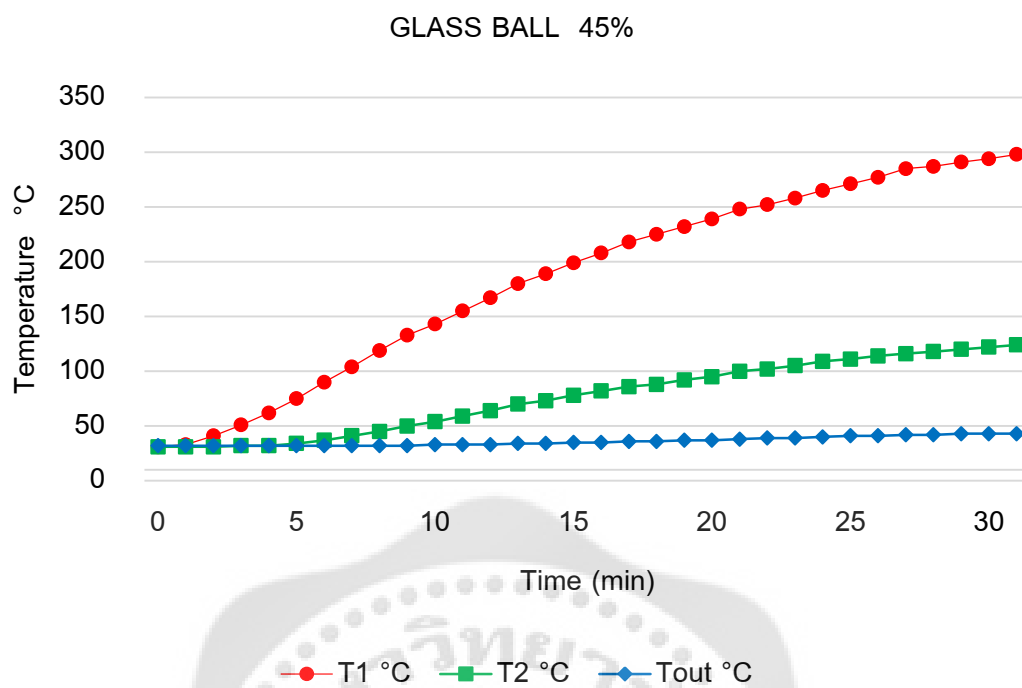
ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%



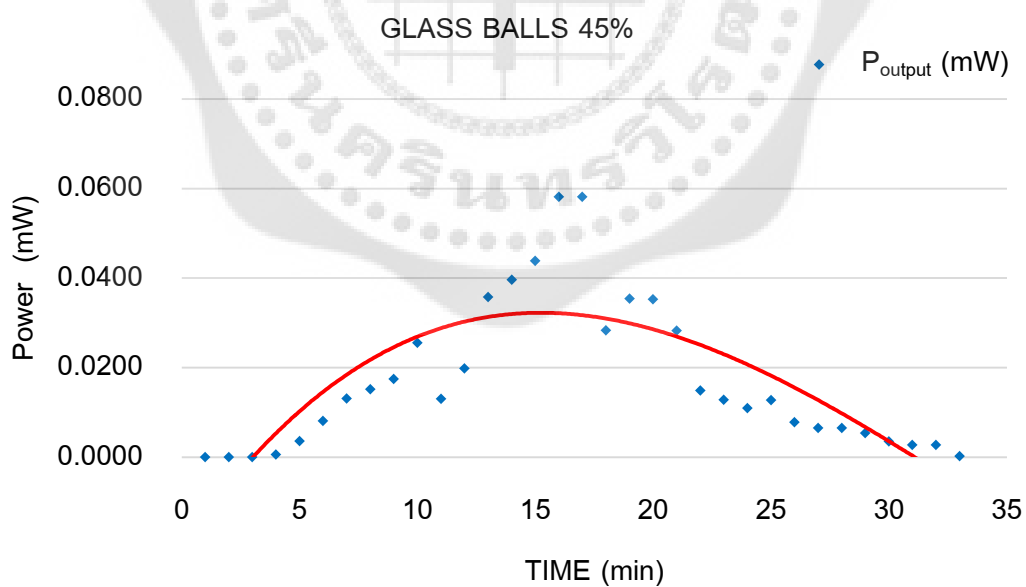
ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%



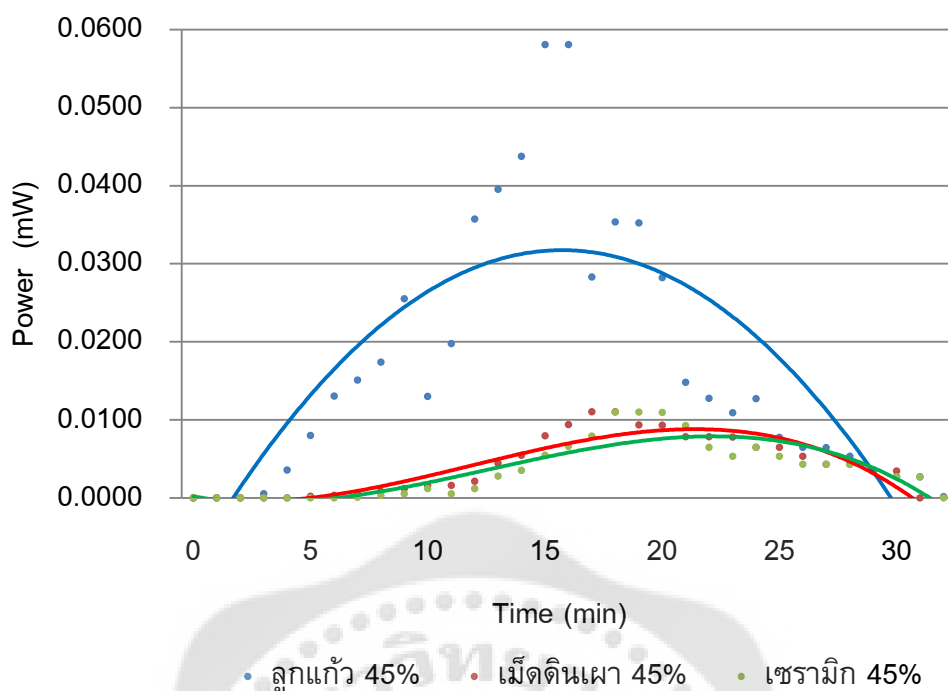
ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%



ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%



ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%



ภาพประกอบ 38 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์เม็ตดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45%

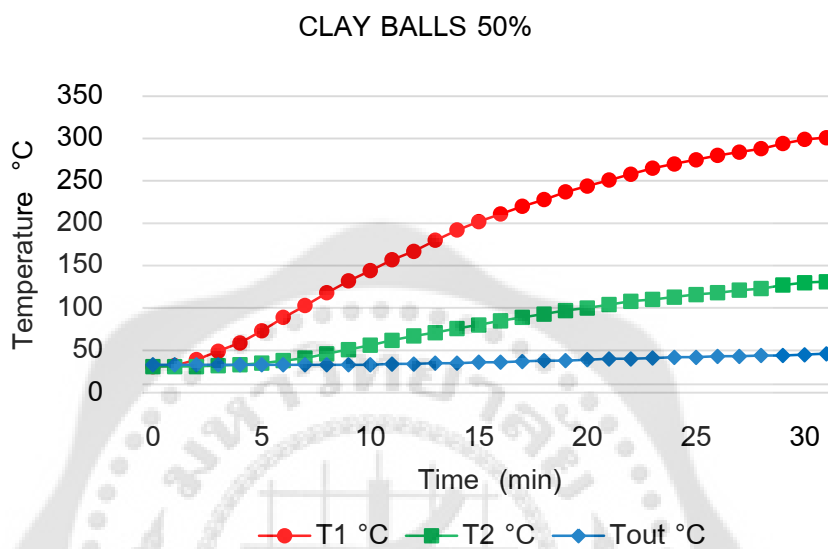
จากภาพประกอบ 32, 34 และ 36 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้าทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ เม็ตดินเผา เซรามิกและลูกแก้ว พบว่าเมื่อให้ความร้อนกับเครื่องยนต์อุณหภูมิทางออกรีเจนเนอเรเตอร์จะเริ่มเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 5 นาที สำหรับรีเจนเนอเรเตอร์เม็ตดินเผา 7 นาทีสำหรับรีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกและ 3 นาทีสำหรับรีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้ว ในส่วนของอุณหภูมิทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นน้อยมาก

จากภาพประกอบ 33, 35 และ 37 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ตดินเผา เซรามิกและลูกแก้ว พบว่ากำลังที่ได้รับในแต่ละวัสดุของรีเจนเนอเรเตอร์ให้ออกมาต่างกัน โดยรีเจนเนอเรเตอร์เม็ตดินเผาให้กำลังสูงสุด 0.011048 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 17 นาที รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกให้กำลังสูงสุด 0.01101 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 18 นาที และรีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วให้กำลังสูงสุด 0.05808 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 15 นาที

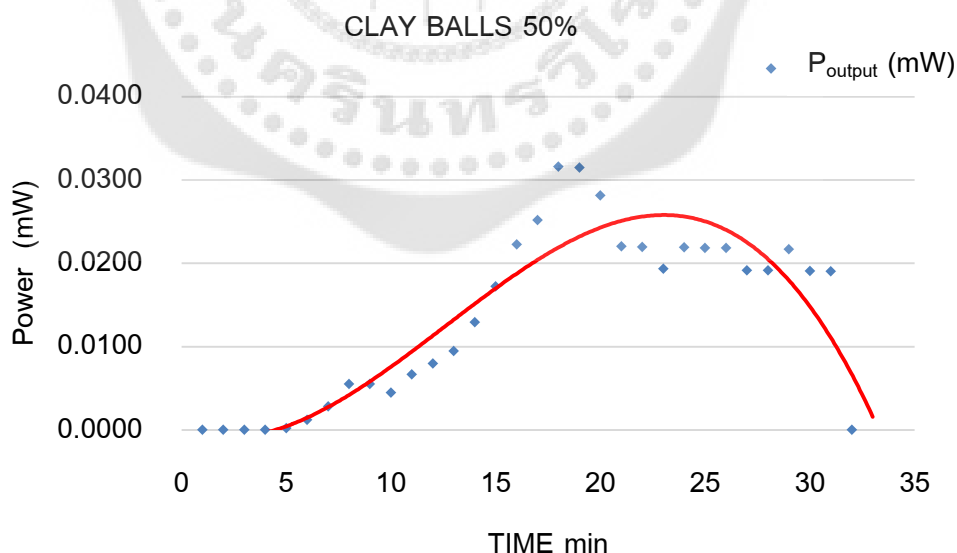
จากภาพประกอบ 38 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์เม็ตดินเผา เซรามิกและลูกแก้ว ที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 45 % พบว่ารีเจนเนอเรเตอร์ทั้งสามวัสดุให้กำลังออกมาได้สูงสุดแตกต่างกัน แต่พฤติกรรมการทำงานมีความ

คล้ายกันคือเมื่อให้ความร้อนระยะเวลาหนึ่งเครื่องยนต์จะเริ่มทำงานและเริ่มให้กำลังออกมาสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับที่เครื่องยนต์ให้กำลังสูงสุด จากนั้นเครื่องยนต์ก็จะเริ่มให้กำลังลดต่ำลง

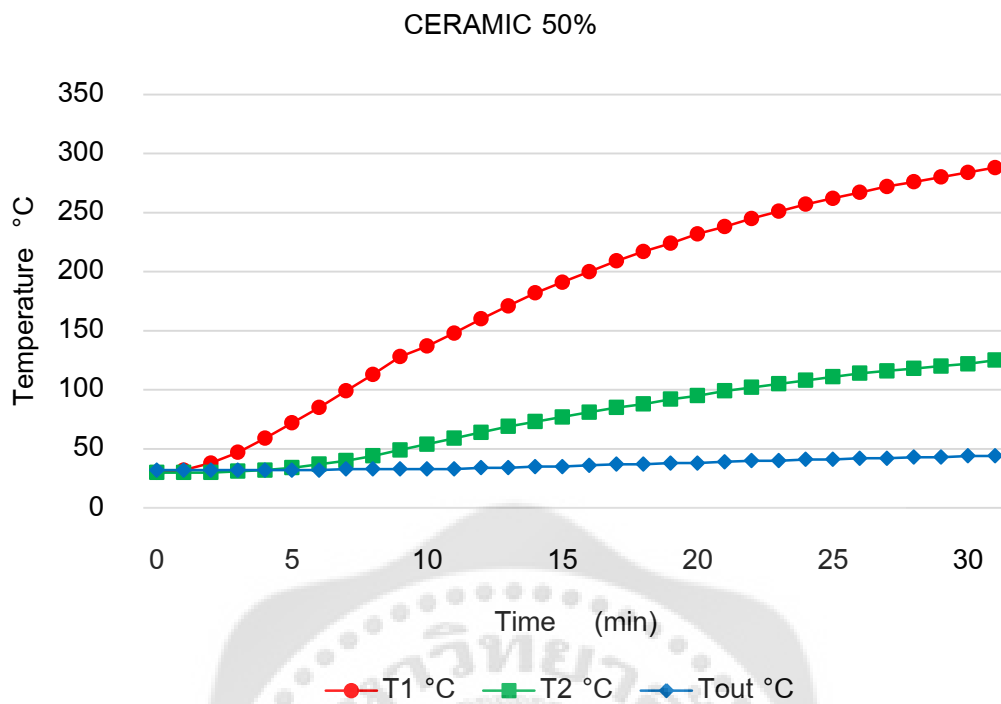
1.3 ผลของเม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้วที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%



