

## บทที่ 2

### วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

#### โลหะจำรูป

โดยทั่วไปหากเราต้องการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่ทำจากโลหะ เราจะต้องให้แรงในการดัดงอโลหะชิ้นนั้น และหากเราต้องการทำให้วัสดุนั้นกลับมามีรูปร่างเดิม เราก็จะต้องใช้แรงดัดกลับเช่นกัน แต่มีโลหะบางชนิดที่มีความสามารถพิเศษ กล่าวคือสามารถจำและเปลี่ยนกลับคืนลักษณะเดิมก่อนการเปลี่ยนรูปได้หากเราสามารถทำให้โลหะนั้นร้อนขึ้นหรือเย็นลงอย่างพอเหมาะ

หากว่าเรานำลวดที่ทำจากโลหะที่มีคุณสมบัติดังกล่าวซึ่งเดิมเป็นเส้นตรงมาดัดให้โค้งงอที่อุณหภูมิหนึ่ง แล้วนำส่วนที่งอมาทำให้มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แล้วพบว่าลวดดัดตัวกลับเป็นเส้นตรงเหมือนเดิม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์จำรูป (shape memory effect) และโลหะที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่า โลหะจำรูป (shape memory alloys)<sup>(10)</sup>

โลหะจำรูปถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปีค.ศ. 1932 ในโลหะผสมทองและทองแดง โดย Chang และ Read ต่อมาในปีค.ศ. 1938 โลหะจำรูปถูกค้นพบอีกครั้งในโลหะผสมสังกะสีและทองแดง จนกระทั่งในปีค.ศ. 1962 จึงได้พบปรากฏการณ์จำรูปในโลหะผสมนิกเกิลและไทเทเนียมที่อัตราส่วนของอะตอมของโลหะทั้งสองใกล้เคียงกัน (equiatomic nickel titanium alloy)<sup>(11)</sup>

ความสามารถในการจำรูปได้ของโลหะจำรูปได้นั้นมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อของโลหะอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะตอมในเนื้อโลหะที่เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ (martensitic transformation)<sup>(12)</sup>

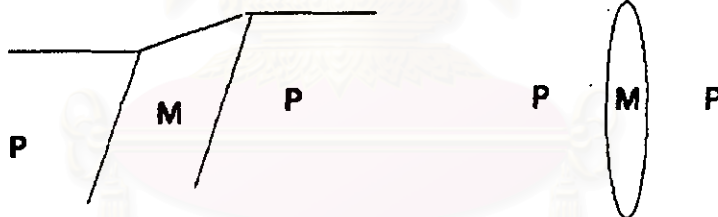
#### การเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ <sup>(12)</sup>

คำว่า มาร์เทนไซต์ มาจากชื่อของ ออดอล์ฟ มาร์เทนส์ (Adolf Martens) นักโลหวิทยาชาวเยอรมัน ซึ่งใช้เรียกเป็นครั้งแรกในเหล็กออสเทนไนท์ที่ผ่านการชุบแข็ง (quench) นำมาขัดและใช้กรดกัด จากนั้นนำมาส่องดูด้วยกล้อง พบบริเวณที่เปลี่ยนไปมีลักษณะคล้ายเลนส์ (lens shape) หรือคล้ายจาน (plate-like) ต่อมาภายหลังจึงพบว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงร่างผลึกที่ปราศจากการแพร่ของอะตอมโลหะ (lattice transformation without atomic diffusion) ในบริเวณที่มีลักษณะคล้ายเลนส์นั้นจากเฟสออสเทนไนท์ที่มีลักษณะโครงร่างผลึกเป็นแบบ face-centered cubic สู่ลักษณะโครงร่างผลึกที่เป็นแบบ body-centered cubic หรือ body-centered tetragonal ลักษณะโครงร่างผลึกที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าเฟสมาร์เทนไซต์ (martensite) และการเปลี่ยนแปลงของโครงร่างผลึกที่ปราศจากการแพร่ของอะตอมโลหะนี้เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์

ต่อมาได้มีการพบการเปลี่ยนแปลงสเฟสมาร์เทนไซต์ในโลหะอีกหลายชนิด ทำให้คำนี้ถูกใช้กันแพร่หลายและมีความหมายถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะรูปแบบหนึ่งที่อาจกล่าวสั้นๆได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกโดยมีการเคลื่อนที่ของอะตอมโลหะเป็นแบบเฉือน (shearing deformation) และมีการเคลื่อนที่แบบเดียวกันไปเป็นกลุ่ม (cooperative atomic movement) โดยที่แต่ละกลุ่มยังคงรักษาความสัมพันธ์กันในลักษณะของเฟสดั้งเดิม (parent phase) ไว้ได้

คุณสมบัติที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงสเฟสมาร์เทนไซต์ มีดังนี้

1. เฟสมาร์เทนไซต์เป็นลักษณะหนึ่งของสารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว (interstitial) หรือแทนที่ (substitution)
2. ไม่มีการแพร่ของอะตอมในสารละลายของโลหะ หมายความว่า ความเข้มข้นของอะตอมที่ละลายอยู่ในเฟสมาร์เทนไซต์จะมีค่าเท่ากับเฟสดั้งเดิม
3. การเปลี่ยนแปลงสเฟสมาร์เทนไซต์จะเกิดร่วมกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะ เนื่องจากเพราะเมื่อเราเหนี่ยวนำให้เกิดเฟสมาร์เทนไซต์จากเฟสดั้งเดิมที่ขัดให้เรียบ โดยการลดอุณหภูมิลง บริเวณที่เป็นเฟสมาร์เทนไซต์จะเกิดการยกตัวของผิว (surface relief - รูปที่ 1a) หรือหากทำให้เกิดรอยขุ่นขึ้นบนเฟสดั้งเดิมที่ขัดให้เรียบ ก็จะทำให้รอยขุ่นนั้นกลายเป็นเส้นโค้ง (รูปที่ 1b) อันเป็นข้อพิสูจน์ว่าการเปลี่ยนแปลงสเฟสมาร์เทนไซต์เกิดจากการเคลื่อนที่แบบเฉือนของอะตอมโลหะ



(a) Surface Relief

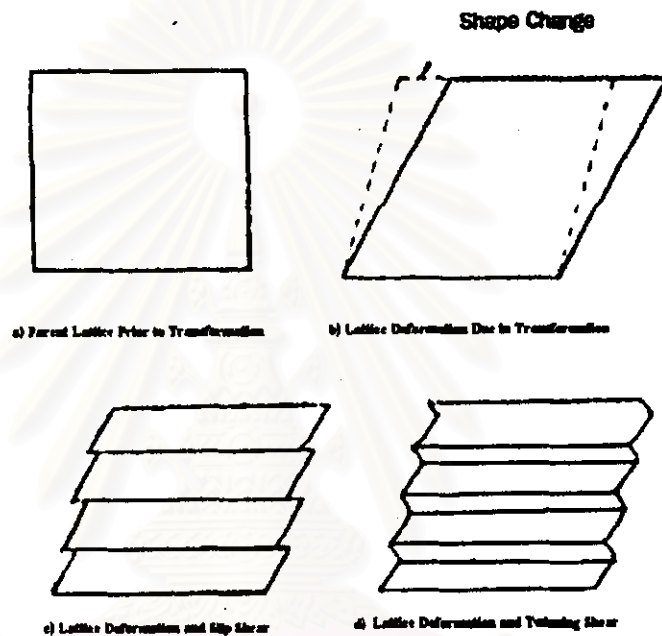
(b) Bending of Scratch line

รูปที่ 1 แสดงการยกตัวของผิวและการโค้งงอของรอยขุ่นจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงสเฟสมาร์เทนไซต์

(ที่มา Funakubo, H., Shape memory alloy, 1987)

4. เฟสมาร์เทนไซต์จะมีระนาบเฉพาะเรียกว่า ระนาบร่วม (habit plane) ซึ่งจะเห็นเป็นรอยต่อระหว่างเฟสมาร์เทนไซต์และเฟสดั้งเดิม (รูปที่ 1) การเคลื่อนที่แบบเฉือนของอะตอมโลหะจะเกิดตามระนาบนี้ตลอดการเปลี่ยนแปลง ระนาบนี้ถูกวางตามระนาบในเฟสดั้งเดิม

5. มีความสัมพันธ์ของการเรียงตัวของอะตอมระหว่างเฟสมาร์เทนไซต์และเฟสดั้งเดิมที่เป็นแบบเฉพาะเจาะจง
6. อาจเกิดความไม่สมบูรณ์ของรูปผลึกในเฟสมาร์เทนไซต์ ทำให้การเคลื่อนที่แบบเฉือนของอะตอมโลหะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ โดยอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2 ซี-ดี ขึ้นแทนที่ การเปลี่ยนแปลงลักษณะดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า **รูปผลึกแบบเดียวกัน (lattice invariant strain)** ซึ่งมีความสำคัญต่อการเกิดปรากฏการณ์จำรูปและความยืดหยุ่นเทียม (pseudoelasticity)



รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโครงผลึกในรูปแบบต่างๆกัน  
(ที่มา Funakubo, H., Shape memory alloy, 1987)

