

อิทธิพลของกรรมวิธีอบชุบที่มีผลต่อการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์และสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 และโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม

Influence of Quenching Method on the Martensitic Transformation and Mechanical Properties of AISI 1045 Carbon Steel and NiTi Shape Memory Alloys

อภิรักษ์ ภูเกื้อล้วน^{1*}, ธุกฤต ปานขลิบ², มงคล จงสุพรรณพงศ์³ และ สิสวัตม์ ธรรมประดิษฐ์⁴

Apinan Phokaoruan^{1*}, Thakrit Panklib², Mongkol Jongsuphanpong³, and Sissawat Thampradit⁴

^{1,2,3,4} หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

*E-mail aphinanp@siamtechno.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีอบชุบที่มีผลต่อการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์และสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 และโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม โดยตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยเครื่องสเปกโตรและตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมด้วยเครื่อง SEM-EDS จากนั้นผ่านกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอัตราที่ต่างกันดังนี้คือ เย็นตัวในน้ำมันและเย็นตัวในน้ำ จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการกัดกรดส่องกล้องจุลทรรศน์และทดสอบสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง จากการวิเคราะห์พบว่าเฟสมาร์เทนไซต์ของเหล็กกล้า AISI 1045 มีความแตกต่างกับโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมทั้งเฟสและขนาดของเกรน เนื่องจากเฟสมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้า AISI 1045 มีโครงสร้างเป็น BCT แต่มาร์เทนไซต์ในโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมมีโครงสร้างเป็น Monoclinic โดยขนาดเกรนของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เย็นตัวในน้ำมันมีขนาดใหญ่และขนาดเกรนที่เย็นตัวในน้ำมีขนาดเล็ก ซึ่งโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันมีผลต่อความแข็งแรงโดยตรง สำหรับขนาดเกรนของโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมที่เย็นตัวในน้ำมันมีขนาดใหญ่และขนาดเกรนที่เย็นตัวในน้ำมีขนาดเล็กน้อย ซึ่งโครงสร้างจุลภาคไม่แตกต่างกันจึงส่งผลต่อความแข็งแรงน้อยมาก

คำสำคัญ: เหล็กกล้า AISI 1045, โลหะผสมจำรูป, มาร์เทนไซต์, โครงสร้างจุลภาค, ความแข็งแรง, การพลังงาน

ABSTRACT

This study aims to investigate the influence of quenching method on the martensitic transformation and mechanical properties of AISI 1045 carbon steel and NiTi shape memory alloys. Chemical composition of AISI 1045 sample was analysed by spectroscopy, whilst NiTi sample was analysed by SEM-EDS technique. Martensitic transformation was induced by quenching after being heat treated at 800°C for 60 min. Quenching methods were divided into two groups: oil quenching, and water quenching. Microstructure and mechanical properties of the samples were characterized by optical microscopy and hardness test, respectively. The results show that quenching method has significantly affected the martensitic grain size of AISI 1045 samples, but not NiTi samples. The water

quenched samples tend to exhibit smaller grain size than the oil quenched ones due to the faster cooling rate. Therefore, it consequently affected hardness of the samples after quenching. It is expected that this could be due to the difference in martensitic crystal structure of each materials, which responds differently to the changes in cooling rate during quenching.

Keywords: Steel AISI 1045, Shape Memory Alloys, Martensite, Microstructure, Hardness