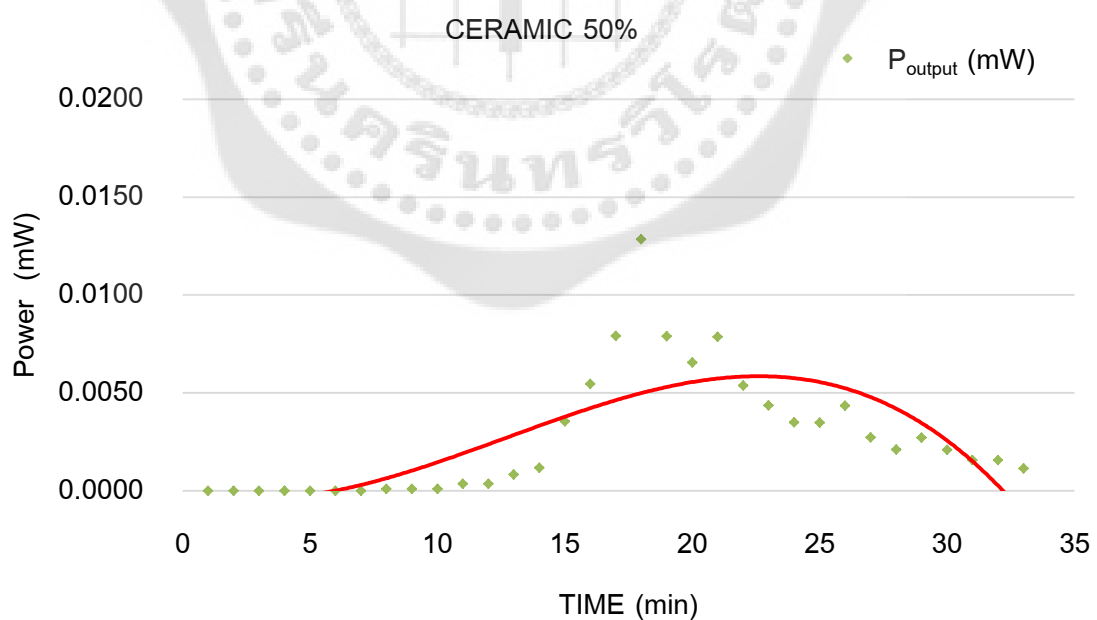
ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%



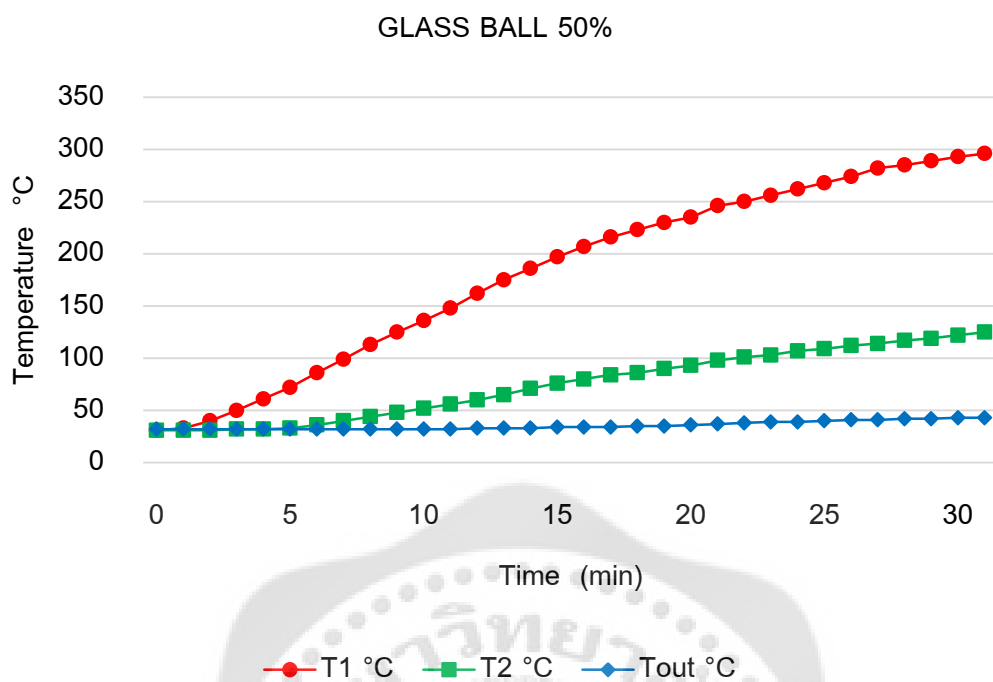
ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%



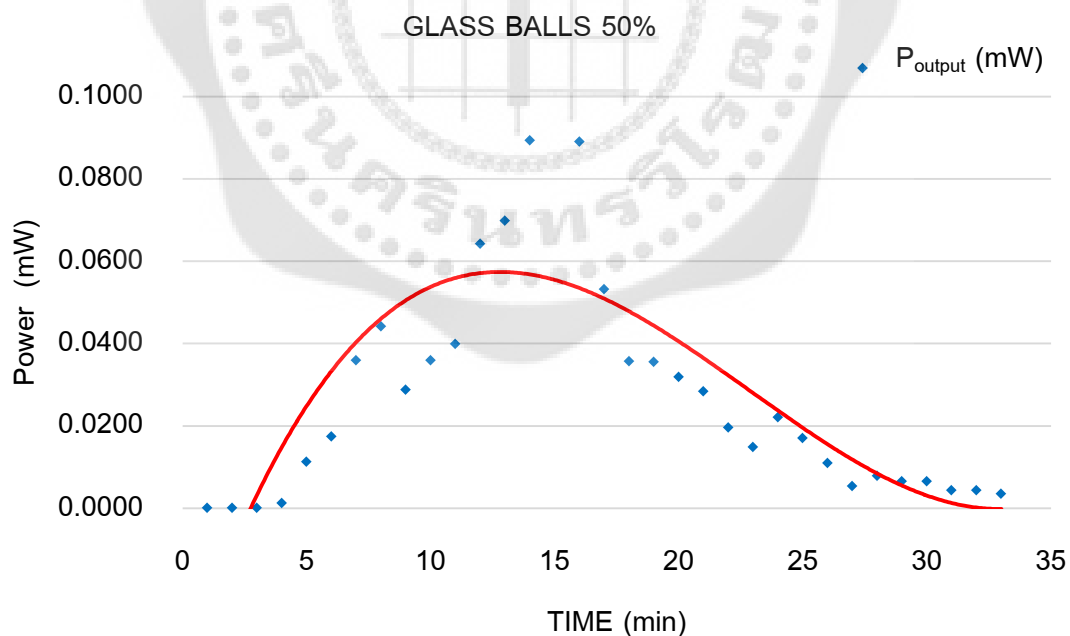
ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%



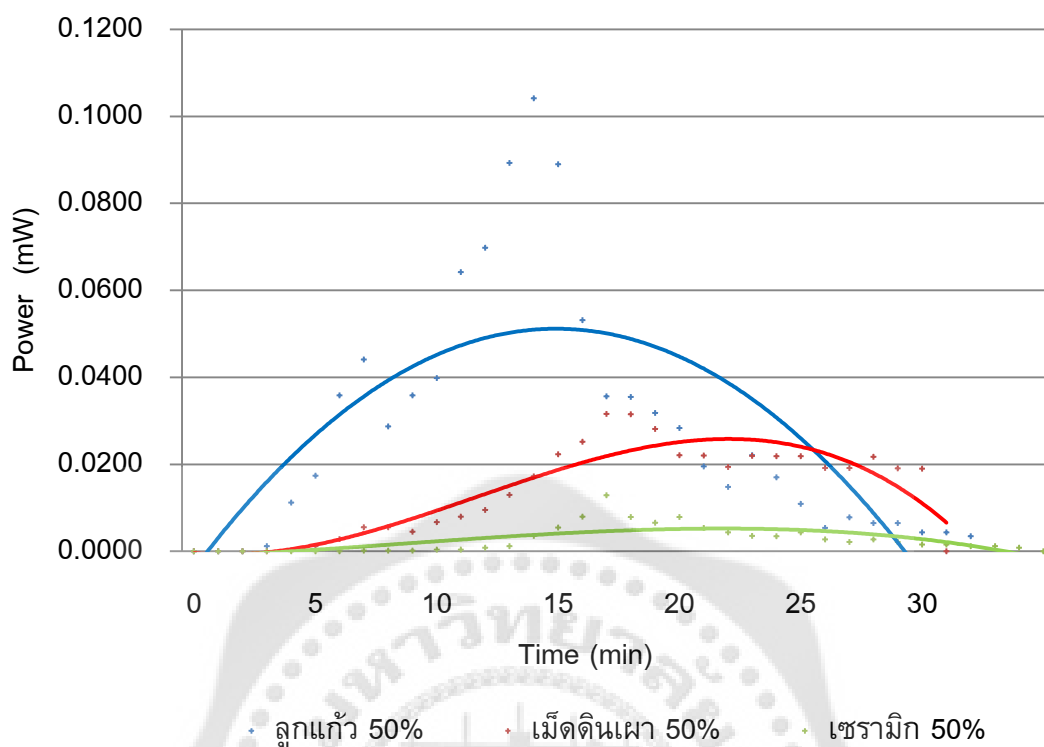
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%



ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์และทางออกเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%



ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%



ภาพประกอบ 45 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกรักที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50%

จากภาพประกอบ 39, 41 และ 43 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้าทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ และทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกรัก พบว่าเมื่อให้ความร้อนกับเครื่องยนต์อุณหภูมิทางออกรีเจนเนอเรเตอร์จะเริ่มเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 4 นาที สำหรับรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา 7 นาทีสำหรับรีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกและ 3 นาทีสำหรับรีเจนเนอเรเตอร์ลูกรัก ในส่วนของอุณหภูมิทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นน้อยมาก

จากภาพประกอบ 40, 42 และ 44 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกรัก พบว่ากำลังที่ได้รับในแต่ละวัสดุของรีเจนเนอเรเตอร์ให้ออกมาต่างกัน โดยรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาให้กำลังสูงสุด 0.031596 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 17 นาที รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกให้กำลังสูงสุด 0.012842 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 17 นาที และรีเจนเนอเรเตอร์ลูกรักให้กำลังสูงสุด 0.104148 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 14 นาที

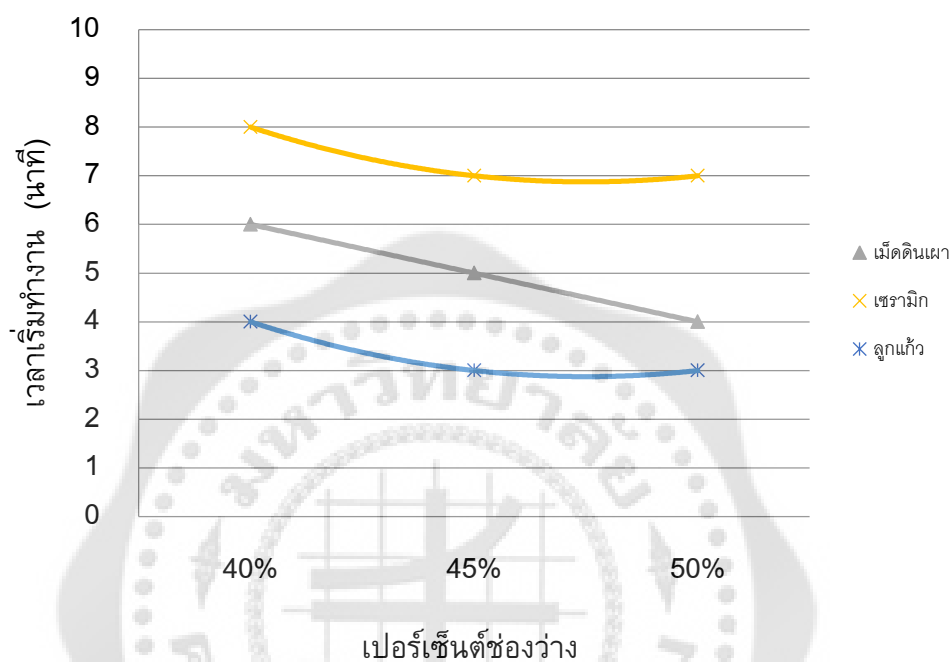
จากภาพประกอบ 45 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้ว เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่ารีเจนเนอเรเตอร์ทั้งสามวัสดุให้กำลังออกมาได้สูงสุดแตกต่างกัน แต่พฤติกรรมการทำงานมีความคล้ายกันคือเมื่อให้ความร้อนระยะเวลาหนึ่งเครื่องยนต์จะเริ่มทำงานและเริ่มให้กำลังออกมาสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับที่เครื่องยนต์ให้กำลังสูงสุด จากนั้นเครื่องยนต์ก็จะเริ่มให้กำลังลดต่ำลง

จากการทดลองแสดงให้เห็นพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและการให้กำลังออกมาในรูปของความเร็วอากาศ พบว่าเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้ว เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40% 45% และ 50% มีพฤติกรรมการทำงานคล้ายกันคือเมื่อให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไประยะเวลาหนึ่ง เครื่องยนต์จะเริ่มทำงานและค่อยๆให้กำลังออกมาเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด เครื่องยนต์ก็จะให้กำลังลดต่ำลง

การเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิทางออกกรีเจนเนอเรเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือความร้อนได้ส่งผ่านช่องทางพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์โดยการพาความร้อนด้วยพาหะของอากาศ จากทางเข้าผ่านมาสู่ทางออกเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตกคร่อมระหว่างทางเข้าและทางออกกรีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก เครื่องยนต์กำเนิดคลื่นเสียงออกมาขับให้อากาศมีความเร็วปล่อยออกมาสู่ปลายท่อเรโซแนนซ์สามารถวัดความเร็วของอากาศนำมาคำนวณหากำลังที่เครื่องยนต์ให้ออกมา ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการทำงานและกำลังที่ให้ออกมาด้วยดังแสดงในหัวข้อที่ 2 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

2. ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอร์เรเตอร์ต่อกำลังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