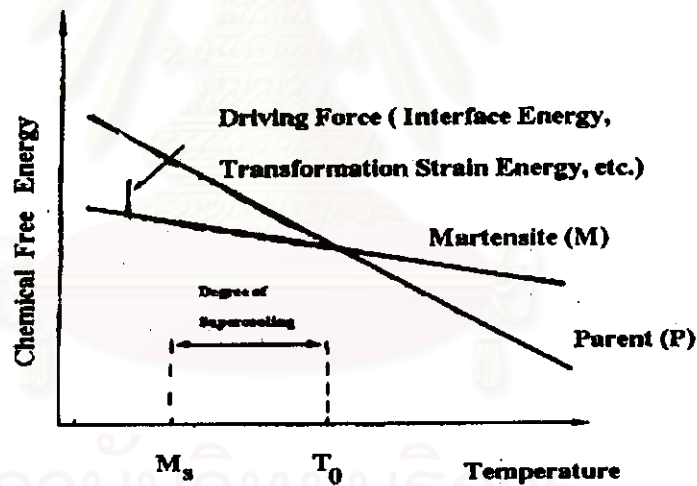
### อุณหพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงเฟส <sup>(12)</sup>

การที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟสดั้งเดิมสู่เฟสมาร์เทนไซต์ได้นั้น ระดับพลังงานอิสระทางเคมี (chemical free energy) ของเฟสมาร์เทนไซต์จะต้องต่ำกว่าเฟสดั้งเดิม แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟสดังกล่าวนี้จำเป็นต้องอาศัยพลังงานภายนอกที่ไม่ใช่พลังงานอิสระทางเคมีที่เรียกว่า **แรงขับเคลื่อน (driving force)** ด้วย เช่น พลังงานที่เกิดจากความเค้นของการเปลี่ยนแปลงเฟส (transformation strain energy), พลังงานผิวหน้า (interface energy) หากว่าความแตกต่างกันระหว่างระดับพลังงานอิสระทางเคมีของเฟสดั้งเดิมและเฟสมาร์เทนไซต์มีค่าไม่มากกว่าแรงขับเคลื่อน ก็จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสขึ้น (รูปที่ 3) จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าหากเราไม่ลดอุณหภูมิลงอย่างยิ่งยวด (supercooled) จากอุณหภูมิสมดุล ( $T_0$ ) อันเป็นอุณหภูมิที่ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างระดับพลังงานอิสระทางเคมีของเฟสดั้งเดิมและเฟสมาร์เทนไซต์สู่อุณหภูมิต่ำพอที่จะทำให้ความแตกต่างกันระหว่างระดับพลังงาน

อิทธิพลของเคมีของเฟสดั้งเดิมและเฟสมาร์เทนไซต์มีค่าสูงพอที่จะเอาชนะแรงขับเคลื่อนได้นั้น การเปลี่ยนแปลงเฟสก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้

ในทางกลับกัน แรงขับเคลื่อนยังจำเป็นในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงกลับทิศจากเฟสมาร์เทนไซต์สู่เฟสดั้งเดิมเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอย่างยิ่งยวด (superheated) จากอุณหภูมิสมดุล

ความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิสมดุลและอุณหภูมิ  $M_s$  เรียกว่า องศาของการลดอุณหภูมิลงอย่างยิ่งยวด (degree of supercooling) ซึ่งพบว่ามีค่ามากกว่า 200 องศาเซลเซียสในเหล็กกล้าและโลหะผสมเหล็ก แต่พบว่ามีค่า 5-30 องศาเซลเซียสในโลหะจำรูปร่างที่ 1



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระทางเคมีและอุณหภูมิของเฟสดั้งเดิมและเฟสมาร์เทนไซต์รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ (ที่มา Funakubo, H., Shape memory alloy, 1987)

Alloy	Composition	$M_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Transformation Temperature Hysteresis ( $^{\circ}\text{C}$ )	Type of Transformation	Order or Disorder	Volume Change
AgCd	44-49 at.% Cd	-190 - -60	-15	B2 $\rightarrow$ M2H	ordered	-0.16
AuCd	46.5-50 at.% Cd	30 - 100	-15	B2 $\rightarrow$ M2H	ordered	-0.41
CuAlNi	14-14.5 wt.% Al 3-4.5 wt.% Ni	-140 - 100	-35	DO $_3$ $\rightarrow$ 2H	ordered	-0.30
CuAuZn	23-26 at.% Au 45-47 at.% Zn	-190 - 40	-6	L21 $\rightarrow$ M18R	ordered	-0.25
CuSn	-15 at.% Sn	-120 - 30		DO $_3$ $\rightarrow$ 2H or 18R	ordered	
CuZn	36.5-41.5 wt.% Zn	-180 - -10	-10	B2 $\rightarrow$ 9R or M9R	ordered	-0.5
CuZnX X = Si, Sn, Al, Ga	few wt.% of X	-180 - 100	-10	B2 $\rightarrow$ 9R or M9R DO $_3$ $\rightarrow$ 18R or M18R	ordered	
InTi	16-23 at.% Ti	60 - 100	-4	FCC $\rightarrow$ FCT	disorder	-0.2
NiAl	36-38 at.% Al	-180 - 100	-10	B2 $\rightarrow$ M3R	ordered	-0.42
TiNi	49-51 at.% Ni	-50 - 100	-30	B2 $\rightarrow$ B19	ordered	-0.34
FePt	-25 at.% Pt	- -130	-4	L $_1$ $\rightarrow$ ordered BCT	ordered	-0.8 - -0.5
FePd	-30 at.% Pd	- -100		FCC $\rightarrow$ FCT $\rightarrow$ BCT	disorder	
MnCu	5-35 at.% Cu	-250 - 180	-25	FCC $\rightarrow$ FCT	disorder	

ตารางที่ 1 แสดงโลหะผสมที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเครียดได้อย่างสมบูรณ์ (ที่มา Funakubo, H. , Shape memory alloy, 1987)

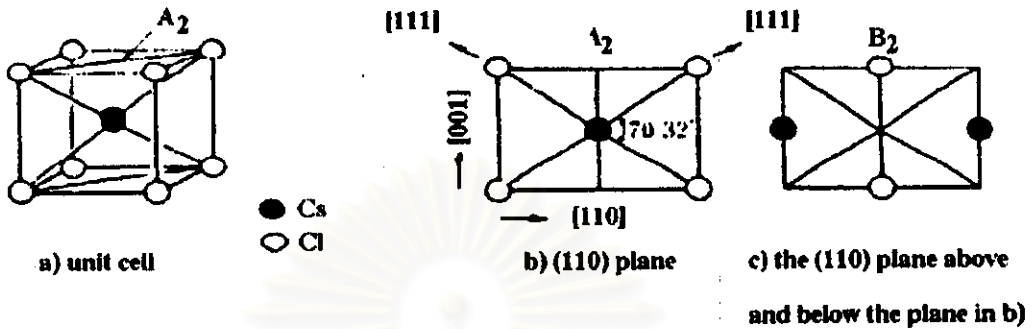
### ลักษณะทางผลึก<sup>(12)</sup>

โลหะผสมที่มีคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ แบบเทอร์โมอีลาสติก ส่วนใหญ่จะมีรูปผลึกในเฟสดั้งเดิมเป็นแบบ body-centered cubic ยกเว้นแต่โลหะผสมที่มีรูปผลึกแบบไม่เรียงลำดับ (disorder Lattice) ซึ่งมีลักษณะผลึกเป็นแบบ face-centered cubic อันได้แก่ InTi, FePd, MnCu, Fe<sub>3</sub>Pt ซึ่งโลหะกลุ่มที่มีเฟสดั้งเดิมเป็น body-centered cubic และมีคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์แบบเทอร์โมอีลาสติก จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มโลหะผสมชนิดเบตาเฟส ( $\beta$ -phase alloy)

โลหะผสมชนิดเบตาเฟสนี้ยังแบ่งย่อยตามอัตราส่วนอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโลหะได้อีก 2 กลุ่ม คือ

1. โลหะผสมชนิดเบตา-หนึ่ง ( $\beta_1$ ) มีอัตราส่วนอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเท่ากับร้อยละ 75 ต่อร้อยละ 25 ดังในโลหะผสม Fe<sub>3</sub>Al
2. โลหะผสมชนิดเบตา-สอง ( $\beta_2$ ) มีอัตราส่วนอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเท่ากับร้อยละ 50 ต่อร้อยละ 50 ดังในโลหะผสม CsCl

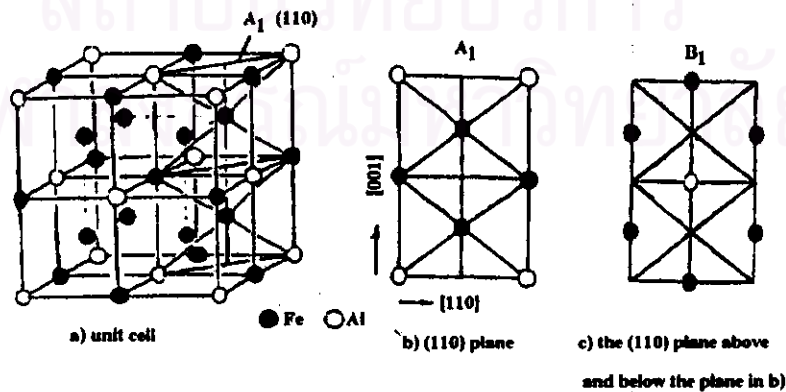
ซึ่งในเฟสมาร์เทนไซต์ของแต่ละกลุ่มก็จะแทนด้วยสัญลักษณ์  $\beta'_1$  และ  $\beta'_2$  ตามลำดับ ในรูปที่ 4 และ 5 ได้แสดงถึงโครงผลึกของ  $Fe_3Al$  ซึ่งเป็นโลหะผสมชนิดเบตา-หนึ่งและมีโครงผลึกเป็นชนิดที่แทนด้วยสัญลักษณ์  $DO_3$  และ โครงผลึกของ  $CsCl$  ซึ่งเป็นโลหะผสมชนิดเบตา-สองและมีโครงผลึกเป็นชนิดที่แทนด้วยสัญลักษณ์  $B_2$



