

อิทธิพลของค่าดัชนีสปริงและอุณหภูมิอบของโลหะผสมจำรูปที่มีผลต่อประสิทธิภาพ เครื่องจักรกลความร้อนออฟเซตแคร็งค์

Influence of Spring Index and Heat Treatment Temperature of Shape Memory Alloys on Offset Crank Heat Engine Efficiency

Bunheng Hok¹, Vannet Yorn¹, อภินันท์ ภูเก้าล้วน² และ Saravy Dum^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ 10 แขวงท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพมหานคร 10600

²ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

*saravy.dum@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าดัชนีสปริงและอุณหภูมิอบของโลหะผสมจำรูปที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อน โดยใช้ลวดโลหะผสมจำรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm เพื่อสร้างสปริงที่มีค่าดัชนี (D/d) เท่ากับ 7, 9 และ 11 ต่อมานำสปริงผ่านกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450°C เป็นเวลา 30 min แล้วจุ่มลงในน้ำเย็นทันที จากนั้นนำสปริงทดสอบแรงคืนตัวด้วยการทดสอบแรงดึงและทดสอบอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) หลังจากที่ได้เงื่อนไขของสปริงที่เหมาะสมแล้ว นำสปริงติดตั้งกับเครื่องจักรกลความร้อนแบบออฟเซตแคร็งค์ โดยเครื่องจักรกลความร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 522 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 120 mm ระยะออฟเซต 50 mm มุมออฟเซต 30° ความยาวสปริงหัดสุดและยืดสุดที่ 60 mm และ 160 mm ตามลำดับ สปริงถูกติดตั้งในแนวเฉียงตลอดเส้นรอบวงของเครื่องจำนวน 9 แถว แต่ละแถวมีสปริง 16 ชิ้น จากผลการทดลองพบว่าสปริงที่มีดัชนี (D/d) เท่ากับ 7 อบที่อุณหภูมิ 400°C มีแรงคืนตัวของสปริงสูงสุดเท่ากับ 3.254 N อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นออสเทนไนต์สิ้นสุดอยู่ที่ 62°C โดยมีช่วง Hysteresis อยู่ที่ 15°C เมื่อนำสปริงไปติดตั้งกับเครื่องจักรกลความร้อนพบว่าที่อุณหภูมิ 75°C เครื่องจักรกลความร้อนสามารถสร้างแรงบิดได้สูงสุด 1.380 N.m กำลังทางกลเท่ากับ 1.391 W และประสิทธิภาพทางกลสูงสุดคือ 0.42% กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 0.255 W และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงสุดคือ 18.32%

คำสำคัญ: โลหะผสมจำรูป, ค่าดัชนีสปริง, เครื่องจักรกลความร้อนออฟเซตแคร็งค์, กระบวนการอบ

Abstract

This research aims to study the effect of the shape memory spring index and heat treatment temperature on the heat engine efficiency using 0.5 mm shape memory wire to form springs with indices of (D/d) 7, 9 and 11. The springs were then subjected to a heat treatment at 350, 400 and 450°C for 30 min followed by quenching in cold water. These specimens were investigated for recovery force with a tensile test and phase transformation temperature with Differential Scanning Calorimeter (DSC). After getting the appropriate spring conditions, the springs were installed in the offset crank heat engine. The heat engine has an outer diameter of 522 mm, an inner diameter of 120 mm, an offset length of 50 mm, an offset angle of 30°, minimum and maximum spring length of 60 mm and 160 mm respectively. Springs were installed 9 rows throughout the circumference of the heat engine with 16 springs each row in the oblique line. The result illustrated that the spring with index of 7, heated at 400°C provides maximum recovery force equal

to 3.254 N, transformation temperature to austenite finish phase at 62°C with the hysteresis of 15°C. When the springs were installed in the heat engine, at the water temperature of 75°C, it was found that the engine can generate maximum torque of 1.380 N.m, the mechanical power is 1.391 W, the maximum mechanical efficiency is 0.42%, the electrical power is 0.255 W and the maximum electrical efficiency is 18.32%

Keywords: Shape Memory Spring, Spring Index, Offset Crank Heat Engine, Heat Treatment

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ผลิตจากฟอสซิล พลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่มีจำนวนจำกัด และเป็นพลังงานสิ้นเปลืองไม่สามารถเกิดใหม่ได้ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน [1-3] จึงมีการส่งเสริมให้ใช้พลังงานหมุนเวียน ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นพลังงานไร้ต้นทุนจากธรรมชาติอีกด้วย พลังงานความร้อนได้พิภพเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า [4] ในประเทศไทยการนำพลังงานความร้อนที่อยู่ในรูปแบบของน้ำพุร้อนมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตไฟฟ้านั้นยังมีจำนวนน้อย [5] เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องเทคโนโลยีและอุณหภูมิที่ต่ำ ส่วนใหญ่มักจะส่งเสริมในด้านการท่องเที่ยว จากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีพบว่าประเทศไทยมีน้ำพุร้อน 112 แห่ง มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 40-100°C [6] ไม่เพียงแต่พลังงานความร้อนที่พบในธรรมชาติยังพบอีกว่ามีพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ซึ่งไม่มีการนำกลับไปใช้งานและถูกปล่อยทิ้งอย่างเปล่าประโยชน์ [7] ในประเทศไทยมีการใช้หม้อต้มไอน้ำประมาณ 8,816 ลูก [8] และมีพลังงานความร้อนสูญเสียสูงถึง 60% ดังนั้นการสร้างอุปกรณ์เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนดังกล่าวมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถนำพลังงานความร้อนเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

จากการศึกษาพบว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำ สามารถทำได้โดยใช้ตัวกลางคือเครื่องจักรกลความร้อน เครื่องจักรกลความร้อนออฟเซตแคร็งค์เป็นอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานทางกลโดยอาศัยแรงขับเคลื่อนของสปริงของโลหะผสมจำรูป [9] ที่อุณหภูมิต่ำเมื่อสปริงได้รับภาระทางกลจะเกิดการยืดตัวไปจากเดิม เมื่อใดก็ตามที่สปริงสัมผัสกับความเย็นสปริงก็จะ