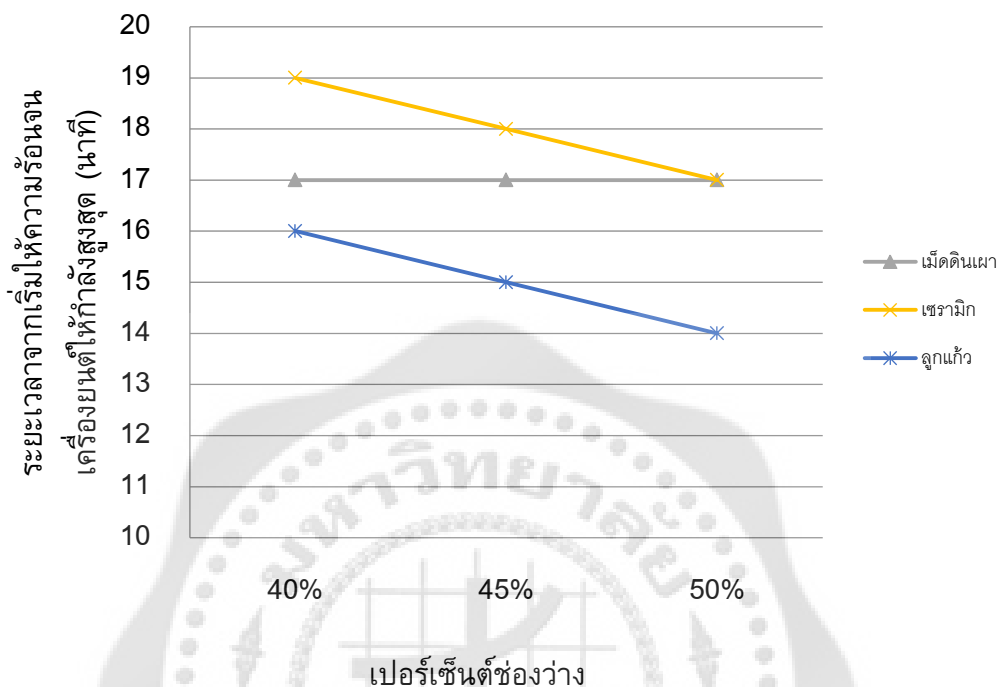
2.1 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อระยะเวลาเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก



ภาพประกอบ 46 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อระยะเวลาเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

จากภาพประกอบ 46 แสดงให้เห็นว่าเวลาในการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีแนวโน้มรวดเร็วขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มากขึ้น จากผลการทดลองสังเกตได้ว่ารีเจนเนอเรเตอร์ทั้งสามชนิดวัสดุพบว่าความพรุนที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบทำให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงานรวดเร็วขึ้นโดยจากเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 40% 45% และ 50% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ทำจากวัสดุ 3 ชนิดที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างเดียวกันพบว่าวัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วเริ่มทำงานได้รวดเร็วที่สุด รองลงมาคือวัสดุเมทัลโดยวัสดุเซรามิกเริ่มทำงานช้าที่สุด

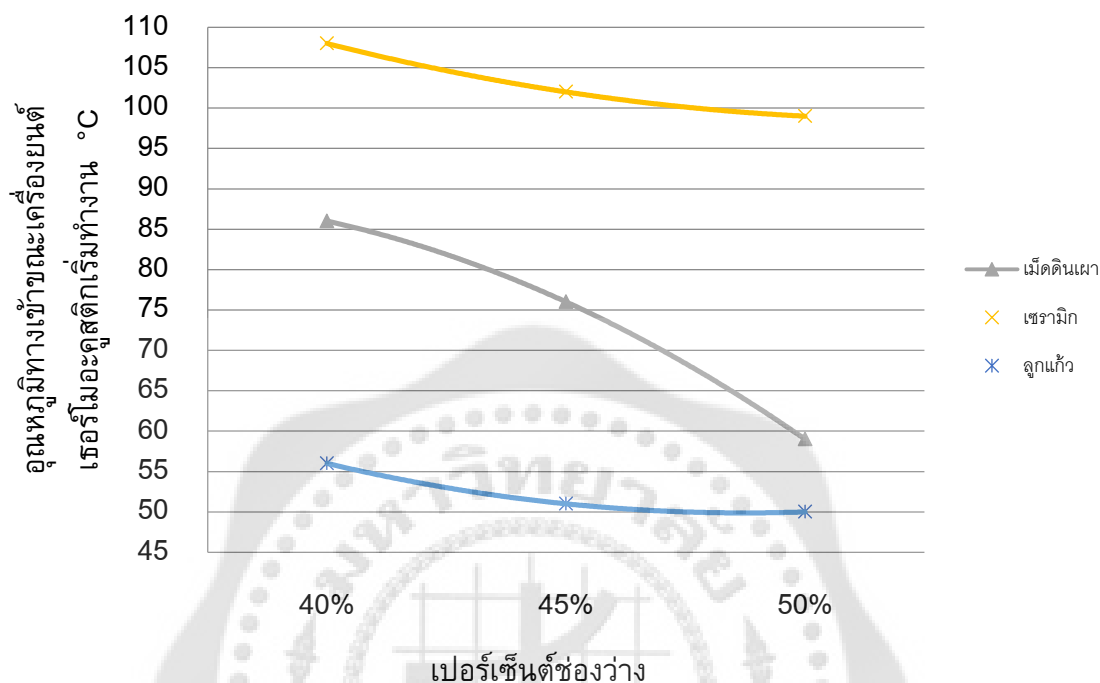
2.2 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่อเวลาขณะเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคให้กำลังสูงสุด



ภาพประกอบ 47 ผลกระทบของเวลาขณะเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคให้กำลังสูงสุด

จากภาพประกอบ 47 ผลกระทบของเวลาขณะเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคให้กำลังสูงสุด เวลาที่เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคให้กำลังสูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ช่องว่างเพิ่มขึ้น จากการทดลองที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40% 45% และ 50% เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคให้กำลังสูงสุดได้รวดเร็วที่สุดที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50% ผลการทดลองที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50% ของรีเจนเนอเรเตอร์เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคได้ให้กำลังสูงสุด โดยรีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วให้กำลังสูงสุดนาทีกที่ 14 รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาและเซรามิกนาทีกที่ 17 เท่ากัน

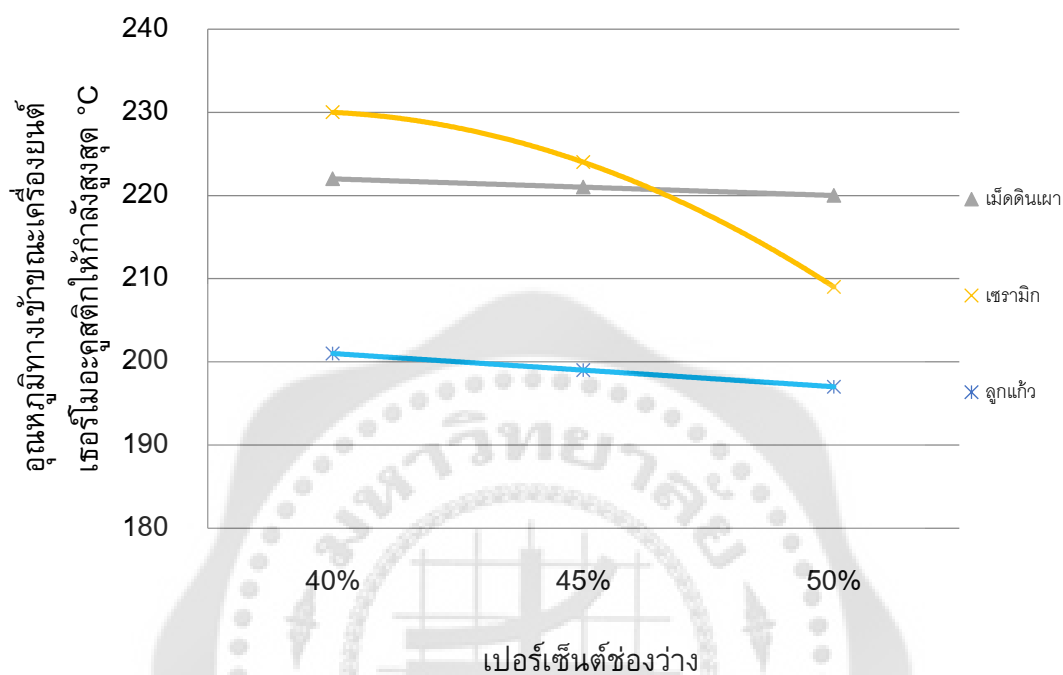
2.3 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่ออุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงาน



ภาพประกอบ 48 ผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงาน

จากภาพประกอบ 48 ผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงาน พบว่าผลกระทบกับอุณหภูมิที่เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงานมีแนวโน้มเริ่มต้นทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำลงเมื่อรีเจนเนอเรเตอร์มีเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่มากขึ้น จากผลการทดลองที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างสามเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40% 45% และ 50% รีเจนเนอเรเตอร์สามชนิดคือ เม็ดดินเผา เซรามิกและลูกแก้ว เปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ 50% เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงานที่อุณหภูมิต่ำสุด 50°C ในขณะที่รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเริ่มทำงานที่อุณหภูมิที่ 59°C และ 99°C ตามลำดับ

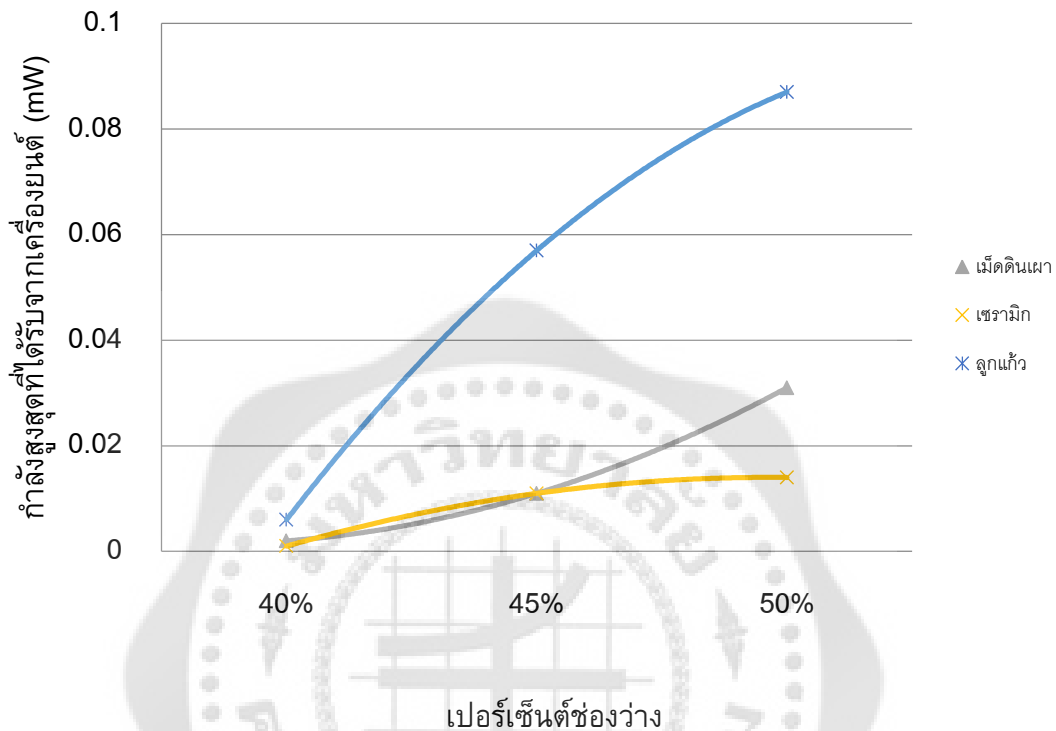
2.4 ผลของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่ออุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้กำลังสูงสุด



ภาพประกอบ 49 ผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้กำลังสูงสุด

จากภาพประกอบ 49 ผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้าขณะเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้กำลังสูงสุด พบว่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์มากขึ้นอุณหภูมิที่ป้อนให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเพื่อให้ได้กำลังสูงสุดมีแนวโน้มต่ำลง จากผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ระดับ 50% เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกใช้อุณหภูมิที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกต่ำกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40% และ 45% โดยอุณหภูมิที่ป้อนเข้าแยกตามชนิดของรีเจนเนอเรเตอร์ดังนี้ รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้ว 195°C รีเจนเนอเรเตอร์เซรามิก 209°C และรีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผา 220°C

2.5 กำลังที่ได้รับสูงสุดที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ทำจากวัสดุฉนวน 3 ชนิด



ภาพประกอบ 50 กำลังที่ได้รับสูงสุดที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ทำจากวัสดุฉนวน 3 ชนิด

จากภาพประกอบ 50 การเปรียบเทียบกำลังที่ได้รับสูงสุดกับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง พบว่ากำลังที่ได้รับสูงสุดจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดยาง เซรามิกและเม็ดยางที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างสามระดับ กำลังที่ได้รับสูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อรีเจนเนอเรเตอร์มีเปอร์เซ็นต์ช่องว่างเพิ่มมากขึ้น จากการทดลองที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50% เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้กำลังออกมาสูงสุดจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่เป็นเม็ดยางโดยให้กำลังสูงสุดออกมาที่ 0.089 มิลลิวัตต์ รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดยางให้กำลังสูงสุดออกมาที่ 0.031 มิลลิวัตต์และรีเจนเนอเรเตอร์เซรามิกให้กำลังสูงสุดออกมาที่ 0.014 มิลลิวัตต์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลการทดลองผลกระทบของคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ประเภทฉนวนที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์สามชนิดคือ เม็ดดินเผา เซรามิก และลูกแก้ว ทดลองที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างเท่ากันสามระดับคือ 40% 45% และ 50% ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของรีเจนเนอเรเตอร์ในรูปของระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่สูงขึ้น มีผลทำให้งานสูงสุดที่ได้ออกมาจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกใช้อุณหภูมิป้อนเข้ามีแนวโน้มต่ำลง ในขณะที่เดียวกันระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่สูงขึ้นนั้นผลทำให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกมีแนวโน้มเริ่มทำงานที่อุณหภูมิต่ำลงด้วย อย่างไรก็ตามผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ระดับ 50% ส่งผลให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกทั้งเริ่มทำงานและให้งานสูงสุดออกมาได้เร็วที่สุด