รูปที่ 4 (บน) แสดงลักษณะโครงผลึกแบบ  $CsCl-B_2$  Superlattice พร้อมทั้งแสดงอะตอมในระนาบ (110) (ที่มา Funakubo, H. , Shape memory alloy, 1987)

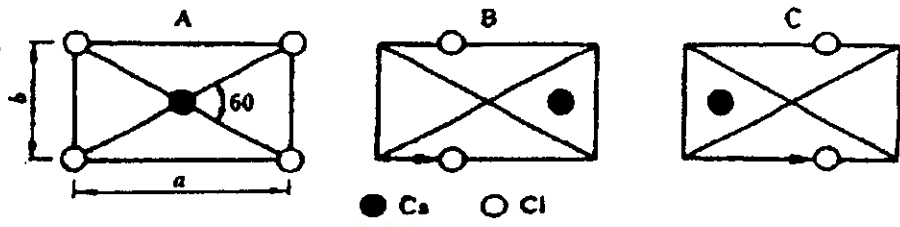
จากรูปทั้งสอง รูป a แสดงโครงสร้างผลึก 3 มิติ รูป b แสดงการเรียงตัวของอะตอมตามระนาบ 110 ส่วนรูป c แสดงการเรียงตัวของอะตอมตามระนาบ 110 แต่อยู่สูงหรือต่ำกว่าระนาบในรูป b อยู่ 1 ระดับซึ่งอาจมองได้ว่ารูป a เป็นผลมาจากการเรียงตัวอย่างต่อเนื่องของรูป b และ c

การเปลี่ยนแปลงสเฟสมาร์เทนไซต์ เป็นผลมาจากการเลื่อนของอะตอมบนระนาบ 110 พร้อมทั้งมีการเลื่อนสลับทิศตามระนาบ  $\bar{1}10$  ซึ่งมีผลต่อรูปผลึกในเฟสมาร์เทนไซต์ดังในรูปที่ 6 และ 7 ส่วนในรูปที่ 8 แสดงถึงการเรียงตัวที่เป็นไปได้ทั้งหมดของรูปผลึกในเฟสมาร์เทนไซต์ทั้งในโลหะผสมชนิดเบตา-หนึ่ง และโลหะผสมชนิดเบตา-สอง

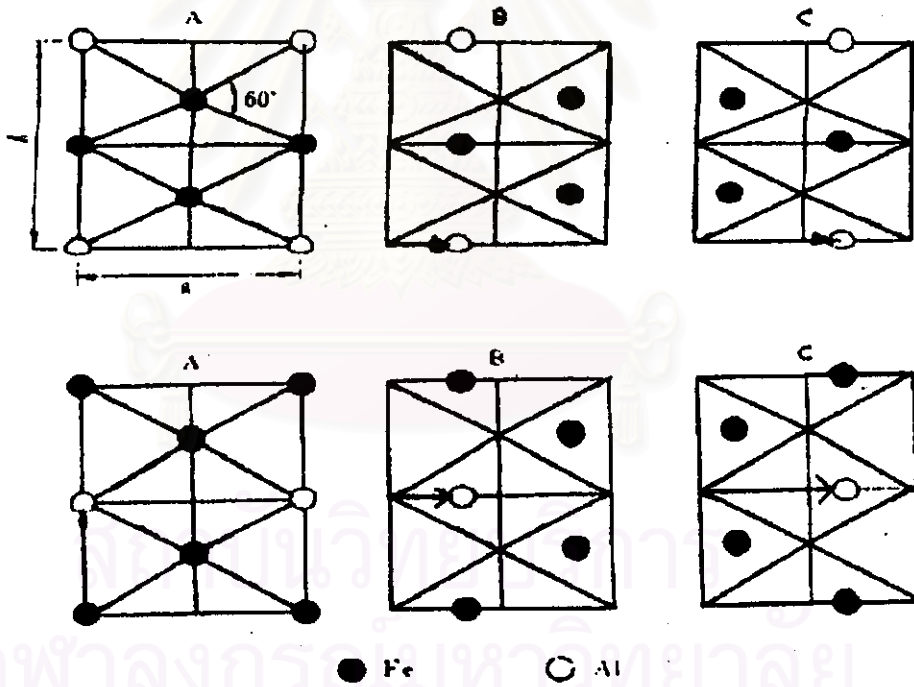


รูปที่ 5 แสดงลักษณะโครงผลึกแบบ  $Fe_3Al-DO_3$  superlattice พร้อมทั้งแสดงอะตอมในระนาบ (110) (ที่มา Funakubo, H. , Shape memory alloy, 1987)

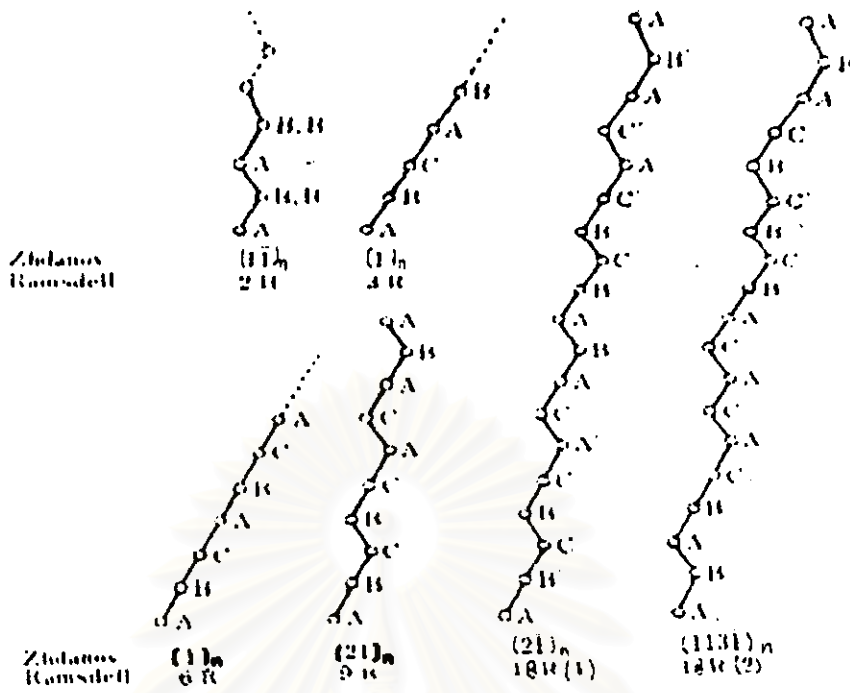
รูปที่ 9 แสดงรูปผลึกในเฟสมาร์เทนไซต์เปรียบเทียบกับรูปผลึกในเฟสดั้งเดิมของ CuAlNi แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเลื่อนของอะตอมระหว่างรูปผลึกทั้งสอง



รูปที่ 6 แสดงการเรียงตัวของอะตอมในระนาบที่ต่อเนื่องกันของรูปผลึกแบบ มาร์เทนไซต์ (B,C) ที่เกิดจากเฟสดั้งเดิม ในโครงร่างผลึกแบบ CsCl- $\beta_2$  (A) ,ถูกสรแสดงทิศทางการเลื่อนของอะตอม (ที่มา Funakubo, H. , Shape memory alloy, 1987)

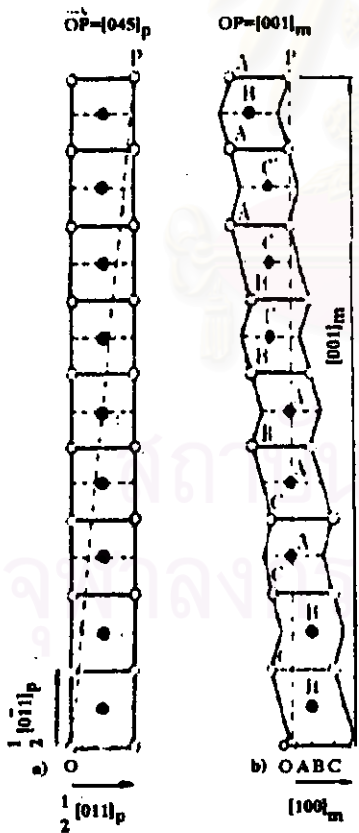


รูปที่ 7 แสดงการเรียงตัวของอะตอมในระนาบที่ต่อเนื่องกันของรูปผลึกแบบ มาร์เทนไซต์ (B,C) ที่เกิดจากเฟสดั้งเดิมในโครงผลึกแบบ Fe<sub>3</sub>Al-DO<sub>3</sub> (A) ,ถูกสรแสดงทิศทางการเลื่อนของอะตอม (ที่มา Funakubo, H. , Shape memory alloy, 1987)