1. บทนำ

ในการอบชุบความร้อนให้กับเหล็กกล้าเป็นการผสมผสานระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (Heating) และการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) โดยใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าในสถานะของแข็ง เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ กระบวนการอบชุบเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงเฟสมาร์เทนไซต์ การเปลี่ยนแปลงเฟสมาร์เทนไซต์ดังกล่าวทำให้เกิดลักษณะเฉพาะทางกายภาพและสมบัติทางกลของเหล็กกล้า จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจในโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าที่นำมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการออกแบบ สำหรับเหล็กกล้า AISI 1045 เป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางสามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งงานโครงสร้าง งานเครื่องจักรกล งานแม่พิมพ์ รวมทั้งชิ้นส่วนในเครื่องยนต์จัดเป็นกลุ่มเหล็กกล้าที่มีสมบัติที่ดีในหลายด้าน ทั้งความแข็งแรง ความเหนียวและยังสามารถอบชุบเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ โดยปกติเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางสามารถอบชุบที่อุณหภูมิ 800-850°C และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง เย็นตัวในน้ำมันหรือน้ำ [1] สำหรับกระบวนการอบเหล็กกล้าจะช่วยให้สมบัติทางกลดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [2-3] สำหรับโลหะผสมจำรูปคือโลหะที่สามารถแสดงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดไปยังรูปร่างเดิมและขนาดตั้งต้น ซึ่งสามารถคืนกลับได้ด้วยปริมาณการคืนกลับประมาณ 8% แตกต่างจากเหล็กกล้าที่มีปริมาณการคืนกลับประมาณ 0.2% [4] โลหะผสมจำรูปกำลังเป็นที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบันทั้งทางด้านวัสดุอากาศยานและวัสดุทางการแพทย์ โดยกระบวนการทางความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อโครงสร้างมาร์เทนไซต์และส่งผลต่อสมบัติทางกลโดยตรง [5] ค่าความแข็งแรงเป็นค่าดัชนีบ่งชี้สมบัติทางกลของโลหะในแง่ของความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเนื่องจากแรงกระทำทางกล อาศัยแรงกดที่ทราบค่ากดลงหัวกดมาตรฐานซึ่งหัวกดนี้จะจมลงไปบนชิ้นงานที่ทดสอบเพื่อประมาณค่าที่มีความหมายทางกายภาพเพื่อเป็นดัชนีอย่างง่ายสำหรับบ่งชี้สมบัติหรือสภาพทางกลของโลหะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีอบชุบที่มีผลต่อการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์และสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 และโลหะผสมจำรูปนิเกิล-ไทเทเนียม เพื่อศึกษาความแตกต่างของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้น

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045 โดยตัดเหล็กกล้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1,000, 1,500 และ 2,000 จากนั้นขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 และ 0.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ เพื่อใช้สำหรับทดสอบหาส่วนผสมทางเคมี โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ทั้งหมด 3 จุด จากนั้นอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นแบ่งเหล็กกล้า AISI 1045 ออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 เย็นตัวในน้ำมัน และชุดที่ 2 เย็นตัวในน้ำ จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 400 600 800 1000 1500 และ 2000 ตามลำดับ หลังจากขัดด้วยกระดาษทรายทำการขัดเงาด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.1 ไมโครเมตร แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำชิ้นงานกัดผิวด้วยสารละลายกรดไนตริก 3% และแอลกอฮอล์ (Methanol) 97% [6] เป็นระยะเวลา 3 วินาที แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 50X เพื่อดูโครงสร้างจุลภาค สำหรับการทดสอบความแข็งแรงโดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบโครงสร้างจุลภาคมาขัดผิวด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตรประมาณ 10 นาที เพื่อขัดพื้นผิวที่ผ่านการกัดกรด แล้วทำการทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่อง

ทดสอบความแข็งแรงรุ่น Gelileo โมเดล ERGOTEST DIGI25R วิถีวิกเกอร์ส (Vicker) ใช้หัวกดแบบเพชรพีระมิดฐานสามเหลี่ยมใช้แรงในการกด 100 กิโลกรัม จากการทดลองจะได้ค่า d1 และ d2 สามารถนำมาคำนวณค่าความแข็งได้ตามสมการที่ 1

$$HV = 1.854 P/d^2 \quad (1)$$

เมื่อ HV คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร)
P คือ แรงกดทดสอบ (กิโลกรัม)
d คือ ขนาดของเส้นทแยงมุมโดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)

สำหรับการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซึ่งเป็นการหาค่าความแข็งของวัสดุที่นิยมมากที่สุด โดยมีวิธีวัดแบบเดียวกับวิกเกอร์ส แต่แตกต่างกันตรงที่แบบวิกเกอร์สนั้นจะวัดค่าความแข็งจากแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนร็อกเวลล์เป็นการวัดความแข็งจากความลึกของรอยกดโดยใช้แรงกดคงที่ การทดสอบนี้ใช้หัวกดเพชรและใช้แรงกด 150 kg, การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม ตัดลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร หล่อกับพลาสติกแล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1,000, 1,500 และ 2,000 จากนั้นขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 และ 0.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ เพื่อใช้สำหรับทดสอบหาส่วนผสมทางเคมี โดยใช้เครื่อง SEM-EDS แต่ละชิ้นงานวิเคราะห์ทั้งหมด 9 จุด จากนั้นอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยแบ่งโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม ออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 เย็นตัวในน้ำมัน และชุดที่ 2 เย็นตัวในน้ำ จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 400 600 800 1000 1500 และ 2000 ตามลำดับ หลังจากขัดด้วยกระดาษทรายทำการขัดเงาด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.1 ไมโครเมตร แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วนำชิ้นงานกัดผิวด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% ไนตริก 40% และน้ำกลั่น 50% [7] เป็นระยะเวลา 3 วินาทีและทดสอบลักษณะเดียวกับเหล็กกล้า AISI 1045

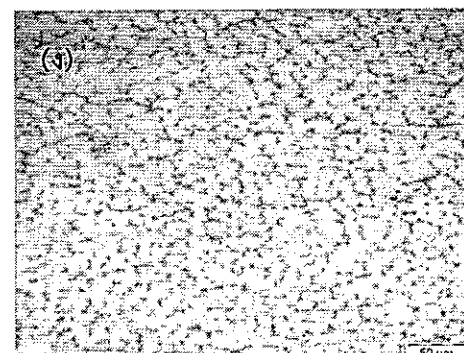
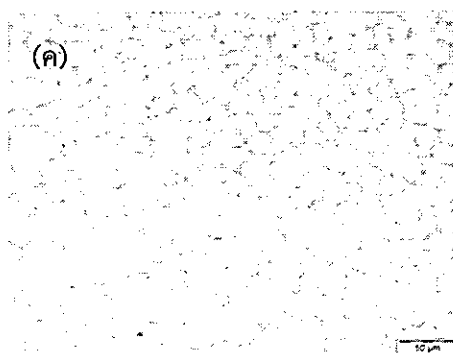
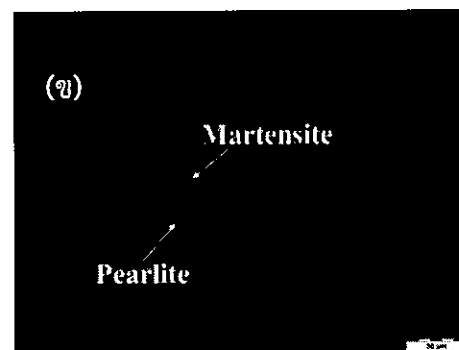
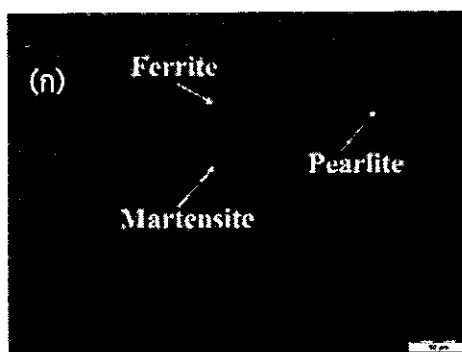
3. ผลและการวิเคราะห์ผล

ในตรวจสอบการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ของโลหะมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องผ่านการทดสอบส่วนผสมทางเคมีเพื่อให้ทราบถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการให้ความร้อนกับโลหะตามแผนภูมิสมมูล จากการทดสอบด้วยเครื่องสเปคโตรพบว่ามีส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045 มีส่วนผสมที่แตกต่างจากมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดลองจัดอยู่ในกลุ่มของ Hypo Eutectoid steels ทำให้มั่นใจว่าที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที สามารถทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างภายในเป็นเฟสออสเทนไนต์ (γ) ซึ่งมีโครงสร้างแบบ FCC ทั้งชิ้น แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีความหลากหลายของโครงสร้างจุลภาคทำให้ไม่สามารถใช้แผนภูมิสมมูลของเหล็กกล้าในการทำนายได้ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำเหล็กกล้า AISI 1045 ชุบลงในน้ำมันโครงสร้างสุดท้ายของเหล็กกล้าจะประกอบไปด้วยเฟสเฟอร์ไรท์ เพลิไรท์ และเกิดเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite, α') ซึ่งมีโครงสร้างแบบ BCT ดังรูปที่ 1 (ก) โดยมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีลักษณะคล้ายเข็มเกิดขึ้น เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงมากทำให้อะตอมของคาร์บอนไม่มีเวลาเพียงพอที่จะไปแทรกตัวอยู่ในเมทริกซ์ได้ ส่งผลให้การเรียงตัวของอะตอมเกิดการเปลี่ยนรูปและเกรนมีขนาดละเอียด เมื่อนำเหล็กกล้า AISI 1045 ชุบลงในน้ำอัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าสูงมากสูงกว่าเย็นตัวในน้ำมันโครงสร้างสุดท้ายของเหล็กกล้าจะประกอบไปด้วยเฟสเฟอร์ไรท์ บางส่วนและเกิดมาร์เทนไซต์จำนวนมากทำให้มีเกรนมีขนาดละเอียดมากขึ้น กลไกการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดดิสโลเคชั่นจำนวนมาก ทำให้เกิดกลไกการเปลี่ยนรูปถาวรภายในโครงสร้าง ดังรูปที่ 1 (ข) โดยทั่วไปหากอบเหล็กกล้าที่อุณหภูมิสูงจนกลายเป็นเฟสออสเทนไนต์ (γ) แล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุลโครงสร้างจะเปลี่ยนจากเฟสออสเทนไนต์ (γ) เป็นเฟสอัลฟา (α) โครงสร้างจะเปลี่ยนจาก FCC เป็น BCC หากอัตราการเย็นตัวสูงมากจะทำให้

ให้เกิดเฟสแบบที่ขึ้นได้ขึ้นจากเฟสออสเทนไนต์จะเปลี่ยนเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ทันที สามารถทำความเข้าใจว่าเฟสอัลฟา นั้นเป็นเฟสแม่ (Parent phase) ที่ทำให้เกิดมาร์เทนไซต์ ปรากฏการณ์การเปลี่ยนเฟสแบบนี้สามารถพบได้ในโลหะผสม หลายชนิดนอกเหนือจากเหล็กกล้า จึงทำให้คำว่ามาร์เทนไซต์เป็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ส่วนใหญ่ชิ้นส่วนที่ต้องการเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์คือ เฟือง เพลา แม่พิมพ์ เป็นต้น

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045

Content	AISI 1045 Standard (%wt) [8]	Spectrometer (%wt)
C	0.42-0.50	0.44
Si	0.15-0.30	0.32
Mn	0.60-0.90	0.68
P	0.04 Max.	-
S	0.05 Max.	0.02
Cr	-	0.05
Ni	-	0.10
Mo	-	0.02
Fe	balance	balance