จากผลการทดลองที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่มีแนวโน้มดีที่สุดคือ 50% กับรีเจนเนอเรเตอร์สามชนิดพบว่า รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วส่งผลทำให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้งานออกมาสูงที่สุดที่ 0.087 มิลลิวัตต์ รีเจนเนอเรเตอร์เม็ดดินเผาและเซรามิกให้งานสูงสุดออกมาที่ 0.031 และ 0.014 มิลลิวัตต์ตามลำดับ ในการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสามชนิดมีค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนใกล้เคียงกันแต่ค่ากำลังที่ได้ออกมาน่าจะมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่ผลการทดลองได้ค่ากำลังที่ได้รับมีแนวโน้มไม่สอดคล้องกันคือ ลูกแก้วให้กำลังออกมาสูงกว่าเม็ดดินเผาและเซรามิก ปัจจัยหนึ่งนี้อาจส่งผลให้ไม่สอดคล้องในการทดลองได้แก่ รูปทรงของวัสดุ, รูปทรงช่องทางการไหล, ลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่ต่างกัน

ความเป็นไปได้ที่สามารถนำเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้วัสดุประเภทฉนวนเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ไปใช้และพัฒนาต่อไปเพื่อเป็นแหล่งพลังงานยังเป็นไปได้ไม่น้อยมากในขั้นนี้ เนื่องจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์เป็นฉนวนทั้งสามชนิดนั้นมีประสิทธิภาพทางความร้อนยังต่ำมาก จากการให้ความร้อนเข้า 1980 วัตต์ โดยเครื่องยนต์ให้กำลังออกมาสูงที่สุดเพียง 0.087 มิลลิวัตต์เท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ที่เป็นโลหะจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่รีเจนเนอเรเตอร์ที่เป็นฉนวนนี้ให้กำลังออกมาต่ำกว่ามากด้วยเหมือนกัน

2. ข้อเสนอแนะ

การศึกษาด้านเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกนับว่าจำเป็นอย่างมากเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาไปสู่การนำไปใช้ในชีวิตประจำวันอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด ด้วยจุดเด่นหลายประการเช่น สามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนใด ๆ ก็ได้ซึ่งควรจะต้องเลือกพัฒนาด้วยการใช้แหล่งความร้อนที่เป็นพลังงานสะอาด อาทิ แสงอาทิตย์ ความร้อนที่เหลือทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ หรือเครื่องยนต์ เป็นต้น

การศึกษาวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยวัสดุที่นำมาทดลองใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นราคาไม่แพง สามารถทำให้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกให้กำเนิดงานออกมาได้ ในการศึกษาวิจัยต่อไปเนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาด้านเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกได้มีการศึกษาหลายด้านหลายรูปแบบทั้งรูปทรง, มุมเอียงของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก, เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบระบบปิด, เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบระบบเปิด, สารทำงาน, ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน, รีเจนเนอเรเตอร์, ท่อเรโซแนนซ์ ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่สามารถศึกษาได้ครอบคลุมทั้งหมด ในอนาคตอาจมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมมากขึ้นจากการทดลองนี้คือ

1. ศึกษาผลของการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรเทอร์โมอะคูสติก
2. ศึกษาผลของรูปทรงวัสดุที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ เนื่องจากวัสดุที่มีรูปทรงเดียวกันจะมีช่องทางการไหลรูปทรงเดียวกันและสม่ำเสมอเท่ากันตลอดตลอดความยาวของรีเจนเนอเรเตอร์
3. ศึกษาผลของการใช้แสงอาทิตย์หรือพลังงานความร้อนทั้งจากไอเสียของเครื่องยนต์เป็นแหล่งพลังงานความร้อนสำหรับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ; ปุณยศ วลลิกุล; และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา. (2547). การศึกษาเชิงทดลอง การทำความเข้าใจแบบเทอร์โมอะคูสติก. ใน การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18.
- สุรเดช ศรีคำ; ไพรพนา วรจักร; และ อัครเมธ ทองคง . (2547) การศึกษาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกด้วยวิธีเชิงการทดลอง. โครงการงานวิศวกรรม วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี.
- สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ; ปุณยศ วลลิกุล; และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา. (2549). การออกแบบและวิเคราะห์การทำงานระบบทำความเข้าใจแบบเทอร์โมอะคูสติก, ใน การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20.
- บัญชา คังตระกูล (2551) เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก: การศึกษาหลักการทำงานและพารามิเตอร์ วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี. 2(1): 24-28.
- สกล วิฑูรกิจ. (2551). การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก. วิทยานิพนธ์สาขา วท.ม. (วิทยาศาสตร์ศึกษา). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
- สุรัชย์ ทรัพย์เพิ่ม; วรณัฐ แจ่มสว่าง; และ นพพล มิ่งเมือง. (2552). การศึกษาเชิงการทดลองการทำความเข้าใจด้วยคลื่นเสียง. ใน โครงการจัดประชุมวิชาการเพื่อนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 15.
- นรา บุรีพันธ์; และบัญชา คังตระกูล. (2554). การออกแบบการสร้างและทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก. การประชุมวิชาการระดับชาติเบญจมิตรวิชาการ ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธนบุรี.
- อิศเรศ รุชกัลยา. (2554). การทำความเข้าใจด้วยคลื่นเสียง. ใน วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3(19): 97-102.
- อิศเรศ รุชกัลยา. (2555). การศึกษาทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่ง. ใน วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 35(3).
- Lord Rayleigh. (1878) The Explanation of Certain Acoustical Phenomena. In Journal of Nature. V.18, pp. 319-321.
- K.T. Feldman Jr. (1968) Review of The Literature on Rijke thermoacoustic Phenomena. In Journal of Sound and Vibration. V. 7. pp. 83-89.
- Rott N. (1969) Damped and Thermally Driven Acoustic Oscillations. In Journal of Wide and Narrow Tubes. Z. Agnew. Math. Phys. V. 20. pp. 230-243.
- Ceperley PH. (1979) A Pistonless Stirling Engine-The Traveling Wave Heat Engine. In Journal of Acoust. Soc. Am. V 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. In Journal of Acoust. Soc. Am. 84(4). pp. 1145-1180.
- W, Pat Arnott; Richard, Raspet; and Henry, E.Bass.* (1991). Thermoacoustic Engines. Ultrasonics Symposium. pp. 995-1003.
- Shuliang, Zhou; and Yoichi, Matsubara.* (1998). Experimental Research of Thermoacoustic Prime Mover. In Journal of Cryogenics. V.387. pp.813 – 822.
- Yong, Tae Kim; Min, Gon Kim; and Nam, Ic Kwon.* (1998). Optimum Position of A Stack Assembly A Thermoacoustic Generator. In Journal of the Korean Physical Society. V.33. pp. 406-413.
- Adeff, J.A; and Hofler, T.J.* (2000). Design and Construction of A Solar-Powered Thermoacoustically Driven Thermoacoustic Refrigerator. In Journal of Acoust Soc Am V.107. pp.37-42.
- Backhaus, S; and Swift, G W.* (2000). A Thermoacoustic-Stirling Heat Engine: Detailed study. In Journal of Acous Soc Am. V.107. pp.3148-3166.
- Biwa, T; et al.* (2001). Work Flow Measurements in A Thermoacoustic Engine. In Journal of Cryogenics. V.41. pp. 305-310.
- Daniel, A; Russell; and Weibull, P.* (2002). Tabletop Thermoacoustic Refrigerator for Demonstration. In Journal of Am J Phys. V.70. pp. 1231-1233.
- Swift, G W.* (2002). Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators. In Los Acoustical Society of American.
- Ueda, Y; et al.* (2004). Experimental Studies of A Thermoacoustic Stirling prime mover and Its Application to A Cooler. In Journal of Acoust Soc Am V.115. pp. 1134-1141.
- Sungryel, Choi; et al.* (2004). Investigation On The Pressure drop Characteristics of Cryocooler Regenerators Under Oscillating Flow and Pulsating Pressure Conditions. In Journal of Cryogenics. V.44. pp. 203-210
- Sakamoto; and Watanabe.* (2004). The Experimental Studies of Thermoacoustic Cooler. In Journal of Ultrasonics. V.42. pp. 53-56.
- Lampe, R.* (2008). Design and Testing of Rapid Prototyped Stacks for Thermoacoustic Application. In Proceeding of The Nation Conference on Undergraduate Research (NCUR). pp. 1-8

- Konstantin, I M; Najmeddin, S T; and Cecilia,D R.* (2008). Small-Scale Thermoacoustic Engine Demonstrator. In *Proceeding of Power MEMS*. pp. 373 – 376. Sendai, Japan.
- N.B.H.M, Abd Settari.* (2008). Thermal Performance of A thermoacoustic Stack. Dissertation, M.Eng. (Mechanical Engineering). University Technology Malaysia.
- Chao Shen; et al.* (2009). Performance of Solar Powered Thermoacoustic Engine at Different Tilted Angles. In *Journal of Applied Thermal Engineering* V.29. pp.2745-2756.
- David, L; et al.* (2009). Waste-Heat-Driven Thermoacoustic Engine and Refrigerator. In *Proceeding of ACOUSTICS 2009*. Adelaide, Australia.
- Abdulrahman, S; et al.* (2009). Performance Studies of Travelling-wave Thermoacoustic Engine for Selected Low-Cost Regenerators. In *Proceeding of The SEM Annual Conference*. Albuquerque, New Mexico, USA.
- Slaton, W V.* (2010). An Open-Air Infrasonic Thermoacoustic Engine. In *Journal of Applied Acoustics*. V.71. pp 226-240.
- Konstantin, I M.* (2010). Thermoacoustic Energy Analysis of Transverse-Pin and Tortuous Stacks at Large Acoustic Displacements.International. In *Journal of Thermal Sciences*. V.49. pp. 1019-1025.
- Tasnima, S H; Mahmudb, H; & Fraser, R A.* (2011). Second law analysis of porous thermoacoustic stack system. In *Journal of Applied Thermal Engineering* V.31. pp.2301-2311.
- AS, Abduljalil; Z Yu; & AJ Jaworski.* (2011). Selection and Experimental Evaluation of Low-Cost Porous Materials for Regenerator Applications in Thermoacoustic Engine. *Materials and Design*. V.32. pp. 217-228.
- Tasnim; S H.* (2011). Porous Media Thermoacoustic Stacks: Measurements and Models. Dissertation, Ph.D. (Mechanical Engineering). University of Waterloo. Ontario. Canada.
- N.M. Hariharan; P. Sivashanmugam; & S. Kasthuriengan.* (2012). Influence of Stack Geometry and Resonator Length on The Performance of Thermoacoustic Engine. In *Journal of Applied Acoustics*. V.73. pp. 1052-1058.
- Jie Lin; et al.* (2013). The Exergy Efficiency and Output Acoustic Power Performance Optimization of The Thermoacoustic Engine Micro-cycle. In *Journal of Advanced Materials Research*. V.712-715. pp. 1609-1613.

- Taekyung Ki; and Sangkwon Jeong.* (2013). Design and Analysis of Highly Effective Pulse tube Engine. In *Journal of Applied Thermal Engineering*. V.53. pp. 31-36
- Huifang, Kang; et al.* (2013). Thermoacoustic Travelling-Wave Cooler Driven by Cascade Thermoacoustic Engine. *Applied Thermal Engineering*. V.59. pp. 223-231.
- http://www.sa.ac.th/winyoo/mechanicswave/wa_resonace.htm





ภาคผนวก



รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

L_s	=	ความยาวรีเจนเนอเรเตอร์	m
L	=	ความยาวท่อ	m
λ	=	ความยาวคลื่น	m
V	=	ความเร็วเสียงผ่านอากาศ	m/s
ω	=	ความกว้างคลื่น	m
f_n	=	ความถี่	Hz
n	=	จำนวนเต็มบวก	
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ	m
γ	=	อัตราส่วนความจุความร้อน	
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ	J/kg.K
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ	K
ε	=	เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง	%
V_b	=	ปริมาตรรวม	m ³
V_s	=	ปริมาตรเนื้อของแข็ง	m ³
Q_{in}	=	พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้า	W
$P_{net\ out}$	=	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_1	=	อุณหภูมิที่ทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์	°C
T_2	=	อุณหภูมิที่ทางออกรีเจนเนอเรเตอร์	°C
T_{out}	=	อุณหภูมิที่ทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	°C
V_{out}	=	ความเร็วลมที่ทางออกเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก	m/s



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก

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

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอร์เรเตอร์

การทดลองหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างโดยแทนที่ด้วยน้ำ (liquid displacement method)
ของเม็ดดินเผา เซรามิก ลูกแก้ว

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. บีกเกอร์แก้ว 2000 มิลลิลิตร
2. กระบอกตวง 100 มิลลิลิตร
3. กระบอกตวง 10 มิลลิลิตร
4. กรวยแก้ว
5. เม็ดดินเผา
6. เซรามิก
7. ลูกแก้ว



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 51 อุปกรณ์วัดตวง (ก) บีกเกอร์แก้ว 2000 มิลลิลิตร (ข) กระบอกตวง 100 มิลลิลิตร
กระบอกตวง 10 มิลลิลิตรและกรวยแก้ว



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบ 52 วัสดุที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรเตอร์นำมาทดสอบเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง (ก) เม็ดดินเผา
(ข) เซรามิก (ค) ลูกแก้ว

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างแบบแทนที่ด้วยน้ำ

1. ใส่วัสดุพรมลงในบีกเกอร์แก้วที่หนึ่งปริมาณ 1000 มิลลิลิตร V_b
2. ใส่น้ำลงในบีกเกอร์แก้วที่สองปริมาณ 1000 มิลลิลิตร
3. เทน้ำจากบีกเกอร์แก้วที่สองลงในบีกเกอร์แก้วที่หนึ่งจนระดับน้ำในบีกเกอร์ที่หนึ่งถึงระดับ 1000 มิลลิลิตร
4. จดบันทึกปริมาณน้ำที่เหลือ V_s อยู่ในบีกเกอร์แก้วที่สอง
5. คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างโดยใช้สมการที่ 2.6