กลับคืนสู่รูปทรงเดิมทันที โลหะผสมจำรูปที่มักจะพบเห็นบ่อยในอุตสาหกรรมนั้นได้แก่กลุ่มโลหะ Au-Cd, Cu-Zn-Al, Ti-Ni [10] งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กลุ่มโลหะผสมจำรูปไทเทเนียม-นิกเกิล-ทองแดง (TiNiCu) เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิต่ำได้ [11] เครื่องจักรกลความร้อนจากโลหะผสมจำรูปมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อนในการผลิตพลังงาน เช่น ขนาดของลวดโลหะผสมจำรูป ระยะออฟเซต มุมออฟเซต [12] และค่าดัชนีสปริง

ค่าดัชนีสปริง (D/d) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดสปริง (D) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด (d) ที่นำมาขด จากความสัมพันธ์เห็นว่าสปริงที่ออกแบบจะให้แรงมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีสปริง ถ้าค่าดัชนีสปริงจะมีลักษณะแข็งแรงมากให้แรงมาก ในทางกลับกันถ้าค่าดัชนีสปริงมากจะมีลักษณะอ่อนนุ่มสามารถให้แรงน้อย หลายคนอาจจะเข้าใจว่าถ้าเช่นนั้นควรออกแบบให้ค่าดัชนีสปริงมีค่าน้อยเพื่อให้ได้แรงขับเคลื่อนที่มาก เนื่องจากการระบุว่าค่าดัชนีสปริงไม่ควรจะมีค่าน้อยกว่า 4 เพราะจะเป็นผลทำให้ขึ้นรูปยาก [13] และค่าดัชนีที่นิยมใช้มีค่าประมาณ 6-10 [10] จึงต้องเปรียบเทียบค่าดัชนีสปริง นอกจากการเปรียบเทียบค่าดัชนีสปริงแล้วยังมีความจำเป็นต้องศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอีกด้วย เนื่องจากในกระบวนการสร้างสปริงจำเป็นต้องมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมจำรูปได้ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับโลหะผสมจำรูปไทเทเนียม-นิกเกิลอยู่ระหว่าง 350-600°C [14] แต่จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ 520°C เป็นอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะผสมจำรูป ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงอย่างมาก [15] และเมื่อเติมธาตุทองแดงเข้าไปในส่วนผสมของโลหะผสมจำรูปไทเทเนียม-นิกเกิลจะส่งผลให้วัสดุมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น และการตอบสนองต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเร็วขึ้น [16] งานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิในช่วง 350-450°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่โครงสร้างผลึกยัง

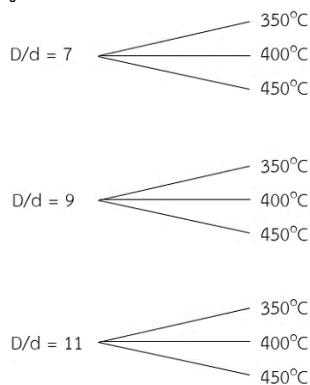
ไม่เกิดผลึกใหม่ การศึกษาจะเป็นคำตอบในการออกแบบค่าดัชนีสปริงและอุณหภูมิอบที่เหมาะสมเพื่อให้เครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ทเครื่องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าดัชนีสปริงและอุณหภูมิอบที่ส่งผลต่อแรงคืนตัวของสปริงเพื่อให้เครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ทเครื่องมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยขึ้นรูปสปริงโลหะผสมจำรูปไทเทเนียม-นิกเกิล-ทองแดง ที่ค่าดัชนีของสปริง 7, 9 และ 11 อบที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450°C และกำหนดให้เครื่องจักรกลความร้อนสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ 65-75°C

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การขึ้นรูปสปริง

นำลวดโลหะผสมจำรูปไทเทเนียม-นิกเกิล-ทองแดง (NT-H8 As Drawn, Furukawa Electric Co., Ltd.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm พันรอบแกนเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3, 4 และ 5 mm ยาว 100 mm ได้ค่าดัชนีสปริงที่ 7, 9 และ 11 จากนั้นอบจำรูปด้วยเตาอบยี่ห้อ CHAVACHOTE รุ่น L9/12PS ที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450°C เป็นระยะเวลา 30 min โดยป้อนอาร์กอนขณะอบในอัตรา 5 L/min แล้วนำมาชุบลงในน้ำเย็น จากนั้นทำความสะอาดสปริงด้วยการกัดกรดที่มีส่วนผสมของ กรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริกและน้ำกลั่นในสัดส่วน 1:4:5 ประมาณ 1 min โดยมีสปริงที่ต้องทำการวิจัยทั้งหมด 9 เงื่อนไข ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เงื่อนไขของสปริงที่ใช้ในการวิจัย

2.2 การทดสอบแรงคืนตัวของสปริง

ขั้นตอนการทดสอบแรงดึงเพื่อหาแรงคืนตัวของสปริงใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Mecmesin รุ่น MultiTest 2.5-i โหลดเซลล์ขนาด 25 N ความเร็วในการดึง 5 mm/min

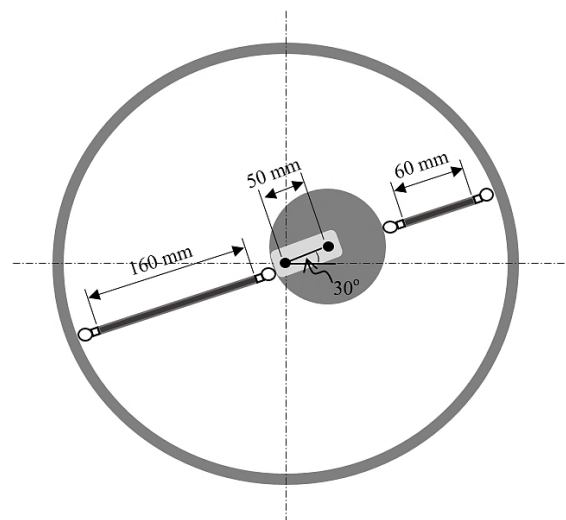
ภายใต้อุณหภูมิ 65°C โดยทดสอบสปริงทั้งหมด 9 เงื่อนไข