รูปที่ 8 แสดงการเรียงตัวที่เป็นไปได้ของเฟสมาร์เทนไซต์แบบต่างๆ

(ที่มา Funakubo, H., Shape memory alloy, 1987)



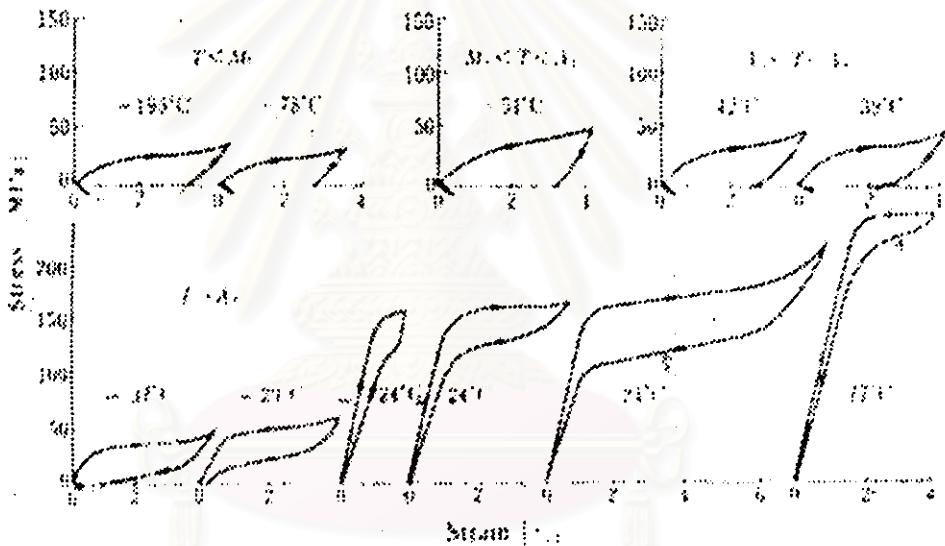
รูปที่ 9 แสดงรูปผลึกในเฟสมาร์เทนไซต์เปรียบเทียบ  
กับรูปผลึกในเฟสดั้งเดิมของ CuAlNi แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเลื่อนของอะตอมระหว่างรูปผลึกทั้งสอง

(ที่มา Funakubo, H., Shape memory alloy, 1987)



## ปรากฏการณ์จำรูป<sup>(12)</sup>

การเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ในโลหะจำรูป เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกในแบบที่คล้ายคลึงกับการเลื่อน (slip) หรือ ทวินนิ่ง (twinning) ของอะตอมในรูปผลึกของโลหะทั่วไป แต่ด้วยความสามารถในการเกิดการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับของโลหะจำรูป ซึ่งไม่มีอยู่ในโลหะทั่วไป ทำให้โลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ มีความแตกต่างจากโลหะอื่น ๆ ทั่วไป รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้มาจากการทดสอบแรงดึง (tensile test) ที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่ารูปร่างของเส้นกราฟมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของโลหะอันประกอบด้วยอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์, อุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด, อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์, อุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุด และอุณหภูมิของการทดสอบ



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้มาจากการทดสอบแรงดึง (tensile test) ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ที่มา Funakubo, H., Shape memory alloy, 1987)

ถ้าอุณหภูมิของการทดสอบมากกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิ A, จะพบการเปลี่ยนแปลงรูปอย่างพลาสติกตามหลังการเปลี่ยนแปลงรูปอย่างอีลาสติกในเฟสดั้งเดิม แต่การเปลี่ยนแปลงรูปอย่างพลาสติกก็จะสามารถมีการคืนตัวได้หมดเมื่อความเค้นถูกกำจัดออกไป ลักษณะของรูปกราฟที่เป็นลักษณะที่มีความยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเส้นตรงนี้เรียกว่า ความยืดหยุ่นเทียมของการเปลี่ยนรูป (transformation pseudoelasticity)

ถ้าอุณหภูมิของการทดสอบน้อยกว่าอุณหภูมิ A, ความเครียดของโลหะไม่สามารถคืนตัวได้หมดภายหลังจากกำจัดความเค้นออกไป แต่ความเครียดที่ยังเหลืออยู่นี้สามารถกำจัด

ให้หมดโดยการนำโลหะไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ  $A_1$  ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 10 คุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์จำรูป

### ความยืดหยุ่นเทียมของการเปลี่ยนรูป<sup>(12)</sup>

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เปรียบเทียบกับจุดต่าง ๆ บนกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเครียด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับในโลหะผสมทองแดง-14.1 : อลูมิเนียม-4.2 : นิกเกิล โดยมีรายละเอียดดังนี้

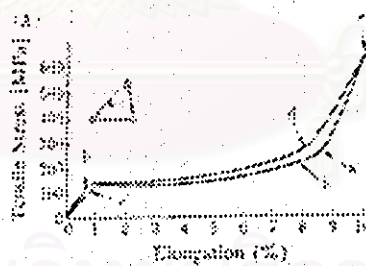
ก่อนถึงจุด b กราฟจะแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบออสติคของเฟสดั้งเดิม

ที่จุด b รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงถึงบริเวณที่เปลี่ยนไปเป็นลักษณะคล้ายจาน อันเป็นลักษณะของบริเวณที่เป็นเฟสมาร์เทนไซต์อันเกิดจากความเค้น

จากจุด b-d เป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างเฟสดั้งเดิมสู่เฟสมาร์เทนไซต์

ที่จุด d โลหะผสมเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ทั้งชิ้น

จากจุด d-e ความเครียดที่เกิดขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบออสติคของเฟสมาร์เทนไซต์ และความเครียดดังกล่าวนี้จะลดลงเมื่อลดความเค้นลงดังกราฟจากจุด e ถึง a' และเปลี่ยนแปลงกลับจากเฟสมาร์เทนไซต์สู่เฟสดั้งเดิมโดยการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับจนกระทั่งถึงจุด c' จากนั้นจึงเปลี่ยนแปลงกลับสู่จุด 0 ด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลับแบบออสติค ของเฟสดั้งเดิม



รูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เปรียบเทียบกับจุดต่าง ๆ บนกราฟที่

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

(ที่มา Funakubo, H. , Shape memory alloy, 1987)

## โลหะผสม นิกเกิล ไทเทเนียม

โลหะผสม นิกเกิล ไทเทเนียม ได้ถูกคิดค้นขึ้นในต้นทศวรรษที่ 1960 โดยห้องทดลองของสรรพาวุธทหารเรือสหรัฐอเมริกา โดย Buehler และผู้ช่วย<sup>(4,7,13)</sup> เพื่อใช้ในการภารกิจขององค์การอวกาศแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (NASA)<sup>(2)</sup> โดยใช้ชื่อว่า nitinol อันเป็นชื่อที่ประกอบด้วยคำว่า Ni มาจาก นิกเกิล Ti มาจากไทเทเนียม และ nol มาจาก Naval Ordnance Laboratory อันหมายถึงห้องทดลองสรรพาวุธทหารเรือ<sup>(2,4)</sup>

คุณสมบัติที่สำคัญของ โลหะผสม นิกเกิล ไทเทเนียม

1. ปรากฏการณ์จำรูป ซึ่งมีผู้ให้นิยามต่างๆกันดังนี้

คุณสมบัติของโลหะที่ถูกเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร แต่มีความสามารถที่จะคืนรูปเดิมได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น<sup>(2,4,7,14)</sup>

Lipshatz และคณะ<sup>(2)</sup> กับ Miura และคณะ<sup>(7)</sup> ให้ความหมายของปรากฏการณ์จำรูปไว้ว่าเป็นคุณสมบัติของโลหะที่ถูกเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร แต่มีความสามารถที่จะคืนรูปได้เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ณ อุณหภูมินั้นเรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟส (transitional temperature)

Lynn Hurst และคณะ<sup>(4)</sup> กับ Thayer และคณะ<sup>(15)</sup> กล่าวถึงคุณสมบัติปรากฏการณ์จำรูปไว้ว่า คุณสมบัตินี้เกิดจากความสามารถของโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมที่สามารถเปลี่ยนชนิดของพันธะระหว่างอะตอมได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป อุณหภูมิช่วงที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้นั้นเรียกว่า ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวด (transitional temperature range) โดยช่วงอุณหภูมิช่วงที่ต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวด โลหะนิกเกิลไทเทเนียมจะอ่อนและเปลี่ยนแปลงรูปได้ง่าย แต่เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้สูงเกินช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวด โลหะผสมนี้จะเปลี่ยนแปลงกลับสู่สภาพเดิม ค่าของช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวด นี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของธาตุที่มาผสมกันและกรรมวิธีการผลิต<sup>(16)</sup>

Andreasen<sup>(17)</sup> กล่าวว่า การที่จะทำโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมนี้มีปรากฏการณ์จำรูปได้นั้น สามารถกระทำได้โดยกำหนดรูปร่างของโลหะนี้ให้อยู่ในลักษณะที่ต้องการและนำไปผ่านความร้อน 450-500 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 10 นาที ลวดจะอยู่ในสภาพที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย และเมื่อลวดถูกทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปแล้วถูกนำมาให้ความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส โลหะก็จะกลับมามีอยู่ในสภาพที่ถูกกำหนดไว้ในตอนแรกได้