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

ผลการทดลอง

ตาราง 4 ผลการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างแบบแทนที่ด้วยน้ำ

ชนิดวัสดุ	V_b (cm ³)	V_s (cm ³)	ϵ (%)
เม็ดดินเผา	1000	550	45.00
เซรามิก	1000	542	45.80
ลูกแก้ว	1000	575	42.50

การทดสอบเปอร์เซ็นต์ช่องว่างแบบใช้ค่าความหนาแน่น

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก
2. เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์
3. กระบอกตวงปริมาตร 940 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

1. เตรียมตัวอย่างวัสดุพูนคือ เม็ดดินเผา, เซรามิก และลูกแก้ว ชนิดละ 5 ตัวอย่าง
2. วัดขนาดตัวอย่างทั้งหมดด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์และคำนวณปริมาตร
3. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทั้งหมด
4. คำนวณหาความหนาแน่นโดยใช้สมการที่ 2.7

$$\rho = \frac{m}{V}$$

5. หาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุพูนตัวอย่างทั้ง 5 ชิ้น
6. ชั่งน้ำหนักวัสดุพูนทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 0.00094 m³
6. คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างโดยใช้สมการที่ 2.6

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

โดยที่

$$V_s = \frac{m}{\rho}$$

ผลการทดลอง

ตาราง 5 การทดสอบเปอร์เซ็นต์ช่องว่างแบบใช้ค่าความหนาแน่น

ชนิดของวัสดุ	ρ (Kg/m ³)	V_b (m ³)	m (Kg)	ε (%)
เม็ดดินเผา	680.20	0.00094	0.391	39.00
เซรามิก	1375.74	0.00094	0.686	46.95
ลูกแก้ว	2510.21	0.00094	1.267	46.50

การเตรียมรีเจนเนอร์เรเตอร์ในการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

อุปกรณ์ในการเตรียมรีเจนเนอร์เรเตอร์

1. วัสดุพูน 3 ชนิดดังนี้ เม็ดดินเผา เซรามิก ลูกแก้ว
2. กระบอกเหล็กปริมาตรบรรจุ 0.00094 m³
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ดังภาพประกอบที่ 23

วิธีและขั้นตอนการเตรียมรีเจนเนอร์เรเตอร์

1. คำนวณน้ำหนักของรีเจนเนอร์เรเตอร์ที่ต้องใช้ในแต่ละค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 40 45 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สมการที่ 2.6

จะได้

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

โดยให้

$$V_s = V_b - \frac{\epsilon}{100} \times V_b$$

และจากสมการที่ 2.7

$$\rho = \frac{m}{V}$$

จะได้

$$V_b = 0.00094 \text{ m}^3$$

ตาราง 6 รายละเอียดค่าต่างๆในการเตรียมรีเจนเนอเรเตอร์เพื่อทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์	ε (%)	ρ (Kg/m ³)	V_b (m ³)	V_s (m ³)	m (g)
เม็ทดินเผา	40	680.40	0.00094	0.000564	384
เม็ทดินเผา	45	680.40	0.00094	0.000517	352
เม็ทดินเผา	50	680.40	0.00094	0.000470	320
เซรามิก	40	1375.74	0.00094	0.000564	776
เซรามิก	45	1375.74	0.00094	0.000517	711
เซรามิก	50	1375.74	0.00094	0.000470	647
ลูกแก้ว	40	2510.21	0.00094	0.000564	1416
ลูกแก้ว	45	2510.21	0.00094	0.000517	1298
ลูกแก้ว	50	2510.21	0.00094	0.000470	1180

การคำนวณกำลังที่ได้ออกมาจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก รีเจนเนอเรเตอร์ลูกแก้วที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 50 % $T_1 = 195^\circ\text{C}$, $T_2 = 76^\circ\text{C}$, $V_{\text{out}} = 0.38 \text{ m}^3/\text{s}$

$$P_{\text{net, out}} = \frac{1}{2} \rho A V_{\text{out}}^3$$

$$\text{ที่ } \rho @ T_{\text{out}} 34^\circ\text{C} = 1.147 \text{ kg/m}^3, A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} 0.06^2$$

$$P_{\text{net, out}} = \frac{1}{2} (1.147) \frac{\pi}{4} 0.06^2 (0.38^3) = 0.089 \text{ mW}$$



ภาคผนวก ค

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตาราง 7 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ 40%

รีเจนเนอเรเตอร์	หน้าที่	T_1 °C	T_2 °C	T_{out} °C	V_{out} m/s	$T_1 - T_2$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P_{out} mW
เม็คตินเผา	เริ่มทำงาน	6	76	34	0.04	42	1.15504	1980	0.0001045
	กำลังสูงสุด	17	222	90	0.11	132	1.13936	1980	0.0021439
เซรามิก	เริ่มทำงาน	14	186	43	0.04	143	1.14716	1980	0.0001038
	กำลังสูงสุด	18	224	90	0.09	134	1.13549	1980	0.0011702
ลูกแก้ว	เริ่มทำงาน	4	69	32	0.06	37	1.16300	1980	0.0003551
	กำลังสูงสุด	16	201	77	0.16	124	1.15109	1980	0.0066655

ตาราง 8 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ 45%

รีเจนเนอเรเตอร์	หน้าที่	T_1 °C	T_2 °C	T_{out} °C	V_{out} m/s	$T_1 - T_2$ °C	ρ kg/m ³	Q_{in} W	P_{out} mW
เม็คตินเผา	เริ่มทำงาน	5	86	35	0.05	51	1.15901	1980	0.0002048
	กำลังสูงสุด	17	221	88	0.19	133	1.13936	1980	0.0110480
เซรามิก	เริ่มทำงาน	7	102	41	0.04	61	1.15504	1980	0.0001045
	กำลังสูงสุด	18	224	89	0.19	135	1.13549	1980	0.0110105
ลูกแก้ว	เริ่มทำงาน	3	51	32	0.07	19	1.15504	1980	0.0005601
	กำลังสูงสุด	15	199	78	0.33	121	1.14325	1980	0.0580825

ตาราง 9 ผลการทดสอบเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคที่ระดับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของรีเจนเนอเรเตอร์ 50%

รีเจนเนอเรเตอร์	นาที่	T_1	T_2	T_{out}	V_{out}	$T_1 - T_2$	ρ	Q_{in}	P_{out}
		°C	°C	°C	m/s	°C	kg/m ³	W	mW
เม็ดดินเผา	เริ่มทำงาน	4	59	33	0.05	26	1.15109	1980	0.0002034
	กำลังสูงสุด	17	220	89	0.27	131	1.13549	1980	0.0315964
เซรามิก	เริ่มทำงาน	7	99	40	0.04	59	1.15109	1980	0.0001041
	กำลังสูงสุด	17	209	85	0.20	124	1.13549	1980	0.0128421
ลูกแก้ว	เริ่มทำงาน	3	50	32	0.09	18	1.15504	1980	0.0011904
	กำลังสูงสุด	14	186	76	0.40	110	1.14716	1980	0.1037926

ความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคเข้าสู่ทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ในการทดลองที่ 1980 วัดได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 9 แอมป์แปร์ และแรงดันไฟฟ้าที่ 220 โวลท์ ให้ฮีทเตอร์ขนาด 2000 วัตต์



ภาคผนวก ง

นियามศัพท์เฉพาะ

นิยามศัพท์เฉพาะ

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

รีเจนเนอเรเตอร์ หรือ สแต็ก เป็นหัวใจหลักสำคัญของระบบเรอร์โมอะคูสติกเพราะปรากฏการณ์เรอร์โมอะคูสติกเกิดขึ้นในรีเจนเนอเรเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์จึงอุปกรณ์ที่สำคัญในการเกิดวัฏจักรการทำงานทางเรอร์โมอะคูสติก เป็นวัสดุพูนมีช่องว่างเล็กๆเพื่อให้พาร์เซลของของไหลทำงานสามารถเคลื่อนที่แลกเปลี่ยนความร้อนไปมาระหว่างปลายทางด้านร้อนกับปลายทางด้านเย็นของรีเจนเนอเรเตอร์

พาร์เซล เป็นการพิจารณาลึกลงไปถึงอากาศที่อยู่ภายในรูเล็กๆส่วนหนึ่งที่ติดกับผิวรูเล็กๆภายในสแต็ก เลือกรัศมีของอากาศส่วนหนึ่ง อากาศส่วนนี้ควรมีขนาดพอสมควรที่จะเป็นไปตามกฎทางอุณหพลศาสตร์

ฮีตเตอร์ เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่จ่ายเข้าให้กับเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก เข้าสู่ทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ที่อยู่ภายในเครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติก

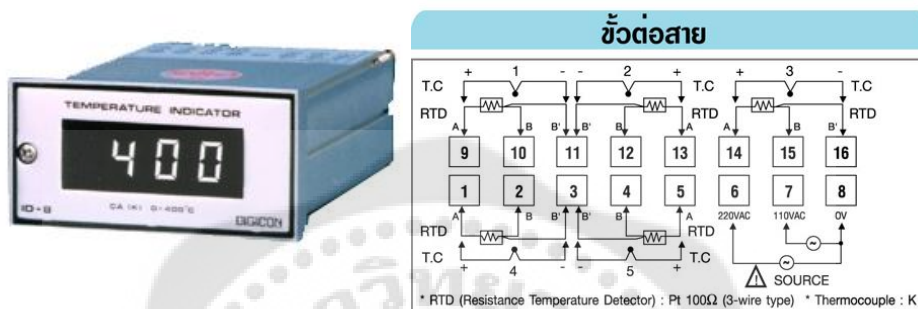


ภาคผนวก จ

รายละเอียดเครื่องมือใช้สำหรับวัดเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

รายละเอียดเครื่องมือใช้สำหรับวัดเครื่องยนต์เรือโมอะคุสติก

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

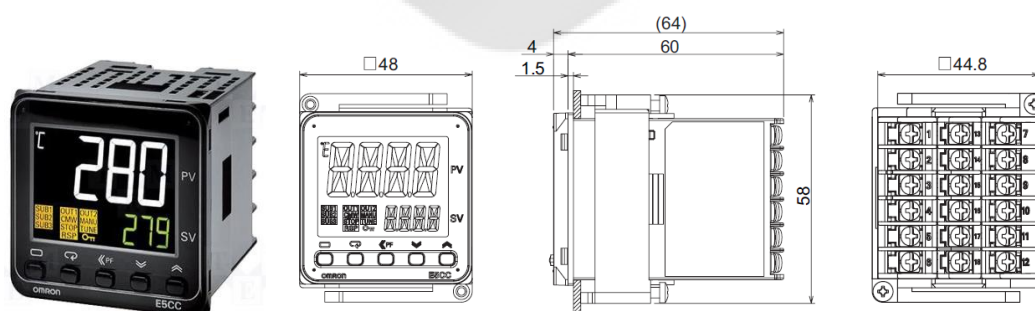
เครื่องวัดความเร็วลม testo 425 เป็นเครื่องมือวัดที่สามารถวัดได้ทั้งความเร็วลมและอุณหภูมิได้พร้อมกัน



รายละเอียด :

- เครื่องวัดค่าความเร็วลมและอุณหภูมิ
- ชนิดของหัววัดอุณหภูมิ แบบ NTC :ช่วงการวัดตั้งแต่ -20 ถึง +70 °C ค่าความถูกต้อง $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (0 ถึง +60 °C) $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ (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 inputs	Pressure transmitter	PT100	0 ~ 2000 to 1800 (°C) / 3600 to 3200 (°F)
		2	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
		3	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
	Thermocouple	K	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
		6	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
		7	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
		8	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
		9	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
		10	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
		11	0 to 100 to 100 (°C) / 32 to 200 to 200 (°F)
Analog	Current input	4~20mA	4 to 20mA
		0~5V	0 to 5V
		0~10V	0 to 10V
		0~15V	0 to 15V
		0~20V	0 to 20V
		0~25V	0 to 25V
		0~30V	0 to 30V
		0~35V	0 to 35V
		0~40V	0 to 40V
		0~45V	0 to 45V

*The default "SP" is "SP".
*SP will be displayed when a pressure transmitter is reliably connected while input type is not set to 4. To cancel the SP display, connect the wiring and the power supply.

Alarms

Setting	Alarm type	Alarm output function
0	No alarm function	Output off
1	Deviation upper limit	ON: Very high OFF: Very low
2	Deviation upper limit	ON: Very high OFF: Very low
3	Deviation lower limit	ON: Very high OFF: Very low
4	Deviation upper/lower range	ON: Very high OFF: Very low
5	Deviation upper limit	ON: Very high OFF: Very low
6	Deviation upper limit	ON: Very high OFF: Very low
7	Deviation lower limit	ON: Very high OFF: Very low
8	Absolute value upper limit	ON: Very high OFF: Very low
9	Absolute value lower limit	ON: Very high OFF: Very low
10	Absolute value upper limit	ON: Very high OFF: Very low
11	Absolute value lower limit	ON: Very high OFF: Very low
12	LRA (only for alarm 1)	ON: Very high OFF: Very low
13	IV Change Rate Alarm	ON: Very high OFF: Very low
14	SP absolute value upper limit	ON: Very high OFF: Very low
15	SP absolute value lower limit	ON: Very high OFF: Very low
16	MP absolute value upper limit	ON: Very high OFF: Very low
17	MP absolute value lower limit	ON: Very high OFF: Very low
18	RSP absolute value upper limit	ON: Very high OFF: Very low
19	RSP absolute value lower limit	ON: Very high OFF: Very low

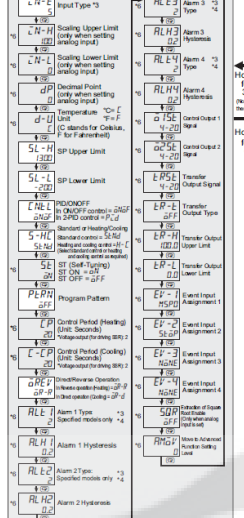
*1: Upper and lower limits can be set for parameters 1, 4 and 5 to provide for different types of alarm. These are indicated by the letter "S" and "L".
* The default alarm type is "2".