2.3 การทดสอบอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก

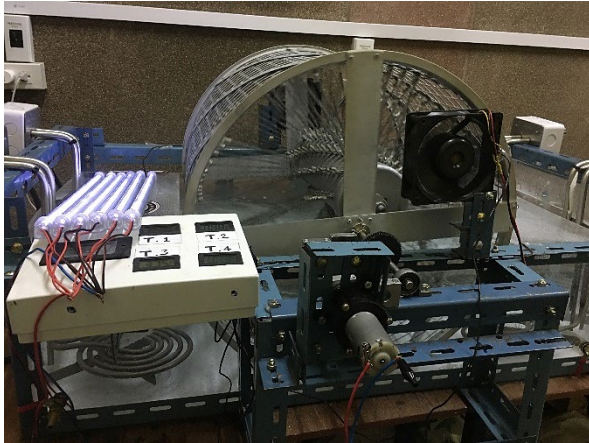
การทดสอบหาอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของโลหะด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น DSC-1 โดยเงื่อนไขในการทดสอบจะทำการที่ช่วงอุณหภูมิ 0-120°C และอัตราการเพิ่ม/ลดอุณหภูมิ 10°C/min

2.4 การออกแบบและสร้างเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ทเครื่อง

การสร้างระบบทางกลและระบบส่งกำลังของเครื่องจักรกลความร้อน เป็นการสร้างให้มีพื้นที่รับความร้อนและระบายความร้อน โดยออกแบบเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ทเครื่องให้สปริงด้านหนึ่งมีระยะยึดสุดที่ความยาว 160 mm ซึ่งมากกว่าความยาวเดิมของสปริง 2.6 เท่า ส่วนสปริงอีกด้านหนึ่งถูกออกแบบให้มีระยะยึดสุดที่ 60 mm ระยะออฟเซ็ท 50 mm และมุมออฟเซ็ท 30° [12] ติดตั้งสปริงเรียงเป็นแนวเกลียวทั้งหมด 9 แถว แถวละ 16 ชิ้น รวมทั้งสิ้น 144 ชิ้น แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระยะเยื้องศูนย์ ระยะยึดสุดและหลุดสุดของสปริง



รูปที่ 2.3 การประกอบตัวเครื่องจักรกลความร้อนกับชุดอ่างน้ำร้อน

โครงสร้างภายนอกทำจากอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm กว้าง 480 mm ส่วนโครงสร้างด้านในทำจากท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm สปริงจะใช้หางปลาแบบย้ายัดหัว-ท้ายสปริง ติดตั้งเครื่องจักรกลความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่ทำจากอะคริลิกเสริมเหล็กขนาดกว้าง 500 mm ยาว 950 mm สูง 240 mm และการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.5 การทดสอบกำลังทางกลและกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ทเครงค์

เครื่องจักรกลความร้อนทำงานโดยใช้ฮีตเตอร์ยี่ห้อ Vaicharoen Heater รุ่น Thermo+ ในการให้ความร้อนกับน้ำในอ่างน้ำร้อนและใช้เทอร์โมมิเตอร์ในการวัดและควบคุมอุณหภูมิ น้ำ การหาค่ากำลังทางกลเป็นการทดสอบค่าแรงบิด (Torque) เพื่อนำมาคำนวณ โดยใช้วิธีการทดสอบเบรก (Brake Test) การทดสอบนี้เราจะติดตั้งชุดทดสอบเบรกเข้ากับเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ทเครงค์ โดยติดตั้งปลายเชือกเบรกด้านหนึ่งเข้ากับเครื่องชั่งน้ำหนักและปลายเชือกเบรกอีกด้านเข้ากับน้ำหนักถ่วง จากนั้นใส่มวลน้ำหนักถ่วงแล้วบันทึกความเร็วรอบ โดยใช้เครื่องวัดแบบดิจิตอลด้วยเลเซอร์แบบไม่สัมผัส รุ่น DT-2234C+ และน้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบแขวนยี่ห้อ HeiHeng รุ่น BSH001

ทำแบบเดิมซ้ำโดยการเพิ่มมวลน้ำหนักถ่วงจนเครื่องจักรกลความร้อนหยุด บันทึกผล แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณหาแรงบิดตามสมการ

$$T = (W_t - W_s)g\left(\frac{D_w}{2}\right)$$

เมื่อ T คือ ค่าทอร์คของเครื่องจักรกลความร้อน (N.m)

W_t คือ ค่าน้ำหนักมวลถ่วง (kg)

W_s คือ ค่ามวลที่อ่านได้จากตราชั่ง (kg)

g คือ ค่าความโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

W_s คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวงล้อเบรกไดนาโมมิเตอร์ (m)

จากนั้นคำนวณหาค่ากำลังทางกลตามสมการ

$$W_{out} = T(2\pi N/60)$$

เมื่อ T คือ ค่าทอร์คของเครื่องจักรกลความร้อน (N.m)

N คือ ความเร็วรอบของเครื่องจักรกลความร้อน (rpm)

การหาค่ากำลังทางไฟฟ้าทำได้จากการต่อเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ทเครงค์กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DC โดยใช้โหลดไฟฟ้าเป็นหลอดไฟ LED ดังแสดงในรูปที่ 2.3 วัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะต่อโหลดโดยใช้มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD770 โดยบันทึกค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุด กระแสและแรงดันที่วัดได้ถูกนำไปคำนวณหาค่ากำลังทางไฟฟ้าโดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$Power = VI$$

เมื่อ Power คือ กำลังทางไฟฟ้า

V คือ ความดันไฟฟ้า (V)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

2.6 การหาประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ทเครงค์

เครื่องจักรกลความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานทางกล จากนั้นเปลี่ยนพลังงานทางกลที่ได้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นว่าในกระบวนการโดยรวมจะมีการสูญเสียทั้งในกระบวนการทางกลและกระบวนการทางไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อน แต่จะเน้นที่ประสิทธิภาพทางกลเท่านั้น เนื่องจากประสิทธิภาพทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้ ค่าประสิทธิภาพทางกลหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังทางกลที่ได้จากการทดลอง หน่วยเป็นจูล (J)

ต่อความร้อนที่สปริงดูดซับเพื่อใช้ในการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก (Q_{in}) หน่วยเป็นจูล (J) ดังสมการ

$$M.Efficiency(\%) = \frac{M.Power}{Q_{in}} \times 100\%$$

เมื่อ $M.Efficiency(\%)$ คือ ประสิทธิภาพทางกล (%)