2. ความยืดหยุ่นยิ่งยวดหรือความยืดหยุ่นเทียม (superelasticity, pseudoelasticity) อันหมายถึง คุณสมบัติของลวดที่เมื่อให้แรงที่มีค่าเกือบคงที่ไปยังลวด จะทำให้ลวดสามารถมีการเปลี่ยนสภาพไปได้เรื่อยๆ และเมื่อลวดมีการคืนสภาพกลับสู่สภาพปกติแรงที่ลวดกระทำก็จะมีค่าเกือบคงที่ด้วยเช่นกัน<sup>(7)</sup>

คุณสมบัติทั้งสองของโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมนี้ สามารถใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะ อธิบายได้ว่าโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมนี้มีลักษณะของผลึกโลหะหลักๆ อยู่ 2 เฟส (phase) คือ เฟสออสเทนไนท์ (austenitic phase) เป็นลักษณะปกติสามัญหรือเฟสตั้ง

เดิมของโลหะผสมนี้ มีลักษณะผลึกเป็น body-centered cubic หรือเป็น CsCl (cesium chloride) cubic <sup>(8,15)</sup> และเฟสมาร์เทนไซต์ (martensitic phase) มีลักษณะเป็น closed packed hexagonal <sup>(8)</sup> หรือ monoclinic, triclinic หรือ distorted hexagonal <sup>(15)</sup>

ได้มีรายงานถึงเฟสที่อยู่ระหว่างเฟสออสเทนไนท์และเฟสมาร์เทนไซต์ (Intermediate phase) ในโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมที่มีอัตราส่วนอะตอมของไทเทเนียมเท่ากับร้อยละ 51 พบว่ามีลักษณะผลึกเป็นแบบ rhombohedral <sup>(12)</sup>

การเปลี่ยนแปลงระหว่างรูปแบบผลึกทั้งสองเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับโลหะจำรูปทั่วไปคือ

1. การเปลี่ยนอุณหภูมิ โดยที่เฟสมาร์เทนไซต์จะเกิดอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเฟสออสเทนไนท์ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่าง เฟสทั้ง 2 ก็คือ ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของโลหะโดยอาศัยอุณหภูมินี้ทำให้เกิดคุณสมบัติปรากฏการณ์จำรูปของโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม
2. ความเค้น กล่าวคือ ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่าช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส เฟสออสเทนไนท์ จะสามารถเปลี่ยนไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ได้โดยการให้ความเค้นกับโลหะ และเมื่อปริมาณความเค้นลดลงจนถึงจุดที่เหมาะสม เฟสมาร์เทนไซต์ก็จะสามารถเปลี่ยนกลับไปสู่เฟสออสเทนไนท์ได้ เรียกลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้น (stress induced martensitic transformation) และโดยปกติแล้วระดับของความเค้นที่ใช้เปลี่ยนจากเฟสออสเทนไนท์ไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ จะมีค่าสูงกว่าระดับของความเค้นที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงกลับจากเฟสมาร์เทนไซต์สู่เฟสออสเทนไนท์<sup>(2,8,14)</sup> การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของโลหะโดยอาศัยความเค้นนี้ทำให้เกิดคุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดของโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม

Andreasen และคณะ ได้แนะนำให้ใช้ลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมดั้งเดิม (nitinol) ในทางทันตกรรมจัดฟันโดยอาศัยประโยชน์ด้านความยืดหยุ่น (elasticity) และความทนทานต่อการกัดกร่อน <sup>(13)</sup> พร้อมทั้งได้พยายามปรับปรุงให้ลวด nitinol มีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ในช่วงของอุณหภูมิของร่างกายเพื่อจะได้ใช้ประโยชน์ในส่วนของความยืดหยุ่นยิ่งยวดแต่ก็ไม่สำเร็จในช่วงเวลานั้น<sup>(4,7)</sup> และได้มีการผลิตลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าในชื่อของ Nitinol<sup>®</sup> (3M/Unitek USA.) <sup>(18)</sup> ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าลวดเหล็กโรสนิมที่เคยใช้มาแต่เดิม กล่าวคือ มีระยะยืดหยุ่นตัวสูง และโค้งงอได้ง่าย แต่อย่างไรก็ดีไม่แสดงคุณสมบัติของปรากฏการณ์จำรูปหรือความยืดหยุ่นยิ่งยวดเลย <sup>(7,14)</sup>

อย่างไรก็ดี แนวคิดของ Andreasen ก็ได้เป็นพื้นฐานให้มีการวิจัยต่อมา จนกระทั่งในปี 1985 Burstone และคณะ ได้เสนอลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมที่ผลิตในประเทศจีน โดย Dr. Tien Hua Cheng ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสต่ำกว่า Nitinol<sup>®</sup> และมีคุณสมบัติทางกลดีกว่า Nitinol<sup>®</sup> <sup>(19)</sup> และในปีถัดมา Miura และคณะ <sup>(7)</sup> ก็ได้เสนอลวดโลหะผสมนิกเกิล

ไทเทเนียมที่ผลิตในประเทศญี่ปุ่นโดย Furugawa Electric Co.Ltd. ที่มีทั้งการอัตราคืนกลับที่สูง (high spring back) , ปรากฏการณ์จำรูป และ คุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวด (superelastic property) อันหมายถึง คุณสมบัติของลวดที่เมื่อให้แรงที่มีค่าเกือบคงที่ไปยังลวด จะทำให้ลวดสามารถมีการเปลี่ยนสภาพไปได้เรื่อย ๆ และเมื่อลวดมีการคืนสภาพกลับสู่สภาพปกติ แรงที่ลวดกระทำก็จะมีค่าเกือบคงที่ด้วยเช่นกัน ถ้านำมาเขียนกราฟระหว่างความเค้นและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จะได้บริเวณที่มีเส้นกราฟเกือบคงที่เรียกว่า บริเวณเพลโต (plateau region) <sup>(20)</sup>

ในปัจจุบันลวดนิกเกิลไทเทเนียมยืดหยุ่นยิ่งยวดได้มีการผลิตออกมามากมายหลายบริษัท แต่ถ้าวรวมลวดนิกเกิลไทเทเนียมชนิดดั้งเดิมเข้าด้วยแล้วจะสามารถแบ่งประเภทของลวดนิกเกิลไทเทเนียมในปัจจุบันได้ดังนี้

1. Martensitic stabilized alloy wire หรือ ลวดนิกเกิลไทเทเนียมไร้ความยืดหยุ่นยิ่งยวด ตัวอย่างในกลุ่มนี้ได้แก่ 3M/Unitek-Nitinol<sup>®(16)</sup> ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ที่ 48-82 องศาเซลเซียสซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิร่างกาย<sup>(4)</sup> มีรูปผลึกเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ที่เสถียร อันเกิดขึ้นจากการดึงลวดเป็นเส้นในขณะผลิตทำให้ลวดมีความเค้น (stress) อยู่ในตัว ทำให้ไม่มีคุณสมบัติของปรากฏการณ์จำรูป <sup>(5)</sup> และ ความยืดหยุ่นยิ่งยวด<sup>(14)</sup> แต่สามารถทำให้ ปรากฏการณ์จำรูปกลับคืนมาได้โดยการอบชุบด้วยความร้อน <sup>(5)</sup>
2. Martensitic active alloy ลวดในกลุ่มนี้มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ระหว่างอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิร่างกาย ตัวอย่างในกลุ่มนี้ได้แก่ GAC-Sentalloy <sup>(5,14,21)</sup>
3. Austenitic active alloy ลวดในกลุ่มนี้มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟส อยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตัวอย่างในกลุ่มนี้ได้แก่ Ormco-NiTi <sup>(8,14,21)</sup>

ความแตกต่างของชนิดที่ 2 และ 3 อยู่ที่การให้แรงของแบบที่ 3 มากกว่าแบบที่ 2 แต่ทั้งสองแบบก็ยังมี ความยืดหยุ่นสูงและมีการให้แรงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอเหมือนกัน Waters<sup>(14)</sup> ยังได้กล่าวถึงลวดโลหะที่มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสใกล้เคียงกับอุณหภูมิร่างกายซึ่งสามารถตัดได้ด้วยมือหรือคีมระหว่างใส่ในคนไข้และจะเกิดการคืนรูปเมื่อได้รับความร้อนจากอุณหภูมิของร่างกายคนไข้ ลวดชนิดนี้ ได้แก่ Thermalloy

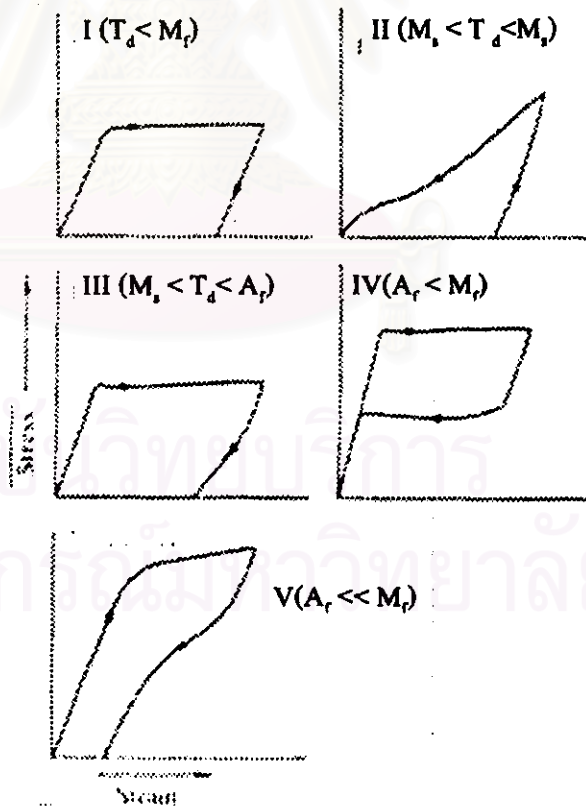
### **คุณสมบัติเชิงกลของลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม<sup>(12)</sup>**