Conformance to EN/IEC Standards
This is a class A product.
In residential areas it may cause radio interference, in which case the user may be required to take adequate measures to reduce interference.

Conformance to Safety Standards
Reinforced insulation is provided between input power supply, relay outputs, and between other terminals.

Initial Setting Level

Operation stopped.
(Control alarm and both stopped.)

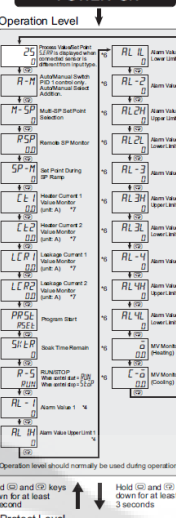


Initial setting level enables users to specify their preferred operating conditions (input type, alarm type, control method, etc.).

*3: Refer to the adjoining table for details of input types and alarm types.
*4: Applicable only to models with alarm functions.
*5: Operation is stopped when input to the initial setting level (control alarm) is not stopped.
*6: The graduated setting items are not displayed for some models and some settings of other setting items.
*7: Applicable only to models with heater burnout functions.
*8: The first numeric digit of the product code are displayed in the No. 2 display. The setting cannot be changed and there is nothing that you need to set.

Operation Level

Check the wiring before turning ON the power supply.

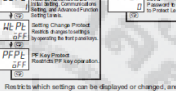


Operation level should normally be used during operations.

Hold [SP] and [SET] keys down for at least 1 second.

Hold [SP] and [SET] keys down for at least 3 seconds.

Protect Level



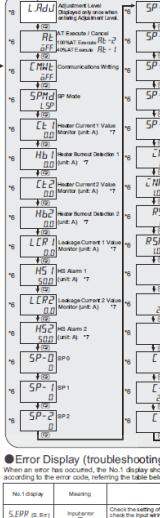
Reset to which settings can be displayed or changed, and restore changes by key operation.

Other functions

Refer to the ESCC/ESC Digital Controllers User's Manual (Cat. No. H116) for information on the Advanced Function Setting Level, Manual Control Level, and other functions.
Refer to the ESCC/ESC Digital Controller Communications Manual (Cat. No. H117) for information on communications.

Adjustment Level

Adjustment level enables users to specify their preferred operating conditions (input type, alarm type, control method, etc.).



Adjustment level is for entering set values and shift values for control.

Error Display (troubleshooting)

When an error is detected, the No. 1 display shows the error code. Take necessary measures according to the error code, referring to the table below.

No. 1 display	Meaning	Action
SEFF (alarm)	Input error	Check the setting of the input type (parameter 1) and the wiring of the input terminal.
E333 (alarm)	NO converter error	Check the connection of the converter and the wiring of the input terminal.
E111 (alarm)	Memory error	Turn the power OFF the back ON again. If the display shows the error, the converter must be replaced. If the display is not shown, the converter must be replaced. Check the connection of the converter and the wiring of the input terminal.

If the input value exceeds the display limit (-1999 to 9999), though it is within the control range (E222) will be displayed under -1999 and E223 above 9999. Under these conditions, control output and alarm output will operate normally.

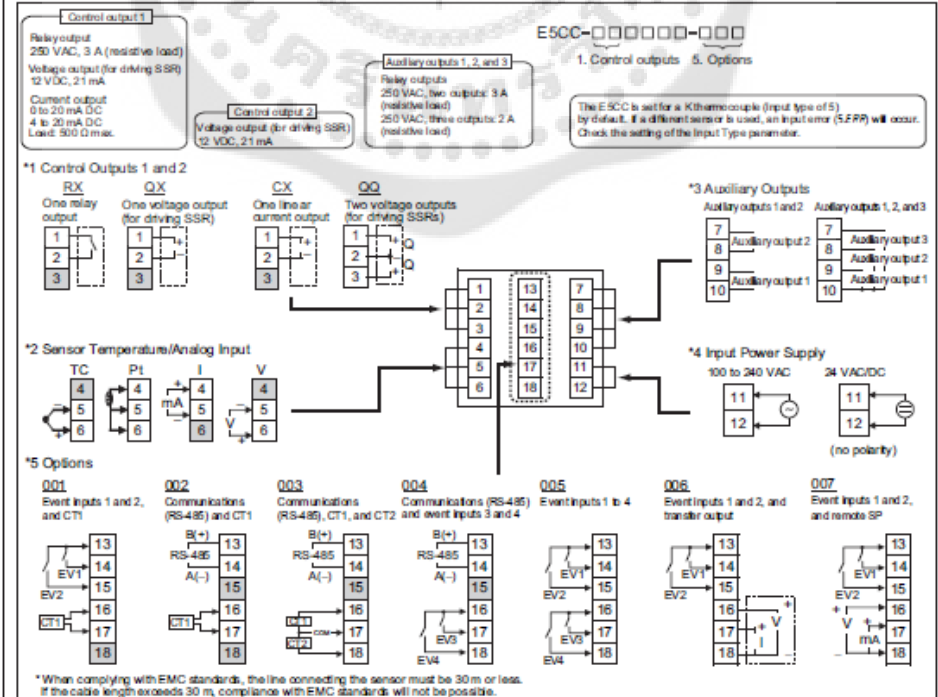
Refer to the ESCC/ESC Digital Controller User's Manual (Cat. No. H116) for the controller's ranges.

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

OMRON EUROPE B.V.
Vogelstein 6140, NL-2112 JD Hoofddorp The Netherlands
Phone 31-2356-81-300
FAX 31-2356-81-338
OMRON ELECTRONICS LLC
One Commerce Drive Schaumburg, IL 60173-6302 U.S.A.
Phone 1-847-843-7800
FAX 1-847-843-7767
OMRON ASIA PACIFIC PTE. LTD.
No. 433A Alexandra Road #05-09/08 (Lobby 2),
Alexandra Technopark, Singapore 119967
Phone 65-6335-3011
FAX 65-6335-2711
OMRON Corporation
Shikogi Horikawa, Shimogyo-ku, Kyoto 600-8530 JAPAN

Connections (The applicability of the electric terminals varies with the type of machine.)

Do not connect anything to the terminals that are shaded gray.

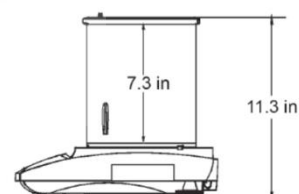
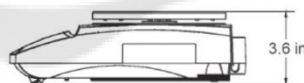
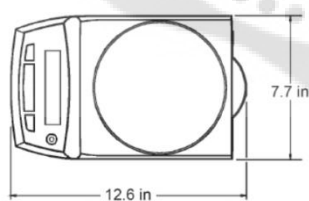


* When complying with EMC standards, the line connecting the sensor must be 30 m or less. If the cable length exceeds 30 m, compliance with EMC standards will not be possible.

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 Netherlands 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	1.1°C or 0.4%
							J	Reducing, Vacuum, Inert. Limited Use in Oxidising at high Temperatures not recommended 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%	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%	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	-5.528 to 20.872	-200 to 1250°C 2.2°C or 0.75% above 0°C 2.0% below 0°C	0.5°C or 0.4%
				No standard Use IEC 584-3 Color Codes			N	Alternative to Type K. More stable at high Temperatures	Omega-P Microsil Ni-Cr-Si	Omega-N Nisil Ni-Si-Mg	-270 to 1300°C Therm. Grade 0 to 200°C Ext. Grade	-4.345 to 47.513	2.2°C or 0.75% above 0°C 2.0% below 0°C	1.1°C or 0.4%
							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%	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	1.0°C or 0.4%
				No standard Use Copper Wire			B	Oxidising or Inert. Do not insert in metal tubes. Beware of contamination. High Temperature. 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	None established

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





ภาคผนวก จ

บทความที่เผยแพร่

การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53 “Smart Agriculture "The future of Thailand”

ของ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระหว่างวันที่ 3-6 กุมภาพันธ์ 2558

ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



คณะกรรมการฝ่ายจัดพิมพ์เอกสาร

ดร.นิรุช ภาชนะทิพย์
ที่ปรึกษา

นายปัญญา ชี้อตรง
ประธานกรรมการ

นายพลวัฒน์ ตันหัน
รองประธานกรรมการ

นายจรูญศักดิ์ สอนสวรรค์
กรรมการ

นางวัชร ท่องทิพย์
กรรมการ

นางสาวชลลวีสรร วิบุรณวงศ์
กรรมการ

นายวิทยา วงษ์เอี่ยม
กรรมการ

นางสาวพัชกร กรวลัยภคณัช
กรรมการ

นางสาวสิริกัญญา มณีนิล
กรรมการ

นางสาวลิลลา วุฒิวนิชยกุล
กรรมการ

นางสาวจิราวรรณ สุริยกุล ณ อยุธยา
กรรมการ

นางสาวสุดธิดา มีสวัสดิ์
กรรมการ

นางนฤมล อินตา
กรรมการ

นางสาวธิดา จันทาพูน
กรรมการ

นายภาณุวัฒน์ บุญชัยกมลอากร
กรรมการ

นางสาวปฐมวดี กุลวัฒน์ไพศาล
กรรมการและเลขานุการ

นางสาวกฤษฎี ปรีวัตรกุล
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางปนัดดา ดีहरัง
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวธัญญ์นัฐดา กุนอก
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ



ผ.ศ. 62/0944

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์**

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร			1. รศ.ดร.ศิริ ชัยเสรี	
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์			2. รศ.ดร.อรรณพ มุ่งเจริญ	
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์				
3. ผศ.ดร.พงษ์ธร พรหมบุตร	4. ผศ.ดร.อรรณพ พุทธาทิพัทธ์ผล	5. ผศ.ดร.ธนศ อรุณศรีโสภณ	6. ผศ.ดร.ชวลิต กิตติชัยการ	
7. ผศ.ดร.อภิชาติ แจ่มบำรุง	8. ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์			
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์				
9. ผศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชัย	10. ผศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์	11. ผศ.ดร.อภิชาติ ชาติสังกาศ	12. ผศ.ดร.ทรงวุฒิ เสงพะธำณี	
13. ผศ.ดร.วีระเกษม สอนผกา	14. ผศ.ดร.สุวิมล สังขวานิชย์	15. รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร	16. รศ.ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา	
17. ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	18. รศ.ดร.สันติ ชินานุวัฒน์	19. ดร.จักรพันธ์ เทือกดี	20. รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์	
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์				
21. รศ.ดร.เอกชัย ไทศาลกิตติสกุล	22. ดร.มิตี รุจามุรักษ์	23. ดร.เชาวลิต มิตรสันติสุข	24. รศ.ดร.มงคล รักษาพงษ์วงศ์	
25. ดร.สฤชัย เชนาภาพฤกษา	26. รศ.ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ	27. ผศ.ดร.สมหญิง ไทยนิต	28. ผศ.ดร.ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม	
ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์			29. ดร.มนต์ชัย สุระรัตน์ชัย	
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์			30. รศ.ดร.จันทนา จันทราพรชัย	
ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์			31. รศ.ดร.สุวัฒน์ จิตตลดาการ	32. ผศ.ดร.สิตางค์ พิไลย์หล้า
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์				
33. ผศ.ดร.สมเจตน์ พันธ์พันธ์	34. ผศ.ดร.บุญมา ตั้งบริบูรณ์	35. ผศ.ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ	36. ผศ.ดร.ราชธีร เศรษฐกิจเจริญกิจ	
37. ผศ.ดร.อมรรัตน์ เลิศวรศิริกุล	38. ดร.ยุรนาท นาญลายวง	39. ดร.ปริญญา อภาจาโสด		
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์				
40. รศ.กัชรารักษ์ 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 ภัลลัญชัย	46. ดร.ปณณมี สังคมกุล	47. ดร.สุวิภากร วิชกุล	
48. ผศ.ดร.จันทศิริ สิงห์เดือน	49. ผศ.ดร.ชนะ รักศิริ	50. รศ.ดร.พิชญ์ ชาญเศรษฐิกุล	51. รศ.พิภพ สติภากรณ	
ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน				
52. รศ.วิชา นันทนการ	53. รศ.ดร.ประทีป อุษามันธิ์	54. ดร.วันรัฐ อัมมุลลาภิม	55. รศ.ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล	
56. ดร.เอกชัย ศิริกิจพานิชกุล				
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน			57. ดร.ธนา ชีพสมทรง	
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์				
58. ศ.กัธร กุลชล	59. รศ.เลิศวิทย์ 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.อรอนม ตั้งกิจงามวงศ์	
66. ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ	67. ดร.ศิริเดช สุริต	68. ดร.อาทิตย์ ลิ้มปายการ	69. ดร.ปรามณ กำแพงสุทธิวงศ์	
70. ผศ.ธนากร สัมพันธ์รักษ์ เพ็ชรชัย				