$M.Power$ คือ กำลังทางกลคิดต่อหนึ่งรอบ (J)

Q_{in} คือ ความร้อนที่สปริงดูดซับคิดต่อหนึ่งรอบ (J)

สำหรับ Q_{in} สามารถหาได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของการทดลอง DSC ในการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นออสเทนไนต์ [12]

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

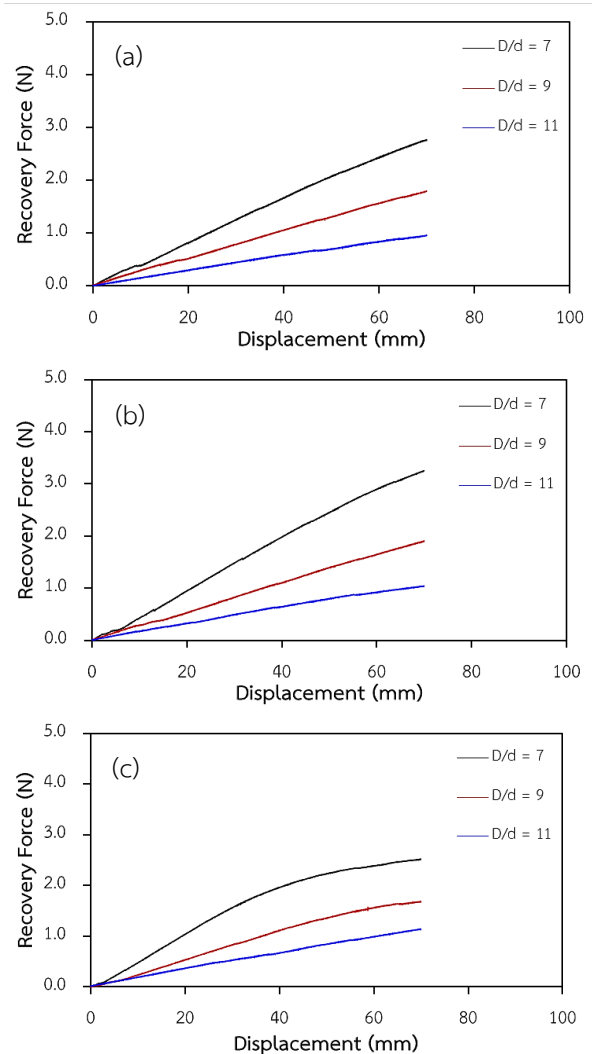
การศึกษาอิทธิพลของค่าดัชนีสปริงและอุณหภูมิของโลหะผสมจำรูปที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซตแครงค์ ผู้วิจัยได้ประเมินความเหมาะสมในการเลือกเงื่อนไขเพื่อเป็นสปริงต้นกำเนิดแรงโดยการทดสอบอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกและหาแรงคืนตัวของสปริงในแต่ละเงื่อนไข ซึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกสปริงเพื่อให้เครื่องจักรกลความร้อนมีประสิทธิภาพสูงสุดได้แก่แรงคืนตัว (Recovery Force) โดยผลของการทดสอบต่างๆ แสดงดังต่อไปนี้

3.1 แรงคืนตัวของสปริง

ประสิทธิภาพทางกลของเครื่องจักรกลความร้อนแปรผันโดยตรงกับแรงบิด ซึ่งค่าแรงบิดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงคืนตัวของสปริง ซึ่งเป็นชิ้นส่วนหลักในการก่อให้เกิดแรงขับเคลื่อนเครื่องจักรกลความร้อน ด้วยการเปลี่ยนจากแรงคืนตัวในแนวตรงให้เป็นแรงหมุน ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับรัศมีของวงล้อเครื่องจักรกลความร้อน การเลือกสปริงที่เหมาะสมกับการสร้างเครื่องจักรกลความร้อน จึงถูกกำหนดด้วยการสร้างสปริงตามเงื่อนไขแรงคืนตัวสูงสุดและมีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก (Hysteresis) ที่แคบ เนื่องจากจะทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้เน้นพิจารณาเงื่อนไขค่าดัชนีสปริงและอุณหภูมิอบ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อแรงขับเคลื่อนเครื่องจักรกลความร้อน ในการเปรียบเทียบแรงคืนตัวของสปริง ผู้วิจัยได้กำหนดค่าดัชนีสปริงที่ 7, 9 และ 11 อุณหภูมิอบที่ 350, 400 และ 450°C ทดสอบแรงคืนตัว

ภายใต้อุณหภูมิ 65°C และกำหนดระยะยืดสปริงสูงสุดที่ 70 mm [12]

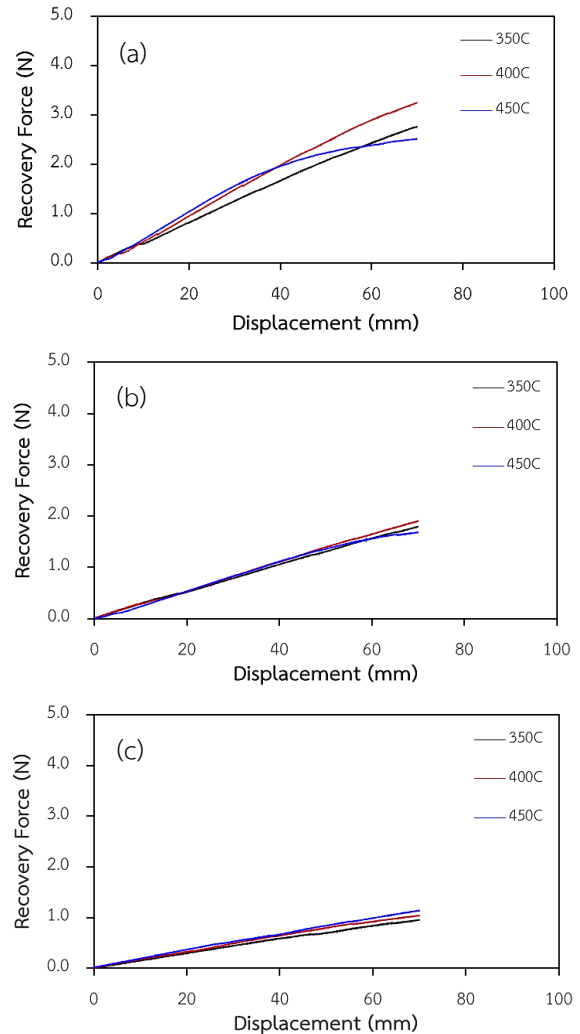
รูปที่ 3.1 (a) - (c) เป็นการเปรียบเทียบแรงคืนตัวที่ค่าดัชนีสปริง 7, 9 และ 11 อบที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450°C ตามลำดับ จากการทดสอบแรงคืนตัวของสปริงโลหะผสมจำรูปที่อุณหภูมิอบ 350°C พบว่าที่ค่าดัชนีสปริง 7 มีแรงคืนตัว 2.777 N ในขณะที่ค่าดัชนีสปริง 9 และ 11 มีค่าแรงคืนตัวอยู่ที่ 1.796 N และ 0.969 N ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าที่ค่าดัชนีสปริง 7 มีแรงคืนตัวสูงสุด สูงกว่าค่าดัชนีสปริง 9 ถึง 35.33% และสูงกว่าค่าดัชนีสปริง 11 ถึง 65.1%