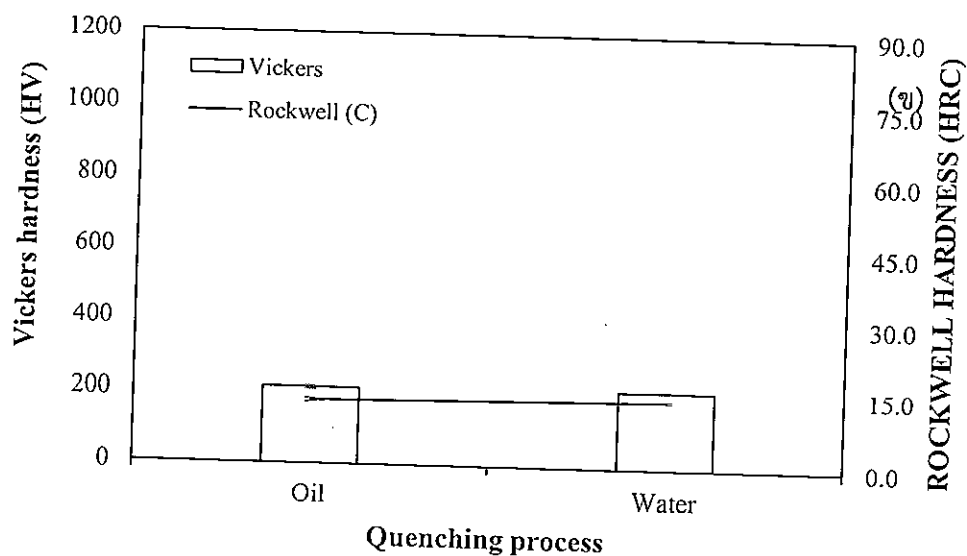
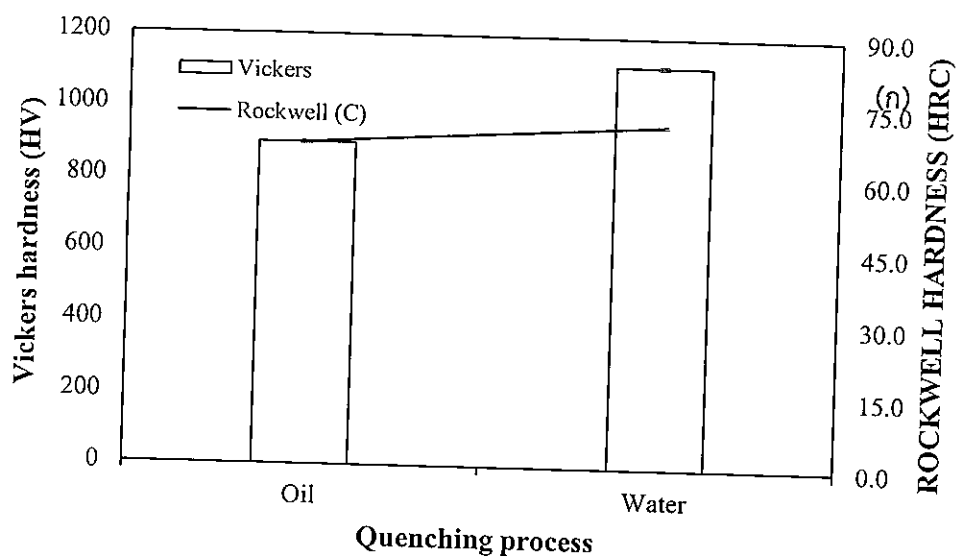
รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาค (ก) เย็นตัวในน้ำมันของเหล็กกล้า AISI 1045 (ข) เย็นตัวในน้ำของเหล็กกล้า AISI 1045 (ค) เย็นตัวในน้ำมันของโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม (ง) เย็นตัวในน้ำของโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม

การทดสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมไม่สามารถทดสอบด้วยเครื่องสเปกโตรได้ เนื่องจากขีดจำกัดของตัวเครื่องที่ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุนิกเกิลได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้เครื่อง SEM-EDS ในการทดสอบ แสดงผลดังตารางที่ 2 โลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมก็เป็นอีกประเภทหนึ่งที่อาศัยกลไกการเปลี่ยนเฟสกลับจากมาร์

เทนไซด์มาเป็นเฟสแม่(เฟสออสเทนไนต์) ทำให้เกิดปรากฏการณ์จุ่มรูป แต่กลไกของโลหะผสมจุ่มรูปนั้นมีการเกิดโครงสร้างแฝด (Twinning) แทนที่จะเกิดดิสโลเคชันเหมือนในเหล็กกล้า ซึ่งโครงสร้างแฝดนี้จะสามารถสลายหายไปได้จากการเปลี่ยนเฟสกลับจากมาร์เทนไซด์เป็นเฟสแม่ นั่นก็หมายความว่าไม่จำเป็นต้องเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรทำให้เกิดการจุ่มรูปได้ โดยปกติเฟสแม่(เฟสออสเทนไนต์)ของโลหะผสมจุ่มรูปจะมีโครงสร้างแบบ BCC และเฟสมาร์เทนไซด์จะมีโครงสร้างแบบ Monoclinic

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมจุ่มรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม