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ			
1. รศ.ดร.สายประสิทธิ์ เกิดนิยม	2. รศ.ดร.จุฬาลักษณ์ คำไม้	3. รศ.ดร.พิสนธ์ อุดมวรรัตน์	4. ผศ.ดร.อิสรภาพ ชัยกิตติธนา
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์			
5. รศ.ดร.ผศ.ดร.มรกต ระวีวรรณ	6. รศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศน์ย์กร	7. รศ.ดร.เกรียงไกร เดชกานนท์	
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย			
8. รศ.ดร.หทัยกานต์ มนต์ปิยะ	9. รศ.ดร.กิตติพัฒน์ สีมานนท์	10. รศ.ดร.สุพจน์ เดชะวรสินสกุล	
11. ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ	12. ศ.ดร.สมศักดิ์ ไชยะกนิษฐ์	13. ดร.ปัญญาวิทย์ วัจยว	14. ผศ.ดร.อรอนงค์ เศรษฐบุตร
15. ผศ.ดร.พิรศรี โพวาทอง			
มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง			
16. ดร.วรวรรณ นาคะวิโร	17. ผศ.ดร.สุพัทธา สุทธสุภา		
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (คลองหก)			
18. ดร.ระพี กาญจนะ	19. รศ.ดร.จักรชัย วีระนิตสกุล		
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี			
20. ศ.ดร.สำเริง จักกรใจ	21. ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ		
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่			
22. รศ.ดร.วิเศษ วรรณจรรย์ยา	23. ศ.ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์		
มหาวิทยาลัยศรีปทุม			
24. รศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์	25. รศ.ดร.กักรัตน์ ชัยกุลศิริ		
มหาวิทยาลัยศิลปากร			
26. รศ.วีระ อินทพันธ์	27. ผศ.ดร.สาธิต ศุภรัตน์เมธี		
โรงพยาบาลสัตว์แพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์			
28. น.สพ.ดร.ชัยกร สุทธิญาณพร			
มหาวิทยาลัยบูรพา			
29. รศ.ดร.ธีรศักดิ์ ฤกษ์สมบูรณ์	30. รศ.ดร.ยิ่งสวัสดิ์ ไชยะกุล		
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์			
31. อ.รักพงศ์ สายแก้ว	32. ดร.หทัยรัตน์ มณีเทศ		
กรมทางหลวงชนบท			



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

การศึกษาเชิงทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ลูกแก้ว
เป็นรีเจนเนอเรเตอร์

โดย

ปิยชาติ จันทรานนท์ ประชา บุนยวานิชกุล
และบัญชา คังตระกูล

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

และได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53

ระหว่างวันที่ 3 - 6 กุมภาพันธ์ 2558

พ.ศ. ๒๕๕๘

(รองศาสตราจารย์ ดร.สิริ ชัยเสรี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53

5 กุมภาพันธ์ 2558 สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และ วิศวกรรมศาสตร์ ห้อง 205

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

โดย ปิยชาติ จันทรานนท์ และคณะ

13.40 – 14.00 น. การศึกษาผลกระทบของรีเจนเนอเรเตอร์อูมิเนียมที่มีต่อ
เครื่องยนต์เรอร์โมอะคูสติคแบบเปิดสู่บรรยากาศปลายข้างหนึ่ง
เปิด (สธ.วศ.81/O380)

โดย ภูมิศักดิ์ ผดวาลัย และคณะ

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

โดย พิมาน เณรแก้ว และคณะ

14.20 – 14.40 น. พักรับประทานอาหารว่าง

ประธาน ผศ.ดร.มิตี รุจานุรักษ์

เวลา

เรื่อง

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

โดย วชิรวิทย์ โกมลพิสิฐ และคณะ

รูปแบบหนังสืออิเล็กทรอนิกส์ในซีดี



การศึกษาเชิงทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ลูกแก้วเป็นรีเจนเนอเรเตอร์
Experimental Study of Thermoacoustic Engine Using A Glassball Regenerator

ปิยชาติ จันทรานนท์^{1*} ประชา บุญยวานิชกุล¹ และ บัญชา คังตระกูล²
Piyachat Jantranon^{1*}, Pracha Bunyawichakul¹ and Bancha Kongtrakool²

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอผลการศึกษามรรณณะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ลูกแก้วเป็นรีเจนเนอเรเตอร์ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของระดับความพรุนและลักษณะกายภาพต่างๆของรีเจนเนอเรเตอร์ที่เป็นลูกแก้วที่มีต่อพลังงานที่ได้รับโดยทดลองด้วยเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบปลายเปิด เส้นผ่านศูนย์กลาง 104 มิลลิเมตรใช้อากาศเป็นสารทำงานและรีเจนเนอเรเตอร์มีความยาวประมาณ 110 มิลลิเมตรมีความพรุน 3 ระดับคือ 40% 45% และ 50% จ่ายความร้อนด้วยฮีตเตอร์ขนาด 2000 วัตต์ จนอุณหภูมิถึง 300 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์สามารถกำเนิดคลื่นเสียงและทำให้สารทำงานมีความเร็ว โดยระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มากขึ้นทำให้พลังงานที่ได้รับมีแนวโน้มมากขึ้นตามไปด้วย เครื่องยนต์นี้ให้ผลดีที่สุดที่ระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ 50% โดยเริ่มให้กำเนิดคลื่นเสียงและสารทำงานเริ่มมีความเร็วเมื่อให้ความร้อนผ่านไป 3 นาที ที่อุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์ให้พลังงานสูงสุด 0.104 มิลลิวัตต์เมื่อให้ความร้อนผ่านไป 14 นาทีและอุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ 186 องศาเซลเซียส

ABSTRACT

The objective of this paper is to present the result of an experimental study on the performance of thermoacoustic engine using a glass ball regenerator. This study involves two factors which affect the energy of the open-end type thermoacoustic engine namely: the porosity level and the physical property of the regenerator. The diameter of the engine is 104 mm, which uses the air as its working fluid with a 2000 Watts heater amount, to a temperature reaching 300 °C. Through the experiment, a sound wave can be produced. Moreover, it was observed that if the porosity level of the regenerator is increased with the velocity of the working fluid, more energy is created. This engine has the best result in increasing the level of porosity by 50% by starting the sound wave and working fluid velocity at 50°C which can start the engine at 3 minutes. The engine has maximum power of 0.104 mW when heated 14 minutes at 186°C

Key Words: thermoacoustic engine, regenerator, porosity

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

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จ.นครนายก 26120

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhonnayok 26120

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50230

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, North-Chiang Mai University, Chiang Mai 50230

คำนำ

เครื่องยนต์เรอริโมอะคูสติค (Thermoacoustic engine) เป็นเครื่องยนต์อากาศร้อน (Hot-air engine) ชนิดหนึ่งในเครื่องยนต์ความร้อนที่ทำงานตามวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ทั้งหลายบนหลักความจริงที่ว่าเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ที่ปลายด้านร้อนกับปลายด้านเย็นขึ้นในหลอดเสียงก็จะเกิดคลื่นเสียงขึ้นและคลื่นเสียงนั้นจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายความร้อนเรียกว่า (Streaming) อากาศในท่อจะเกิดการอัดตัวเคลื่อนที่ไปสู่ปลายด้านปิดและขยายตัวเคลื่อนไปสู่ปลายด้านเปิด ได้มีการศึกษาทดลองประยุกต์ต่อปลายท่อด้านเปิดกับลูกสูบเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ (สกล, 2551) ในงานวิจัยนี้ทดลองนำค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของสารทำงานซึ่งเป็นอากาศอันเกิดจากผลทางเรอริโมอะคูสติคที่ความร้อนเปลี่ยนรูปไปเป็นการแกว่ง (Oscillation) ของคลื่นเสียงมาหาพลังงานที่ได้รับไปใช้งานเช่น การผลิตไฟฟ้าในอนาคตและยังมีการทดลองของนักวิจัยที่ผ่านมาที่มีจำนวนมากมุ่งศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ในด้านเครื่องทำความเย็น (Nsorfor, E.C. and Ali, A., 2009; Sakamoto, S. and Watanabe, Y., 2004) ด้วยข้อได้เปรียบของระบบเรอริโมอะคูสติคที่มีมากมายเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ระบบอื่นๆ ทำให้ในปัจจุบันนักวิจัยตื่นตัวศึกษาเพิ่มอย่างมาก เรอริโมอะคูสติคได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วจากข้อได้เปรียบของระบบเรอริโมอะคูสติคที่มีหลักการการทำงานและเทคโนโลยีเรอริโมอะคูสติคที่ค่อนข้างจะซับซ้อนแต่การทำงานในทางปฏิบัตินั้นง่ายมากพร้อมด้วยข้อดีที่ทำให้ระบบเรอริโมอะคูสติคได้รับความสนใจมุ่งศึกษาอย่างมากในขณะนี้คือ เครื่องยนต์เรอริโมอะคูสติคมีความซับซ้อนไม่มากส่งผลให้ต้นทุนในการสร้างและค่าซ่อมบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหว อาทิเช่น ข้อต่อหรือแหวนลูกสูบทำให้เครื่องยนต์เรอริโมอะคูสติคมีอายุใช้งานยาวนานและลดความซับซ้อนของกลไกเครื่องยนต์ คุณลักษณะเด่นที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งของเครื่องยนต์เรอริโมอะคูสติคคือการสันดาปเกิดขึ้นภายนอกกระบอกสูบเพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่เป็นวัสดุที่เผาไหม้หลากหลายรวมถึงความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะเด่นต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วเป็นเหตุผลที่สมควรจะศึกษาเครื่องยนต์เรอริโมอะคูสติคในรายละเอียดต่างๆ รอบด้านเพื่อพัฒนาไปสู่การได้มาซึ่งพลังงานทดแทนอย่างยั่งยืนควบคู่ไปกับพลังงานทดแทนอื่น ๆ ที่มีการศึกษามากมายอย่างหลากหลาย (รัฐพงษ์ และคณะ, 2554) ปัจจุบันการศึกษาวิจัยเรื่องเรอริโมอะคูสติคในประเทศไทยโดยเฉพาะการพัฒนาเครื่องยนต์เรอริโมอะคูสติคต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการยังมีน้อยจึงทำให้ขาดองค์ความรู้ในการพัฒนางานวิจัยเชิงวิชาการเพื่อสร้างองค์ความรู้สำหรับการแข่งขันพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ โดยเฉพาะด้านการทำความเย็นและเครื่องยนต์ต้นกำลังจากหลักการเรอริโมอะคูสติคโดยใช้พลังงานทดแทนเช่น แสงอาทิตย์ (Adeff, J.A. and Hoffer, T.J., 2000) ก๊าซชีวมวล ก๊าซชีวภาพและความร้อนทั้งจากเครื่องยนต์หรือภาคอุตสาหกรรม (Gardner, D.L. and Howard, C.Q., 2009) เป็นต้น งานวิจัยด้านเรอริโมอะคูสติคในปัจจุบันมีการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นทั้งทางด้านเครื่องยนต์และพลังงานที่นำมาป้อนเครื่องยนต์เช่น สารทำงาน อาทิ ฮีเลียม ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ (Li, D.H. et al., 2014) ความดันในระบบและความพรุน (Abduljalil, A.S. et al., 2011) วัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ควรมีค่าความจุความร้อนสูงแต่มีค่าการนำความร้อนต่ำ (อิศเรศ, 2554) ซึ่งวัสดุที่ใช้ทดลองนี้เป็นลูกแก้วมีค่าความจุความร้อนสูงและค่าการนำความร้อนต่ำ ที่สามารถหาได้ง่ายภายในท้องถิ่น ราคาไม่สูง มีรูปทรงกลมสม่ำเสมอและสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าอุณหภูมิในการทดลอง การหาค่าความพรุนใช้หลักการพื้นฐานอย่างง่าย เช่น การวัดขนาดโดยตรงและการแทนที่ด้วยของเหลว ความพรุนยังได้มีการหาหลากหลายวิธี อาทิ

วิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน (อภิรัฐ, 2555) ซึ่งเป็นวิธีทางเลือกใหม่ในการวัดความพรุนที่น่าสนใจถูกพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน วิธีอัลตราโซนิก (Petrauskas, 2007) และวิธีการใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงของความจุไฟฟ้า (Matko, 2003) แต่มีค่าใช้จ่ายสูง ในการทดลองนี้ใช้การหาความพรุนแบบการวัดขนาดโดยตรง ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานที่ง่าย มีค่าใช้จ่ายต่ำและไม่ซับซ้อน การศึกษาเชิงทดลองเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติกที่ใช้ลูกแก้วเป็นรีเจนเนอเรเตอร์นี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาถึงอิทธิพลของระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีต่อพลังงานที่ได้รับโดยทดลองด้วยเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติกแบบปลายเปิด
2. ศึกษาอิทธิพลของลักษณะทางกายภาพของลูกแก้วซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีต่อการทำงานของเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติก

อุปกรณ์และการวิธีการ

อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลองมีส่วนสองส่วนคือ ส่วนของเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติกและส่วนของเครื่องมือวัดและควบคุม (Figure 1) ชุดการทดลองใช้เครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติกแบบปลายเปิดวางในแนวตั้ง ฮีตเตอร์เพื่อให้ความร้อนขนาด 2000 วัตต์ รีเจนเนอเรเตอร์ทำด้วยลูกแก้วรูปทรงกลมมีระดับความพรุนสามระดับได้แก่ 40% 45% และ 50% (Figure 2) วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K วัดความเร็วของสารทำงานด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (testo 425 Compact Thermal Anemometer, Meas.range 0 to +20 m/s, -20 to +70°C, Accuracy ± 0.03 m/s, Resolution 0.01 m/s, 0.1°C)

ขั้นตอนและวิธีการทดลองเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติก

การทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติกเริ่มโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ฮีตเตอร์พร้อมจับเวลาและบันทึกค่าอุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ (T_1) อุณหภูมิทางออกรีเจนเนอเรเตอร์ (T_2) อุณหภูมิทางออกเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติก (T_{out}) และค่าความเร็วลมที่ทางออกเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติก (V) ทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์มีค่า 300°C จึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและยุติการทดลอง จากนั้นทำการเปลี่ยนระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์และทำการทดลองเช่นเดิมจนครบทุกระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ โดยค่ากำลังงานของเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 (M. Veigas *et al.*, 2014)

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

โดยให้ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (Density) A คือ พื้นที่หน้าตัดปากทางออกเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติก (Area) V คือ ความเร็วของอากาศปากทางออกเครื่องยนต์เรเตอร์โมอะคูลติก (Velocity) ในการทดลองใช้วิธีการวัดขนาดโดยตรงหาค่าความพรุน (Porosity, ε) ของรีเจนเนอเรเตอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \times 100\% \quad (2)$$

โดยให้ V_b คือ ปริมาตรรวมของวัสดุพูน (bulk volume) V_s คือ ปริมาตรเนื้อของแข็งของวัสดุพูน (solid volume)