เริ่มมีการศึกษามาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1960 รูปที่ 12 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่อุณหภูมิทดสอบ ( $T_s$ ) ต่างๆกัน ได้ผลดังนี้

1. อุณหภูมิทดสอบต่ำกว่าอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ ( $M_s$ ) ที่อุณหภูมินี้ชิ้นโลหะทั้งชิ้นเป็นมาร์เทนไซต์ ผลที่เกิดขึ้นคือการเลื่อนและบิดของรูปผลึกในชิ้นโลหะ
2. อุณหภูมิทดสอบอยู่ระหว่างอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ ( $M_s$ ) และอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด ( $M_f$ ): ที่อุณหภูมินี้ในชิ้นโลหะ

จะมีทั้งมาร์เทนไซต์และออสเทนไนท์ การเปลี่ยนแปลงในส่วนที่เป็นออสเทนไนท์จะมีการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้น ส่วนในบริเวณที่เป็นมาร์เทนไซต์ก็将会เกิดการเลื่อนและบิดของรูปร่างในชั้นโลหะ เช่นเดียวกับแบบที่ 1

3. อุณหภูมิทดสอบอยู่ระหว่างอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด ( $M_s$ ) และอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุด ( $A_s$ ): การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสู่เฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้นเท่านั้น
4. อุณหภูมิทดสอบสูงกว่าอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุด ( $A_s$ ): จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของคุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวด เนื่องจากที่อุณหภูมินี้ในชั้นโลหะจะมีเฉพาะเฟสออสเทนไนท์เท่านั้น ส่วนมาร์เทนไซต์มีเฉพาะภายใต้ความเค้น
5. อุณหภูมิทดสอบสูงกว่าอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทนไนท์สิ้นสุด ( $A_s$ ) มากๆ : ที่อุณหภูมินี้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกของเฟสออสเทนไนท์ จะเกิดขึ้นก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสู่เฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้น



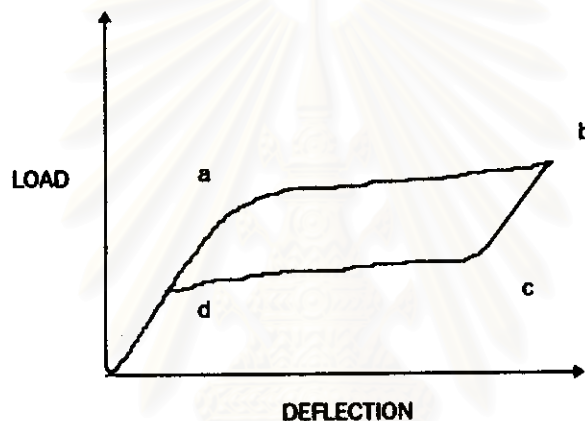
รูปที่ 12 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่อุณหภูมิทดสอบ ( $T_d$ ) ต่างๆกัน

(ที่มา Funakubo, H. , Shape memory alloy, 1987)

## คุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม

คุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดนิกเกิลไทเทเนียมสามารถอธิบายได้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของแรงที่ให้อังลวดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลวด เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง กับความยาวที่เพิ่มขึ้น<sup>(7,15)</sup> ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ (moment) กับมุมในการงอของลวด<sup>(8,18,19,22,23)</sup> ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดแบบ 3 จุด กับระยะทางที่ลวดมีการเปลี่ยนรูป<sup>(6,20,24,25)</sup> เป็นต้น

ลักษณะของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นแบบใด ก็ล้วนแต่มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันทั้งสิ้น (ดังรูปที่ 13)



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ให้อังลวดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลวด

(ที่มา Funakubo, H., Shape memory alloy, 1987)

ลักษณะของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ให้อังกับการเปลี่ยนแปลงของลวดจะประกอบด้วยลักษณะที่คล้ายคลึงกันดังนี้

1. ความแกร่งเริ่มต้น (initial stiffness-ระยะ 0-a) เป็นระยะที่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงของลวดมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น Miyazaki และคณะ ได้อธิบายไว้ว่าระยะของกราฟลักษณะนี้เป็นระยะที่เมื่อให้แรง ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบอีลาสติกขึ้นในส่วนของเฟสออสเทนไนท์ กล่าวคืออยู่ในขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ของเฟสออสเทนไนท์นั่นเอง<sup>(26)</sup>
2. Loading plateau (ระยะ a-b) ระยะนี้เป็นระยะที่เมื่อให้แรงคงที่ (หรือเกือบจะคงที่) ก็ยังสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเราหยุดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่จุด ๆ หนึ่ง (เปรียบเทียบกับ การโยงลวดเข้าไปในร่องของแบร็กเกตในฟันที่ซ้อนเก) เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นเกือบขนานกับแกน X หรือมีค่าความแกร่งที่ต่ำมาก Miyazaki และคณะ<sup>(26)</sup> ก็ได้อธิบายไว้ว่าเมื่อให้แรงถึง

- จุดๆหนึ่ง (critical stress) ก็จะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้น เกิดขึ้น
3. ระยะ (b-c) เป็นระยะที่เส้นกราฟจะตกเนื่องจากผลจากแรงเสียดทานและเกิดจากการคืนตัวจากความเค้นของ เฟสมาร์เทนไซต์<sup>(7,20)</sup>
  4. unloading plateau เป็นระยะที่เกิดจากการคืนกลับของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้นสู่เฟสออสเทนไนท์<sup>(7,11)</sup> ในทางทันตกรรมจัดฟัน เรามักจะให้ความสำคัญกับ unloading plateau เนื่องจากเป็นแรงที่ได้จากการคืนสภาพของโลหะเช่นเดียวกับการ คืนตัวของลวดในทางทันตกรรมจัดฟัน

Segner และ Ibe<sup>(24)</sup> ได้ให้นิยามเกี่ยวกับคุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดโดยอาศัยอัตราส่วนระหว่างความแรงแรงเริ่มต้นกับความแรงแรงของ deactivation (unloaded) plateau โดยถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากกว่า 8 จะถือว่ามีความยืดหยุ่นยิ่งยวดและถ้ามากกว่า 2 แต่ไม่ถึง 8 จะเรียกว่ามีแนวโน้มของความยืดหยุ่นยิ่งยวด แต่ถ้าต่ำกว่า 2 จะไม่ถือว่ามีความยืดหยุ่นยิ่งยวด

ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดของลวดนิกเกิลไทเทเนียม ได้มีผู้วิจัยถึงคุณสมบัติทางอุณหภูมิของลวดนิกเกิลไทเทเนียม โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโลหะในระดับอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ลักษณะความยืดหยุ่นยิ่งยวด มีค่าลดลง Miyazaki และคณะ<sup>(26)</sup> ได้ให้คำอธิบายไว้ในปี 1988 ว่า ที่อุณหภูมิต่ำเฟสมาร์เทนไซต์จะมีความเสถียรมากขึ้น ทำให้เกิดการเกิดการย้อนกลับของการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์โดยอาศัยความเค้นเป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้คุณสมบัติของความยืดหยุ่นยิ่งยวดสูญเสียไป

### การนำมาใช้ในทางทันตกรรมจัดฟัน

Proffit และคณะได้กล่าวว่า<sup>(1)</sup> แรงที่เหมาะสมในการจัดฟันคือ แรงที่มีลักษณะ light continuous force คือแรงที่ให้มัลักษณะคงที่และมีค่าน้อย ซึ่งก็ตรงกับคุณสมบัติทางกลของลวดนิกเกิลไทเทเนียมที่มีความยืดหยุ่นยิ่งยวดที่ให้แรงขณะคืนตัว เป็นแรงที่มีลักษณะเกือบคงที่และมีค่าต่ำและยังเคลื่อนกลับได้เป็นระยะทางที่มากเมื่อเทียบกับลวดชนิดเดิม<sup>(2)</sup> ทำให้ลวดนิกเกิลไทเทเนียมที่มีความยืดหยุ่นยิ่งยวด ได้ถูกใช้งานทางทันตกรรมจัดฟันอย่างมาก หมายความว่า จะเป็นการปรับระดับฟัน หรือการพัฒนาไปเป็นเครื่องมือในการจัดฟันชนิดต่าง ๆ เช่น สปริงขดลวด (coil spring) หรือ สปริงตั้งฟัน (uprighting spring)<sup>(27,28,29,30)</sup>