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบแรงดึงกลับของสปริง (a) อบจำรูปที่อุณหภูมิ 350°C (b) อบจำรูปที่อุณหภูมิ 400°C (c) อบจำรูปที่อุณหภูมิ 450°C

จากการทดสอบแรงคืนตัวของสปริงโลหะผสมจำรูปที่อุณหภูมิอบ 400°C พบว่าที่ค่าดัชนีสปริง 7 มีแรงคืนตัว 3.254 N ในขณะที่ค่าดัชนีสปริง 9 และ 11 มีแรงคืนตัวอยู่ที่ 1.919 N และ 1.032 N ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าที่ค่าดัชนีสปริง 7 มีแรงคืนตัวสูงสุด สูงกว่าค่าดัชนีสปริง 9 ถึง 41% และสูงกว่าที่ค่าดัชนีสปริง 11 ถึง 68.29% จากการทดสอบแรงคืนตัวของสปริงโลหะผสมจำรูปที่อุณหภูมิอบ 450°C พบว่าที่ค่าดัชนีสปริง 7 มีแรงคืนตัว 2.523 N ในขณะที่ค่าดัชนีสปริง 9 และ 11 มีค่าแรงคืนตัวอยู่ที่ 1.688 N และ 1.144 N ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าค่าดัชนีสปริง 7 มีแรงคืนตัวสูงสุด สูงกว่าที่ค่าดัชนีสปริง 9 ถึง 33.1% และสูงกว่าที่ค่าดัชนีสปริง 11 ถึง 54.66% จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีสปริงมีผลอย่างมีนัยสำคัญกับแรงคืนตัวของสปริงอย่างมาก ซึ่งผลของแรงคืนตัวที่ต่างกันเป็นผลมาจากค่าคงที่ของสปริงสามารถสังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพของสปริง สปริงที่มีค่าดัชนีน้อยจะมีลักษณะแข็ง ในทางกลับกันสปริงมีค่าดัชนีมากจะมีลักษณะอ่อนนุ่มกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผู้ผลิตสปริงที่ระบุไว้ว่าค่าดัชนีสปริงยิ่งน้อยความแข็งยิ่งมาก เนื่องจากค่าคงที่ของสปริง (k) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าดัชนีลดลง [13] ในกรณีนี้ส่งผลให้แรงคืนตัวของสปริงเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองเห็นได้ว่าแรงคืนตัวของสปริงที่ค่าดัชนีต่างกันมีค่าต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในทุกอุณหภูมิอบ ดังนั้นผู้วิจัยเลือกค่าดัชนีสปริง 7 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าค่าดัชนีที่ดีควรมีค่าประมาณ 6 [10] เนื่องจากให้แรงคืนตัวสูงสุด

จากรูปที่ 3.2 (a) พบว่าที่ค่าดัชนีสปริง 7 อบที่อุณหภูมิ 350°C มีแรงคืนตัว 2.777 N อบที่อุณหภูมิ 400°C มีแรงคืนตัว 3.254 N และอบที่อุณหภูมิ 450°C มีแรงคืนตัว 2.523 N จากการเปรียบเทียบเห็นว่าที่อุณหภูมิอบ 400°C มีแรงคืนตัวสูงสุด สูงกว่าแรงคืนตัวที่อุณหภูมิ 350°C ถึง 14.65% และสูงกว่าที่อุณหภูมิ 450°C ถึง 22.46% จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b) ที่ค่าดัชนีสปริง 9 อบที่อุณหภูมิ 350°C มีแรงคืนตัว 1.789 N อบที่อุณหภูมิ 400°C และ 450°C มีค่าแรงคืนตัวอยู่ที่ 1.919 N และ 1.685 N ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบเห็นว่าที่อุณหภูมิอบ 400°C มีแรงคืนตัวสูงสุด สูงกว่าที่อุณหภูมิ 350°C ถึง 6.78% และสูงกว่าที่อุณหภูมิ 450°C ถึง 12.2% จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1 (c) ที่ค่าดัชนีสปริง 11 ที่อุณหภูมิอบ 350°C มีแรงคืนตัว 0.947 N ที่อุณหภูมิ 400°C มีแรงคืนตัว 1.148 N และที่อุณหภูมิ 450°C มีแรงคืนตัว 1.034 N จากการเปรียบเทียบเห็นว่าที่อุณหภูมิอบ 400°C มีแรงคืนตัวสูงสุด สูงกว่าที่อุณหภูมิ 350°C ถึง 17.5% และสูงกว่าที่อุณหภูมิ 450°C ถึง 9.93%



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบแรงดึงกลับของสปริง (a) ค่าดัชนีสปริง 7 (b) ค่าดัชนีสปริง 9 (c) ค่าดัชนีสปริง 11