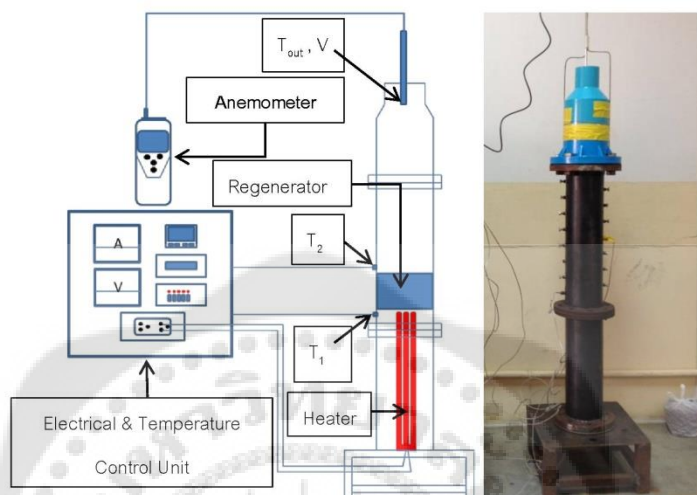


Figure 1 Sketch of thermoacoustic engine and control unit

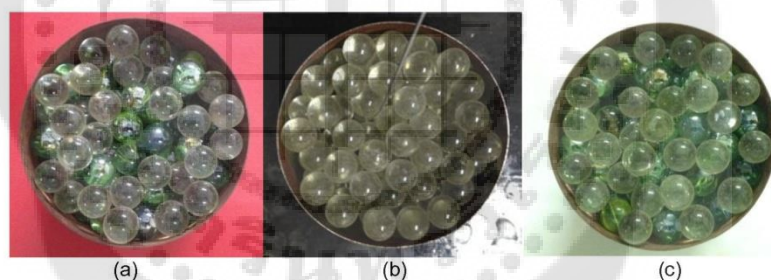


Figure 2 Glass balls regenerator: (a) porosity 40% (b) porosity 45% (c) porosity 50%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองเครื่องยนต์ฮีโรโมอะคูสติก ได้รับค่าอุณหภูมิทางเข้าและทางออกกรีเจนเนอเรเตอร์ อุณหภูมิทางออกเครื่องยนต์ฮีโรโมอะคูสติกแสดงใน (Figure 3, Table 1) แสดงถึงพฤติกรรมของอุณหภูมิทั้งสามจุดที่วัดในการทดลอง พบว่าพฤติกรรมของอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องคล้ายกันทั้งสามระดับ ความพรุนของกรีเจนเนอเรเตอร์และเมื่ออุณหภูมิทางออกกรีเจนเนอเรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของอากาศได้ถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแพร่ซึมจากปลายด้านร้อนผ่านช่องทางไหลที่เรียกกันว่าความพรุนของกรีเจนเนอเรเตอร์ส่งผ่านมาถึงปลายด้านเย็นทำให้เราได้ยินคลื่นเสียงเริ่มก้องขึ้นและ

อากาศเริ่มมีความเร็วเกิดขึ้น อุณหภูมิที่เราเริ่มได้ยินคลื่นเสียงนี้เรียกว่า Onset Temperature เครื่องยนต์นี้เริ่มทำงานได้รวดเร็วและใช้อุณหภูมิในการเริ่มทำงานต่ำที่สุดเมื่อใช้รีเจนเนอเรเตอร์ระดับความพรุน 50 % โดยเครื่องยนต์จะเริ่มทำงานและกำเนิดคลื่นเสียงเมื่อให้ความร้อนผ่านไป 3 นาทีที่อุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ 50 องศาเซลเซียส อากาศมีความเร็ว 0.09 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งเครื่องยนต์ให้พลังงานสูงสุด 0.104 มิลลิวัตต์ ที่อุณหภูมิทางเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ 186 องศาเซลเซียสเมื่อให้ความร้อนผ่านไป 14 นาที อากาศมีความเร็ว 0.40 เมตรต่อวินาที พฤติกรรมของอุณหภูมิทางออกเครื่องยนต์เรอโมอะคูสติกที่ได้รับตลอดการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมिन้อยมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกันทั้งสามระดับความพรุน

ผลการทดลองนี้ยังแสดงถึงอิทธิพลของระดับความพรุนรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เรอโมอะคูสติก (Figure 4, Table 1) แสดงให้เห็นถึงระดับความพรุนที่สูงขึ้นพลังงานที่ได้จากความเร็วในการเคลื่อนที่ของสารทำงานที่ปากทางออกเครื่องยนต์เรอโมอะคูสติกมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามไปด้วย จะเห็นว่าการทำงานที่ได้รับจากเครื่องยนต์เรอโมอะคูสติกแต่ละระดับความพรุนให้กำลังงานออกมาได้สูงสุดแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในส่วนของพฤติกรรมการผลิตกำลังงานออกมาเทียบกับเวลานั้นทั้งสามระดับความพรุนมีพฤติกรรมเช่นเดียวกันคือ เมื่อให้ความร้อนไปช่วงระยะหนึ่งเครื่องยนต์เรอโมอะคูสติกจะเริ่มให้กำเนิดกำลังงานออกมาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสูงสุดแล้วกำลังงานจะลดต่ำลง กำลังงานที่ได้สูงสุดจากความพรุนที่ 40% 45% และ 50% ได้ออกมาเท่ากับ 0.006 มิลลิวัตต์ 0.058 มิลลิวัตต์ และ 0.104 มิลลิวัตต์ตามลำดับ

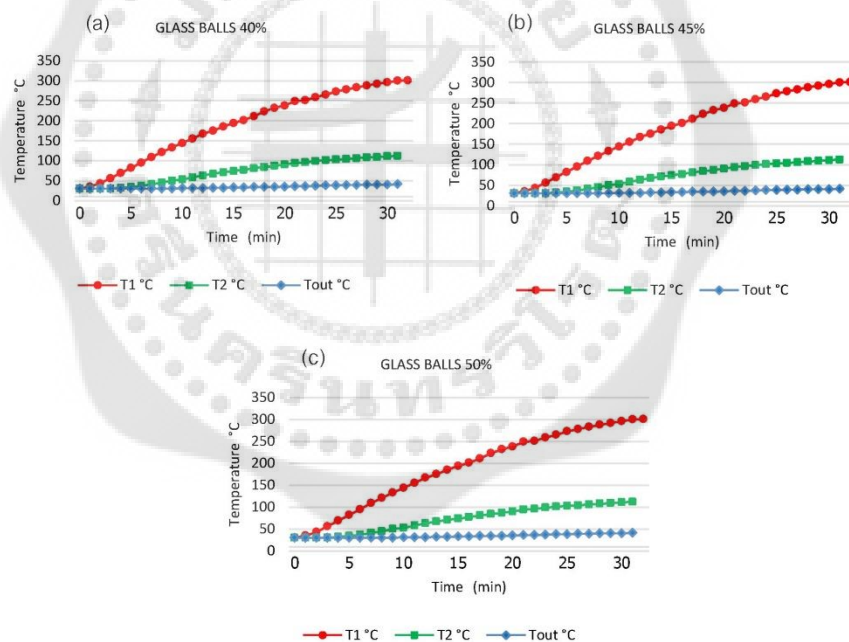


Figure 3 Temperature profile inside the regenerators:(a) Porosity 40% (b) Porosity 45% (c) Porosity 50% [(T1) inlet regenerator (T2) outlet regenerator (Tout) outlet thermoacoustic engine]

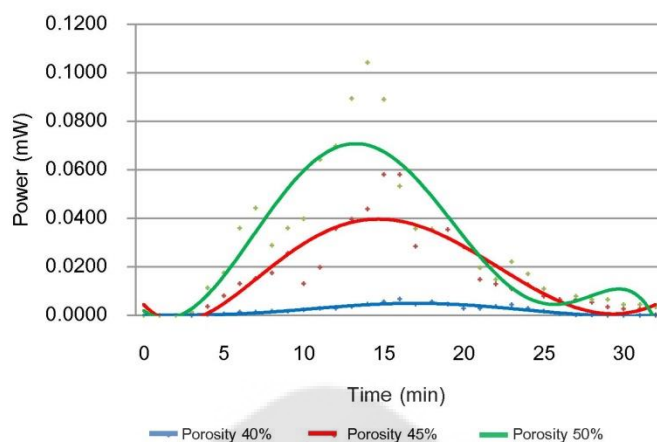


Figure 4 Power of Thermoacoustic engine for Porosity

Table 1 Measured and calculated result

Porosity (%)	Engine start (Onset)		Work Max		Power (mW)
	Time (min)	Temperature (°C)	Time (min)	Temperature (°C)	
40	4	69	16	201	0.006
45	3	51	15	199	0.058
50	3	50	14	186	0.104

สรุป

การศึกษาทดลองเครื่องยนต์เรอริโมอะคูสติค หัวใจหลักที่สำคัญคือรีเจนเนอเรเตอร์ที่เป็นตัวส่งถ่ายความร้อนทำให้เกิดคลื่นเสียงและอากาศมีความเร็ว ในการทดลองนี้ได้ใช้วัสดุคือลูกแก้วซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพอยู่ในกลุ่มฉนวนซึ่งวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์(สแตก)โดยทั่วไปจะมีความจุความร้อนสูงแต่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ(อิศเรศ,2554) เพื่อให้เกิดการพาความร้อนจากปลายด้านร้อนสู่ปลายด้านเย็นของรีเจนเนอเรเตอร์เท่านั้น จากการทดลองนี้พบว่ารีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำด้วยลูกแก้วสามารถทำให้เครื่องยนต์เกิดปรากฏการณ์เรอริโมอะคูสติคให้กำเนิดคลื่นเสียงออกมาขับสารทำงานซึ่งเป็นอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วได้และระดับความพรุนรีเจนเนอเรเตอร์มีผลต่อ กำลังงานที่ได้รับ, เวลาและอุณหภูมิที่เครื่องยนต์เริ่มทำงาน, เวลาและอุณหภูมิที่เครื่องยนต์ให้กำลังงานสูงสุด ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์ที่สูงขึ้นทำให้เครื่องยนต์เรอริโมอะคูสติคมีแนวโน้มให้กำลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย รวมทั้งเวลาในการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์เร็วขึ้น, เวลาที่เครื่องยนต์ให้กำลังงานสูงสุดเร็วขึ้น รวมทั้งอุณหภูมิในการสตาร์ทเริ่มทำงานและให้กำลังงานสูงสุดก็ต่ำลงด้วย ระดับความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์จึงมีความน่าสนใจในการศึกษาทดลองพัฒนาให้ได้มาซึ่งพลังงาน

ต่อไปในอนาคต ในการศึกษาต่อไปที่น่าสนใจคือวัสดุที่ใช้ทำรีเจนเนอเรเตอร์, รูปทรงช่องทางการไหลของรีเจนเนอเรเตอร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในระหว่างการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการทดสอบครั้งนี้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร (IFRPD) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนเครื่องมือวัดในการทดลองจนสำเร็จอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- สกล วิฑูรกิจ. 2551. การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
- อิสเรศ รุชกัลยา. 2554. การทำความเย็นด้วยคลื่นเสียง. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** 19 (3): 97-102.
- รัฐพงษ์ นาคาไชย, สุธาสินี ทองเอี่ยม, สุรสิทธิ์ดา นาคไชย, สุนิสา สุริยะพันธ์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ สมหมาย ปะติตังโข. 2554. การศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสีย้อมจากพืชในประเทศไทย, น.427-433. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49 (สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์)**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อภิรัฐ จันทลักษณ์, วัชรพล ขยประเสริฐ และ เอนก สุขเจริญ. 2555. การวัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน, น. 65-72. ใน **การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.**
- Nsofor, E.C. and Ali, A. 2009. Experimental Study on the Performance of the Thermoacoustic Refrigerating System. *Applied Thermal Engineering* 29: 2672-2679.
- Sakamoto, S. and Watanabe, Y. 2004. The Experimental studies of Thermoacoustic cooler. *Ultrasonics* 42: 53-56.
- Adeff, J. A. and Höfler, T.J. 2000. Design and Construction of a Solar Powered Thermoacoustically Driven Thermoacoustic Refrigerator. *Journal of Acoustical Society of America* 107: 37-42.
- Gardner, D.L. and Howard, C.Q. 2009. Waste-heat-driven Thermoacoustic Engine and Refrigerator. pp 1-3. In *Proceedings of ACOUSTICS 2009: 23-25 November 2009, Adelaide, Australia.*
- Abduljalil, A.S., Yu, Z and Jaworski, A.J. 2011. Selection and experimental evaluation of low-cost porous materials for regenerator applications in thermoacoustic engine. *Materials and Design*. 32: 217-228.
- Li, D.H., Chen, Y.Y and Wu, Z.H. 2014. Study of a liquid-piston traveling-wave thermoacoustic heat engine with different working gases. *Energy* 74: 158-163.
- Matko, V., 2003. Porosity determination by using stochastics method. *Automatika* 44: 155-162.

- Petrauskas, A., 2007. Evaluation of porous food products by using ultrasonic methods. *Ultragarssas (Ultrasound)* 62: 20-25.
- M. Veigas., R. Carballo and G. Iglesias. 2014. Wave and offshore wind energy on an island. *Energy for Development* 22: 57-65.





ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายปิยชาติ จันทรานนท์
วันเดือนปีเกิด	2 เมษายน 2521
สถานที่เกิด	นครศรีธรรมราช
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	39/149 ต.บึงนาราง อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
ประวัติการศึกษา	

พ.ศ.2536	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนชะอวดวิทยาคาร
พ.ศ.2537	มัธยมศึกษาตอนปลาย ม.4 (วิทย์ – คณิต) จากโรงเรียนชะอวดวิทยาคาร
พ.ศ.2538	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ ช่างยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช
พ.ศ.2543	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ช่างยนต์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ
พ.ศ.2545	ปริญญาตรีครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ.2549	ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
พ.ศ.2556	ปริญญาตรีศิลปศาสตรบัณฑิต (ไทยคดีศึกษา) จากมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
พ.ศ.2558	ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