Content	SEM-EDS (wt%)
Ni	55.77
Ti	44.23



รูปที่ 2 ความแข็งของโลหะที่ปล่อยเย็นตัวในสภาวะต่างๆ
(ก) เหล็กกล้า AISI 1045 (ข) โลหะผสมจุ่มรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม

จากการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้า AISI 1045 ของวิกเกอร์สและร็อกเวลล์ แสดงดังรูปที่ 2 (ก) พบว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI 1045 เพิ่มขึ้น เมื่อเย็นตัวในน้ำมันมีค่าความแข็ง 895.28 ± 4.36 HV (67.29 ± 0.25 HRC) และเย็นตัวในน้ำมีค่าความแข็ง 1119.59 ± 3.99 HV (71.59 ± 0.14 HRC) หากพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าแข็งพบว่าเพิ่มขึ้นถึง 25.05% ซึ่งกลไกดังกล่าวเกิดจากปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์ที่เพิ่มขึ้นจำนวนมากดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่าอัตราเย็นตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในเหล็กกล้า AISI 1045 สำหรับค่าความแข็งของโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมของวิกเกอร์สและร็อกเวลล์ แสดงดังรูปที่ 2 (ข) พบว่าค่าความแข็งของโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมมีความแตกต่างน้อยมาก เมื่อเย็นตัวในน้ำมันมีค่าความแข็ง 209.19 ± 3.83 HV (13.12 ± 0.45 HRC) และเย็นตัวในน้ำมีค่าความแข็ง 213.49 ± 1.54 HV (13.91 ± 0.24 HRC) หากพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าแข็งพบว่าเพิ่มขึ้นถึง 2.05% ซึ่งกลไกดังกล่าวเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีโครงสร้างแผ่นที่เหมือนกันดังรูปที่ 1 (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นว่าอัตราเย็นตัวเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม

4. สรุปผลการวิจัย

การเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้า AISI 1045 จะเกิดการสร้าง habit plane จากดิสโลเคชันทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรหรือเรียกว่า cold work hardening ส่งผลให้เหล็กกล้ามีความแข็งสูงขึ้นและยังไม่ได้เกิดปรากฏการณ์จำรูป ในขณะที่โลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมนั้นการสร้าง habit plane จะเป็นการสร้างโครงสร้างแผ่นขึ้น ซึ่งจะไม่เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ แต่โครงสร้างแผ่นนี้สามารถสลายตัวไปได้จากการเปลี่ยนเฟสกลับจากมาร์เทนไซต์มาเป็นเฟสแม่ จึงสามารถเกิดปรากฏการณ์จำรูปได้ จากความแตกต่างของเฟสมาร์เทนไซต์ของวัสดุทั้ง 2 ชนิดถึงแม้จะเรียกเหมือนกันแต่โครงสร้างและสมบัติทางกลนั้นต่างกันโดยสิ้นเชิง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีสยามที่ให้ทุนอุดหนุนในการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Meier, M. (2004), "The heat treatment of Steel," Dept. of Chemical and Material Science, *Technical Paper*, University of California, Davis
- [2] Chitty, J.A.; Pertuz, A.; Hintermann, H.; Puchi, E.S. (1999), "Influence of electroless nickel-phosphorus deposits on corrosion-fatigue life of notched and un-notched samples of an AISI 1045 steel" *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 8, pp. 83-86.
- [3] Totten, G.E. (2007), *Steel Heat Treatment Handbook-Equipment and Process Design*, 2nd Ed., Taylor and Francis
- [4] แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา และ ธรรมบุญ อุตมม้วน (2551), วัสดุวิศวกรรม, สำนักพิมพ์ท็อป
- [5] Otsuka K, Wayman CM. (1998), *Shape memory materials*, Cambridge University
- [6] ASTM Designation: E 407-99, pp.1-21.
- [7] Phuakoluan A., Khantachawana A., Kaewatip P., Dechkunakorn S., Anuwongnukroh N., Santiwong P. and Kajornchaiyakul J (2011), "Property improvement of TiNi by Cu addition for Orthodontics Applications", *Applied Mechanics and Materials*, Vol.87, pp.95-100.
- [8] AZoM (2012), AISI 1045 Medium Carbon Steel, AZOMATERIALS, URL: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6130>, access on 15/05/2017