Tipton และคณะ<sup>(27)</sup> ได้แนะนำว่า การใช้ลวดนิกเกิลไทเทเนียมขนาด 0.016 นิ้ว เป็นลวดเส้นแรกของการจัดฟัน ได้ทำให้เกิดผลการเรียงตัวของฟันอย่างมีประสิทธิภาพ แก่ไขการบิดหมุนของฟันได้ดี ทั้งยังมีแรงอยู่ได้นานและนุ่มนวล และยังโยงมัดเข้ากับแบร็กเกตได้ง่ายอีกด้วย แต่ผลที่ได้จากทางการขยายซากกรรไกรและปรับระดับในแนวตั้งยังมีน้อย



Han และ Quick <sup>(28)</sup> ได้เปรียบเทียบแรงที่ได้จากสปริงนิกเกิลไทเทเนียม (nickel titanium coil spring) กับลวดเหล็กกล้าไร้สนิม และ elastomeric chain พบว่า ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในน้ำลายเทียม ให้คุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าอีก 2 ชนิด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

### การให้ความร้อนกับลวดโลหะนิกเกิล ไทเทเนียม

การให้ความร้อนกับลวดโลหะในระดับที่พอเหมาะ จะทำให้โลหะนั้นมีการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นได้ ได้มีการทดลองเปรียบเทียบการอบชุบโลหะด้วยความร้อน (heat-treatment) จากนักวิจัยหลายท่านดังนี้

Miura และคณะ <sup>(7)</sup> ได้ทดลองให้ความร้อนกับลวดนิกเกิลไทเทเนียมที่มีความยืดหยุ่นยิ่งยวด (japanese Niti) ขนาด 0.016 นิ้ว โดยนำลวดไปแช่ในอ่างที่บรรจุเกลือในเตาหรืออุณหภูมิ 200, 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 10, 60 และ 120 นาที รวมทั้งสิ้น 20 กลุ่มตัวอย่าง หลังจากผ่านความร้อนแล้วนำมาแช่น้ำแล้วนำมาทดสอบการตัดโค้งโดยใช้ลักษณะการตัดโค้ง 3 จุด วัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ให้กับระยะของการเปลี่ยนรูปของลวดจากแนวเดิม โดยการวัดนี้จัดกระทำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส  $\pm 1$  องศาเซลเซียส

ผลปรากฏว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่การให้ความร้อน ณ อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส มีผลแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน

ที่ 400 องศาเซลเซียส ผลของความร้อนต่อ unloading plateau ที่แสดง ความยืดหยุ่นยิ่งยวดมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่จะลดลงมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

ที่ 500 องศาเซลเซียส พบว่าถ้าให้ความร้อนนานขึ้น ความยืดหยุ่นยิ่งยวดจะลดลงมากขึ้น

ที่ 600 องศาเซลเซียส ลวดจะสูญเสียคุณสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวด อย่างสิ้นเชิงแม้ว่าจะให้ความร้อนเพียง 5 นาที

Khier และคณะ <sup>(8)</sup> ได้ใช้ลวดนิกเกิล ไทเทเนียม ทางการค้าขนาด 0.016 นิ้ว จาก 6 บริษัท โดยที่ลวด 3 ใน 6 ชนิดเป็นลวดที่มีความยืดหยุ่นยิ่งยวด แต่อีก 3 ชนิดเป็นลวดที่ไร้ความยืดหยุ่นยิ่งยวด นำลวดมาให้ความร้อนในเตาเผาที่ 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ในการทดลองนี้ได้มีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลวดขณะให้ความร้อนกับสิ่งที่ปนอยู่ในอากาศโดยใช้ไนโทเทเนียมเล็ก ๆ ใส่รวมไปกับลวดในแคปซูลควออร์ทซ์ที่ภายในเกือบเป็นสูญญากาศ (ความดัน 0.01-0.1 ทอร์) หลังจากให้ความร้อนแคปซูลควออร์ทซ์ จะถูกแช่น้ำแล้วทุบให้แตกในน้ำเพื่อแช่ชิ้นตัวอย่างแล้วนำมาวัดอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ของการตัดกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการตัดเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านความร้อน

จากการทดลองพบว่าที่ 500 องศาเซลเซียส 10 นาที ลวดที่มีความยืดหยุ่นยิ่งยวด ทั้ง 3 ชนิดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

500 องศาเซลเซียส 120 นาที ลวดยืดหยุ่นยิ่งยวด ทั้ง 3 ชนิดมีค่าของโมเมนต์ การดัดที่มากที่สุดเมื่อดัดลวดไป 80 องศา ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และมีค่าของ deactivation plateau ที่ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมรวมทั้งค่าการคืนตัวของลวดลดลงเล็กน้อย

ส่วนที่ 600 องศาเซลเซียส ไม่ว่าจะนานเท่าใดพบว่าลวดยืดหยุ่นยิ่งยวดสูญเสียความเป็นความยืดหยุ่นยิ่งยวดและมีค่าการคืนตัวของลวดลดลงมาก พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเกิดขึ้นที่องศาการดัดประมาณ 20-30 องศา ส่วนลวดไร้ความยืดหยุ่นยิ่งยวด พบการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม

Yoneyama และคณะ<sup>(9)</sup> ได้แสดงถึงผลวิจัยที่แตกต่างจากของ Miura และ Khier โดยใช้ลวดนิกเกิล ไทเทเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มม. ที่ผลิตจาก Furugawa Electric เป็นลวดที่ผ่านการผลิตแบบ work hardening โดยดัดลวดยาว 50 มม. ให้ความร้อน 2 ครั้ง โดยครั้งแรก โดยลวดจะซึ่งในหลอดเหล็กไร้สนิม เพื่อให้ลวดตรงและปรับคุณสมบัติให้งอได้ดี (flexible) ครั้งที่ 2 ให้ความร้อนที่ 673-813 เคลวิน โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 20 เคลวิน เป็นเวลา 1500 วินาที เพื่อเปลี่ยนรูปร่าง และควบคุมคุณสมบัติการดัดของลวด หลังจากผ่านความร้อนแต่ละครั้งแล้วลวดจะถูกแช่ในน้ำและถูกทำการชด หลังจากนั้นจะถูกนำมาทดสอบ 2 ชนิด

1. ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมทรี (differential scanning calorimetry) เป็นการศึกษาถึงอุณหภูมิ ในการเปลี่ยนเฟสของลวดระหว่าง ออสเทนไนท์ และ มาร์เทนไซต์ ช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 173-373 เคลวินด้วยอัตราการให้ความร้อน 0.17 เคลวินต่อวินาที ใช้ ในโดรเจนเหลวในการทำความเย็น
2. การทดสอบการดัดโค้ง 3 จุด โดยลวดจะถูกเปลี่ยนรูปร่างจนกระทั่งมีระยะ 1.5 มม. ความเร็วในการเปลี่ยนรูปร่าง = 0.2 มม./วินาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 310 เคลวิน.

ผลของการทดสอบ มีดังนี้

1. ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมทรี พบว่าในแต่ชั้นของการอบชุบด้วยความร้อน ครั้งที่ 2 อุณหภูมิในการเกิดเฟสมาร์เทนไซต์ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ลวดนิกเกิล ไทเทเนียมจะแสดงระดับของแรงทางทันดกรรมจัดฟันที่เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิร่างกาย (310 เคลวิน) เมื่ออบชุบด้วยความร้อน มีค่าสูงกว่า 753 เคลวิน
2. คุณสมบัติทางการดัดโค้ง (load deflection curve) ของลวดที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงตามรูป การผ่านความร้อนในช่วง 673-713 เคลวิน แสดงถึงช่วงความยืดหยุ่นที่ต่ำ, มี การเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติก (plastic deformation) เกิดขึ้นภายหลังจากการคืนตัว โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 693 เคลวิน

ส่วนที่ 733-813 เคลวินนั้นพบว่าความแกร่งเริ่มต้น (initial stiffness) เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนรูปร่างถาวรลดลงเรื่อย ๆ จนเป็นศูนย์, ค่าความยืดหยุ่นยิ่งยวดเพิ่มขึ้น จากการวิจัยเบื้องต้นที่มีผลแตกต่างกันนี้จึงทำให้ความสนใจของการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งไปที่การพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของลวดนิกเกิลไทเทเนียมโดยอาศัยการอบชุบด้วยความร้อน

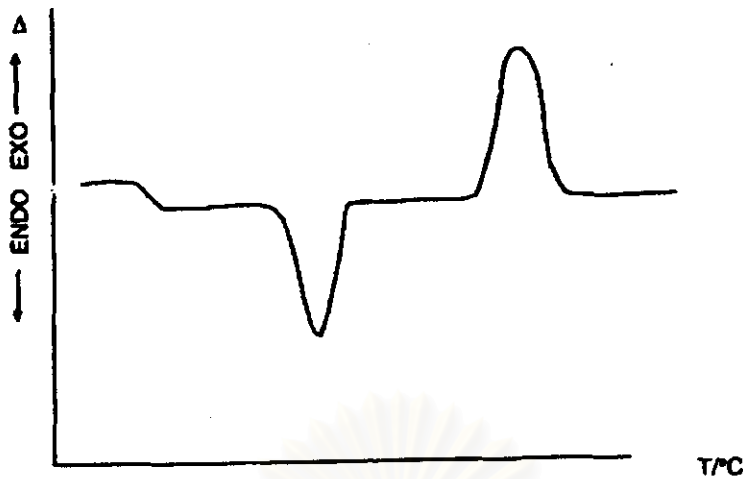
### **ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์<sup>(31)</sup>**