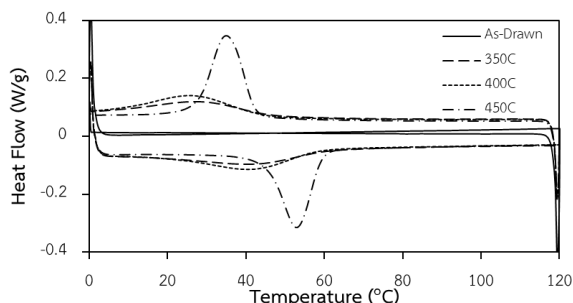
จากผลการเปรียบเทียบของรูปที่ 3.2 (a) - (c) แสดงให้เห็นว่าสปริงที่ค่าดัชนี 7, 9 และ 11 มีแรงคืนตัวสูงสุดที่อุณหภูมิอบ 400°C ด้วยเหตุนี้สามารถสันนิษฐานได้ว่าสปริงที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นสปริงต้นกำเนิดแรงสำหรับเครื่องจักรกลความร้อนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดคือ ค่าดัชนีสปริง 7 อบที่อุณหภูมิ 400°C อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการพิสูจน์การตัดสินใจดังกล่าว จำเป็นที่จะต้องทดสอบหาอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกและช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก (Hysteresis) เพิ่มเติมเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกสปริงให้เหมาะสมกับอุณหภูมิการทำงาน of เครื่องจักรกลความร้อนต่อไป

3.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกและ Hysteresis

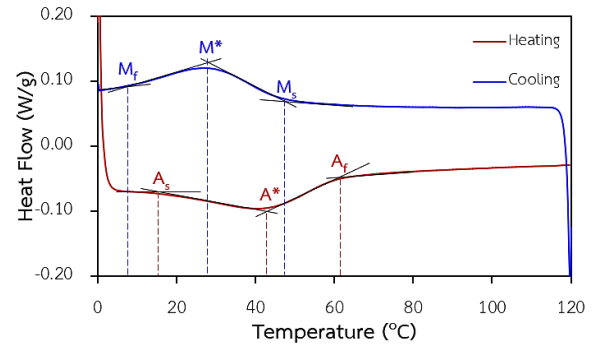
เมื่อกำหนดค่าดัชนีสปริงได้แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือนำสปริงมาทดสอบหาอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเทียบ

กับลวดดิบจากโรงงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบเพื่อลดพฤติกรรมเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของวัสดุที่อุณหภูมิอบต่างๆ จากผลการทดสอบ DSC แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมจำรูปมีสมบัติเป็นอย่างไรที่อุณหภูมิเท่าไร กล่าวคือสปริงโลหะผสมจำรูปมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากมาร์เทนไซต์เป็นออสเทนไนต์ขณะ Heating และเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ขณะ Cooling ที่อุณหภูมิเท่าไร

รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Heat Flow กับอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของสปริงที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450°C และลวดดิบ (As Drawn) จากโรงงาน พบว่าลวดที่ได้จากการผลิตจากโรงงานผ่านกระบวนการดึงผ่านดายนหรือรีดเย็นมา ทำให้โครงสร้างภายในเกิดความเค้นของดิสโลเคชันจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการขัดขวางกลไกการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก จึงไม่มีการเกิดฟิค [15] จากผลการทดลองเมื่อสปริงถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 350 และ 400°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงการคืนตัว (Recovery) ทำให้ความเค้นตกค้างจากการขึ้นรูปเย็นที่มีอยู่ในวัสดุลดลงบางส่วนส่งผลให้เริ่มเกิดฟิค เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 450°C (เป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับการเกิดผลึกใหม่) [15] ความเค้นภายในลดลงอย่างมาก ส่งผลให้กลไกการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเกิดขึ้นได้ง่ายฟิคจึงเกิดขึ้นชัดเจน รูปที่ 3.4 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยวิธีการ Tangent Method (เป็นวิธีการหาจุดเริ่มเปลี่ยนและฟิคของเส้นโค้ง ทำได้โดยการลากเส้นตรงเส้นหนึ่งขนานกับเส้นอ้างอิง (x, 0) และ อีกเส้นหนึ่งสัมผัสกับกราฟจุดตัดของเส้นทั้งสองเป็นจุดที่บ่งบอกค่าที่ต้องการ [11]) อย่างไรก็ตามการทดสอบ DSC ยังสามารถบอกช่วง Hysteresis ของวัสดุได้อีกด้วย



รูปที่ 3.3 ผลจากการทดสอบ DSC ของลวดจากโรงงานและที่ค่าดัชนีสปริง 7 อบที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 450°C

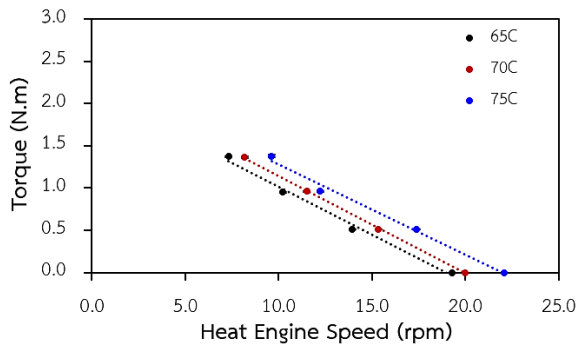


รูปที่ 3.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิอบ 400°C

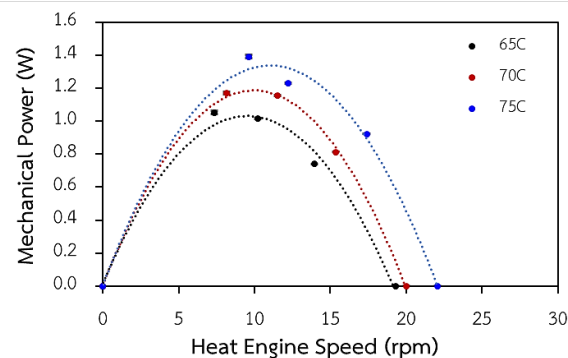
สำหรับการพิจารณาโลหะผสมจำรูปไทเทเนียม-นิกเกิลทองแดง เพื่อใช้เป็นสปริงต้นกำเนิดแรงนั้น จะพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิออสเทนไนต์สิ้นสุด (A_f) เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่สปริงมีแรงดึงกลับสูงสุด พบว่าสปริงทั้งสามมีอุณหภูมิออสเทนไนต์สิ้นสุด (A_f) อยู่ระหว่าง 60-62°C เมื่อพิจารณาช่วงของอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก (Transformation Hysteresis) ที่สามารถคำนวณได้จาก A^*-M^* ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิทำงานของสปริง พบว่าสปริงที่อบที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450°C จะมีค่าของช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเท่ากับ 14, 15 และ 18°C ตามลำดับ เห็นได้ว่าสปริงที่มีช่วง Hysteresis แคบที่สุดคือสปริงที่อบจำรูปที่ 350°C อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองแรงคืนตัวที่ค่าดัชนีสปริง 7 แสดงให้เห็นว่าแรงคืนตัวของสปริงที่อบจำรูปที่ 350 และ 450°C มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสปริงที่อบจำรูปที่ 400°C ซึ่งไม่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงเลือกเงื่อนไขสปริงที่ค่าดัชนี 7 อบที่อุณหภูมิ 400°C เพราะเป็นเงื่อนไขที่ให้แรงคืนตัวสูงสุดส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดด้วย อีกสาเหตุที่ต้องเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดของสปริงเนื่องจากต้องการลดต้นทุนการใช้สปริงโลหะผสมจำรูปที่มีราคาแพงในการสร้างเครื่องจักรกล

3.3 กำลังทางกลและกำลังทางไฟฟ้า

หลังจากเลือกเงื่อนไขสปริงที่เหมาะสมแล้ว จึงสร้างเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซตแครงค์และติดตั้งสปริงจากนั้นทดสอบกำลังทางกลและกำลังทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อน



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของเครื่องจักรกลความร้อนที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C

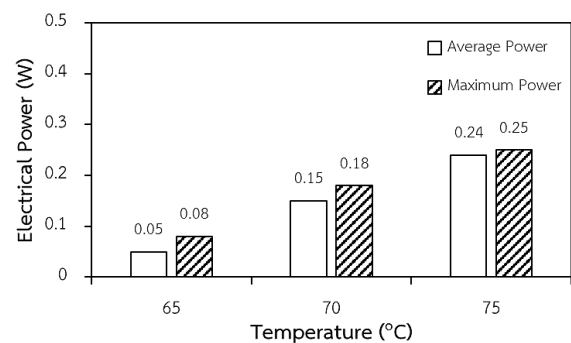


รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางกลกับความเร็วรอบของเครื่องจักรกลความร้อนที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C

การทดสอบกำลังทางกลทำได้โดยการทดสอบเบรก ผลการทดสอบออกมาในรูปของแรงบิด และวัดความเร็วรอบของเครื่องจักรกลความร้อน เพื่อดูแนวโน้มของแรงบิดที่อุณหภูมิต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่างกันค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าต่างกันไม่มากนัก แต่สิ่งที่แปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิมิใช่ความเร็วรอบของเครื่อง โดยเครื่องมีความเร็วรอบสูงเมื่ออุณหภูมิน้ำเพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกที่รวดเร็วขึ้นของวัสดุที่อุณหภูมิสูงกว่า และที่อุณหภูมิ 75°C เครื่องมีแรงบิดสูงสุดที่ 1.380 N.m ความเร็วรอบสูงสุด (ตอนไม่มีโหลด) 22.06 rpm จากนั้นนำค่าแรงบิดกับค่าความเร็วรอบมาคำนวณหา กำลังทางกล (Mechanical Power) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางกลและความเร็วรอบบ่งบอกถึงกำลังทางกลที่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมียิ่งสูงเป็นผลจากความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น จากกราฟจะเห็นได้ว่ากำลังทางกลเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงจุดสูงสุดจากนั้นจะลดลงและสิ้นสุดที่ค่าศูนย์ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัย 2 อย่างที่มีผลต่อกำลังทางกล คือ แรงบิดกับความเร็วรอบ

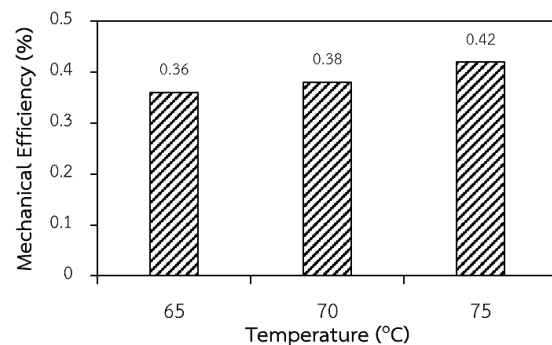
ช่วงแรกกำลังทางกลเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นและความเร็วรอบยังสูงอยู่ ที่จุดสูงสุดเป็นจุดที่ค่ารวมกันของแรงบิดและความเร็วรอบสูงสุด จากนั้นพลังงานทางกลจะลดลงเนื่องจากความเร็วรอบที่ลดลงจนกระทั่งหยุดนิ่ง ส่งผลให้ค่าพลังงานทางกลเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 75°C กำลังทางกลสูงสุดของเครื่องอยู่ที่ 1.391 W แรงบิดสูงสุด 1.380 N.m และความเร็วรอบ 9.63 rpm

รูปที่ 3.7 แสดงกำลังทางไฟฟ้าเฉลี่ยและกำลังทางไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องจักรกลความร้อนผลิตได้ที่อุณหภูมิน้ำ 65, 70 และ 75°C จากกราฟสังเกตได้ว่ากำลังทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิน้ำสูงขึ้นเนื่องจากกระแสที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิน้ำ 75°C เครื่องจักรกลความร้อนสามารถผลิตกระแสสูงสุดได้ 33.45 mA แรงดันสูงสุด 7.62 V คำนวณออกมาแล้วได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.255 W ที่ความเร็วรอบ 2.19 rpm

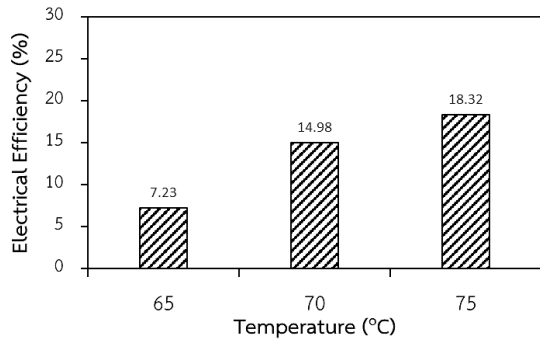


รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องจักรกลความร้อนที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C

3.4 ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อนออฟเซ็ค-แครงค์



รูปที่ 3.8 ประสิทธิภาพทางกลของเครื่องจักรกลความร้อนที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C



รูปที่ 3.9 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเครื่องจักรกลความร้อนที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C

ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อนแสดงให้เห็นว่าค่าดัชนีที่เหมาะสมที่สุดนั้นเครื่องจักรกลความร้อนสามารถมีประสิทธิภาพเพียงใด แต่จะเน้นที่ประสิทธิภาพทางกลของเครื่องเท่านั้น เนื่องจากประสิทธิภาพทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อเข้ากับเครื่องจักรกลความร้อน อย่างไรก็ตามจะมีการคำนวณหาทั้งประสิทธิภาพทางกลและไฟฟ้า ณ ที่นี้ด้วยรูปที่ 3.8 และ 3.9 แสดงประสิทธิภาพทางกลและทางไฟฟ้าของเครื่องจักรกลความร้อนที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถทราบได้ว่าเครื่องมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากรูปที่ 3.8 ที่อุณหภูมิ 75°C ในหนึ่งรอบ เครื่องดูดซับความร้อนเข้าไป 2068 J ผลิตร่างทางกลได้ 8.667 J ได้ประสิทธิภาพทางกล 0.42% จากรูปที่ 3.9 ที่อุณหภูมิ 75°C เครื่องผลิตร่างทางกลได้ 1.391 W, กำลังทางไฟฟ้าได้ 0.255 W ได้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 18.32%

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่าค่าดัชนีสปริงและอุณหภูมิรอบจํารูปมีผลต่อแรงคืนตัวและอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกอย่างชัดเจน จึงได้ทำการเลือกเงื่อนไขที่ให้แรงคืนตัวสูงสุด และสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ 65-75°C เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลความร้อนขึ้นอยู่กับแรงคืนตัวของสปริงโดยตรง จะเห็นได้ว่าตัวแปรทั้งสองจะให้แรงคืนตัวที่แตกต่างกันออกไป จากการทดสอบแรงคืนตัวของสปริงและการทดสอบ DSC สามารถสรุปได้ว่าที่ค่าดัชนีสปริง 7 รอบที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเงื่อนไขที่สปริงให้แรงคืนตัวสูงสุด โดยเครื่องจักรกลความร้อนต้นแบบถูกใช้ที่อุณหภูมิ 75°C ได้พลังงานทางกลสูงสุดที่ 1.391 W แรงบิดสูงสุด 1.380 N.m และความเร็วรอบ 9.63 rpm ประสิทธิภาพทางกลสูงสุดอยู่ที่ 0.42% และกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 0.255 W ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 18.32%

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อนรรฆ ชันชะวนะ ห้องปฏิบัติการสมาร์ตแล็บ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zou CN, et al. 2016. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era, Natural Gas Industry, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001>
- [2] Malhotra, Ripudaman. 2020. Fossil Energy. 10.1007/978-1-4939-9763-3.
- [3] Malhotra R. 2013. Fossil Energy, Introduction. In: Malhotra R. (eds) Fossil Energy. Springer. New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5722-0_1
- [4] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. พลังงานหมุนเวียน. สืบค้น 25 มีนาคม 2564. จาก http://www.e-report.energy.go.th/EPPO_files/media-05.pdf
- [5] กรมทรัพยากรธรณี. การใช้ประโยชน์น้ำพุร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า. สืบค้น 26 มีนาคม 2564. จาก http://www.dmr.go.th/n_more_news.php?filename=electric1
- [6] กรมทรัพยากรธรณี. น้ำพุร้อนในประเทศไทย. สืบค้น 30 มีนาคม 2564. จาก http://www.dmr.go.th/n_more_news.php?filename=hotthai
- [7] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม และสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2012. การจัดการพลังงานความร้อนภายในโรงงาน. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. หน้า 141-162
- [8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. การตรวจวิเคราะห์การอนุรักษ์พลังงานหม้อไอน้ำ. กระทรวงพลังงาน. หน้า 11
- [9] Ean H. Schiller. 2002. Heat Engine Driven by Shape Memory Alloys: Prototyping and Design. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. pp 16-24.

- [10] ณัฐ สัมมาวิภาวิกุล, สุชีจจ์ ภูริยากร และ หาญณรงค์ คล้ายสิงห์. 2013. การประยุกต์ใช้วัสดุฉลาดเป็นเครื่องจักรกลความร้อน (ปริญญาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [11] C.J. De Araújo, N.J. da Silva, M.M. da Silva and C.H. Gonzalez. 2011. A comparative study of Ni-Ti and Ni-Ti-Cu shape memory alloy processed by plasma melting and injection molding. *Materials & Design*. 32(1). pp 4925-4930.
doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.051
- [12] Kasama Sirussamee, Anak Khantachawana, Bunheng Hok and Aphinan Phukaoluan. 2021. Thermomechanical Performance of the Offset Crankshaft Heat Engine Driven by TiNiCu Shape Memory Alloys. *Engineering Journal*. 25 (2). pp 85-93.
[DOI:10.4186/ej.2021.25.1.85](https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.1.85)
- [13] Yunan Prawot. S.Manville, T.Sakai, M.Tanaka, and T.Gnauple-Herold. 2020. Manufacturing Process beyond Conventional Plasticity Theory: Case Study in Manufacturing Low Spring index Coil. *INTERNATION JOURNAL OF APPLIED TECHNOLOGY RESEARCH*. 1 (2). pp.98-109.
- [14] H Sadiq, M B Wong, R Al-Mahaidi and X L Zhao. 2010. The effects of heat treatment on the recovery stresses of shape memory alloys. *Smart and Structures*. 19 (3). pp 1-7.
[DOI:10.1088/0964-1726/19/3/035021](https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/3/035021)
- [15] Ming H. Wu. 2002. Fabrication of Nitinol Materials and Components. *Materials Science Forum*. 394. pp 285-292.
[DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.394-395.285](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.394-395.285)
- [16] A. Phukaluan, A. Khantachawana, P. Kaewtatip, S. Dchkunakorn, N. Anuwongnukroh, P. Santiwong and J. Kajornchaiyakul. 2011. Property Improvement of TiNi by Cu addition for Orthodontics Applications. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 87. pp 95-100.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.87.95>