เป็นวิธีการวัดความแตกต่างของการถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอาศัยเครื่องเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ : differential scanning calorimetry (DSC) ระหว่างตัวอย่าง (sample) และวัตถุอ้างอิง (reference) ที่วางอยู่คนละภาชนะเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิหากว่าอุณหภูมิของตัวอย่างถูกกำหนดไว้ ซึ่งในทางปฏิบัติ แต่ละภาชนะจะได้รับความร้อนเป็นปริมาณเท่าๆกัน

เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ power-compensated DSC โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างและวัตถุอ้างอิงโดยใช้เครื่องทำความร้อนที่แยกจากกันคนละตัว และพยายามทำให้อุณหภูมิของทั้งคู่เท่ากันตลอด หากอุณหภูมิของทั้งคู่เริ่มที่จะแตกต่างกันตลอด เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ ก็จะพยายามทำให้อุณหภูมิของทั้งคู่เท่ากันโดยเพิ่มกระแสไฟฟ้าไปยังเครื่องทำความร้อน พลังงานไฟฟ้าที่ให้ก็จะเท่ากับความแตกต่างของการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างตัวอย่างและวัตถุอ้างอิง

heat-flux DSC ต่างจาก power-compensated DSC ตรงที่เครื่องทำความร้อนที่ให้ความร้อนกับตัวอย่างและวัตถุอ้างอิงเป็นตัวเดียวกันและให้ความร้อนกับทั้งคู่เป็นปริมาณเท่ากัน ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) จะวัดค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างและวัตถุอ้างอิงไว้

เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ จะแสดงผลในรูปของกราฟที่มีระดับพลังงานที่แตกต่างกันของตัวอย่างและวัตถุอ้างอิง ( $\Delta P$ ) เป็นค่าในแกนตั้งและมีอุณหภูมิหรือเวลาเป็นค่าในแกนนอน โดยกำหนดให้ปฏิกิริยาคูดความร้อนมีลักษณะเป็นยอดแหลมที่โค้งลง (downward peak) และให้ปฏิกิริยาคายความร้อนมีลักษณะเป็นยอดแหลมที่โค้งขึ้น (upward peak) รูปที่ 14



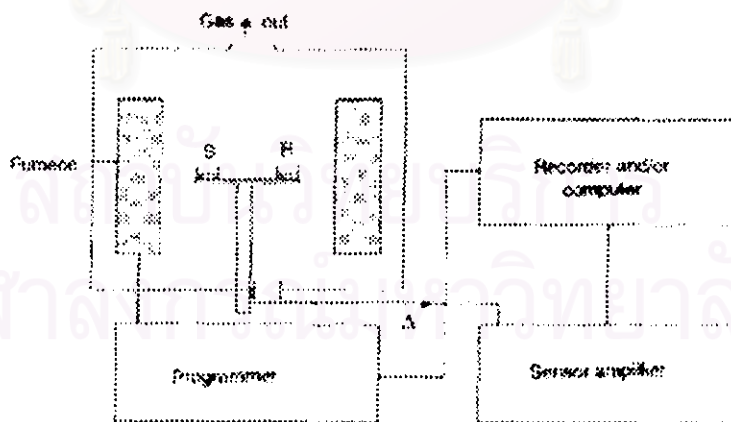
รูปที่ 14 จะแสดงผลในรูป  
ของกราฟที่มีระดับ  
พลังงานที่แตกต่างกันของ  
ตัวอย่างและวัตถุอ้างอิง  
( $\Delta P$ )เป็นค่าในแกนตั้งและ  
มีอุณหภูมิหรือเวลาเป็นค่า  
ในแกนนอน

(ที่มา Haines, P. , J. , Thermal method of analysis : Principle, Applications & Problem, 1995)

### ส่วนประกอบของเครื่องมือ

ประกอบด้วย รูปที่ 15

1. ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) พร้อมด้วยเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier)
2. ตู้อบ (Furnace) พร้อมเครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor)
3. เครื่องวิเคราะห์ (Programmer or Computer)
4. เครื่องบันทึกข้อมูล (Recorder) , เครื่องวาดกราฟ (Plotter) หรือ อุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition Device)



รูปที่ 15 แสดงลักษณะของเครื่อง DSC ,  $\Delta$  แสดงถึงระดับสัญญาณที่ต่างกัน

(ที่มา Haines, P. , J. , Thermal method of analysis : Principle, Applications & Problem, 1995)

## **ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor)**

นิยมใช้คู่ควบทางอุณหภูมิ (thermocouple) เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ ดังรูปที่ 3.3 ในช่วงอุณหภูมิต่ำมักใช้คู่ควบชนิดทองแดง-คอนสแตนแตน (copper-constantan) หรือ โครเมล-อลูเมล (chromel-alumel) ส่วนช่วงอุณหภูมิสูงหรือในสภาพแวดล้อมที่ไม่ดี (aggressive environment) มักใช้คู่ควบชนิดแพลทินัม-แพลทินัมผสมโรเดียมร้อยละ 13 (Pt-Pt/13%Rh)

ภาชนะหรืองานใส่ตัวอย่างอาจใช้วัสดุได้หลายหลากชนิดแต่ส่วนใหญ่นิยมใช้อลูมิเนียม เพราะมักไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่างและช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบก็มักจะอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียม ( 660 องศาเซลเซียส ) แต่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ดีงานใส่ตัวอย่างก็มักจะใช้วัสดุเซรามิกหรือแพลทินัมแทน ในการเลือกใช้วัสดุที่ทำภาชนะหรืองานใส่ตัวอย่างมีข้อควรคำนึงก็คือ ความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของงานและการสัมผัสกันระหว่างงานใส่ตัวอย่างและตัวอย่างหรือวัตถุอ้างอิงก็มีอิทธิพลต่อผลการวิเคราะห์

การทดสอบโดยทั่วไปมักใช้ตัวอย่างประมาณ 10-20 มิลลิกรัม โดยที่ตัวอย่างอาจเป็นผง, แผ่นกลมที่เจาะมาจากฟิล์มโพลีเมอร์ หรือมัดเส้นใย บางครั้งก็อาจต้องใส่แผ่นรองในทับบนตัวอย่างอีกชั้นหนึ่งเพื่อช่วยให้ตัวอย่างสัมผัสกันกับผิวกันงานได้ดีขึ้น

## **คู่อบและชุดควบคุม**

ส่วนมากระบบของเครื่องดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ มักใช้คู่อบที่สูญเสียเงิน เพื่ออาศัยคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีของเงินในการส่งถ่ายความร้อน การส่งถ่ายความร้อนสามารถทำได้ตั้งแต่ 0-100 เคลวินต่อนาที แต่ปกติมักใช้กันที่ 10 เคลวินต่อนาที คุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งก็คือ หากใช้เครื่องดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ก็จะมีอุปกรณ์ทำความเย็นติดไว้ที่ผนังด้านในของเครื่องดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ เพื่อที่จะทำให้ทั้งตู้เย็นโดยการใช้ไนโตรเจนเหลวหรืออื่นๆ

## **คอมพิวเตอร์และตัวแสดงผล**

คอมพิวเตอร์ใช้ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นระดับพลังงานที่แตกต่างกันของตัวอย่างและวัตถุอ้างอิง ( $\Delta P$ ) โดยอาศัยความสามารถที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในการดีฟเฟอเรนเชียล (differentiation) เพื่อให้ได้อุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนแปลง (onset temperature) และโดยการอินทิเกรต (Integration) เพื่อให้ได้พื้นที่ใต้โค้ง

## **วัสดุอ้างอิง**

เนื่องจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ อาศัยการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางความร้อนระหว่างตัวอย่าง (กับภาชนะ) และวัสดุอ้างอิง (กับภาชนะ) โดยพิจารณาทุกๆคุณสมบัติ เช่น การส่งถ่ายความร้อนของตัวอย่างอาจเปลี่ยนแปลงได้หากมีการเปลี่ยนแปลงเฟส, เกิดปฏิกิริยาหรือมีการเปลี่ยนสี ในบางกรณีอาจใช้การเปรียบเทียบ

ตัวอย่างปริมาณน้อยๆกับงานเปล่าๆก็ได้ แต่ถ้าหากนำไปเปรียบเทียบกับวัสดุอ้างอิงเฉื่อย (inert reference materials) ผลที่ได้จะดีกว่า

วัสดุอ้างอิงเฉื่อยที่ให้ผลที่ดี ได้แก่ แคลไซน์ออลูมินา (calcined alumina), อลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) หรืออาจใช้ คาร์บอนดำ หรือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ก็ได้ให้ผลดี

ในบางกรณีที่ต้องการให้สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างตัวอย่างและวัสดุอ้างอิงทำได้ดียิ่งขึ้น ก็อาจใช้ตัวอย่างละลายร่วมลงไปวัสดุอ้างอิง (ต้องมั่นใจว่าตัวอย่างและวัสดุอ้างอิงไม่ทำปฏิกิริยากัน) สารละลายร่วมนี้จะช่วยปรับปรุงเส้นกราฟพื้นฐาน (baseline) และรูปร่างของยอดโค้ง (peak shape)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย