

บทที่ 6

แผนภาพของภาค

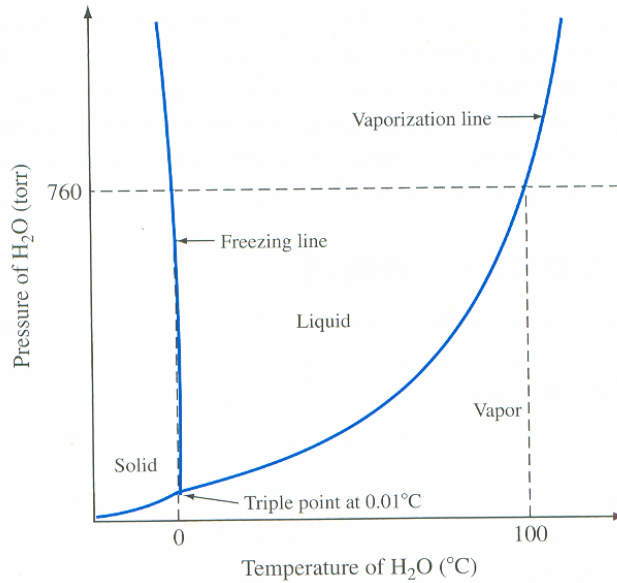
ภาค (Phase) หมายถึง ส่วนของสารที่แตกต่าง ซึ่งอาจเป็นความแตกต่างของโครงสร้างหรือส่วนผสมหรือทั้งสองอย่าง เพื่อที่สามารถบรรยายถึงโครงสร้างของวัสดุได้เต็มที่ เราจึงเขียนแผนภาพที่แสดงว่าเฟสอะไรบ้างในวัสดุซึ่งแปรตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความดัน และส่วนผสมทั้งหมดสำหรับวัสดุตั้งแต่ละเฟสอยู่ในสภาวะสมดุลย์กับรอบๆ ตัวมัน แผนภาพเช่นนี้เรียกว่า Phase Diagram

6.1 แผนภาพของภาคธาตุบริสุทธิ์

(Phase Diagram of Pure Substances)

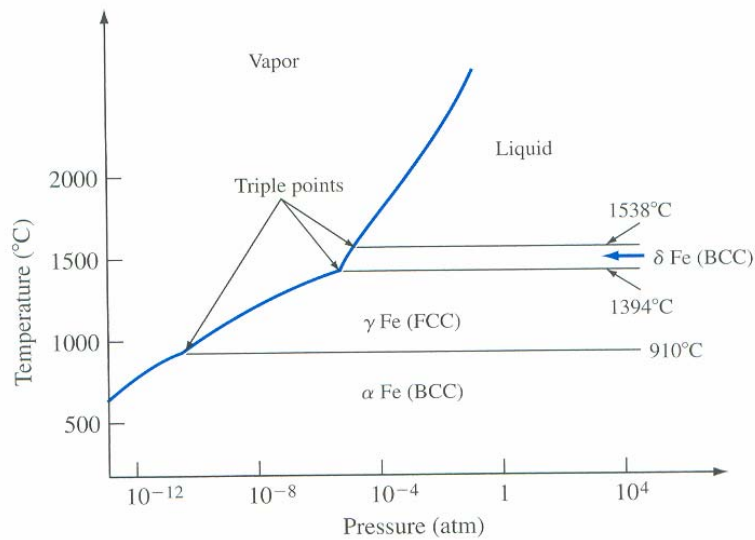
สำหรับธาตุบริสุทธิ์นั้นเช่น น้ำ สามารถที่จะมีสภาวะเป็นได้ทั้งสอง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดัน ซึ่งสารบริสุทธิ์นี้ยังสามารถที่จะมีสภาวะที่จะเป็น 2 เฟส และ 3 เฟสได้ ในสภาวะที่อุณหภูมิ และความดันที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น กรณีที่เป็น 2 เฟสก็คือ น้ำและน้ำแข็งที่อยู่ในแก้วน้ำ จะเห็นได้ว่าจะมีเฟสที่เป็นนของแข็ง และของเหลวซึ่งทั้งสองเฟสก็แยกออกจากกัน โดยขอบของเฟสซึ่งก็คือผิวของก้อนน้ำแข็งนั่นเอง อีกตัวอย่างหนึ่งกรณีที่เป็น 2 เฟสก็คือ ช่วงที่น้ำกำลังเดือด น้ำที่อยู่ในสภาวะของเหลว และไอน้ำก็จะแยกออกจากกัน สำหรับเฟสต่างของน้ำที่อุณหภูมิและความดันคงต่าง ๆ กัน ซึ่งแสดงในภาพที่ 6.1

ในแผนภูมิของภาคความดัน-อุณหภูมิ (Pressure – temperature (PT) phase diagram) ของน้ำที่แสดงดังภาพที่ 6.1 จะเห็นว่าจะมีจุด ๆ หนึ่งที่มีทั้ง 3 เฟสซึ่งเป็นการเกิด 3 เฟส อยู่ด้วยกันในสภาวะที่สมดุลย์ได้ที่อุณหภูมิจำเพาะ และความดันจำเพาะเท่านั้น ค่าเฉพาะเหล่านี้ของอุณหภูมิและความดันทำให้เกิดจุดเดี่ยวนบนแผนผังเรียกว่า trip point



ภาพที่ 6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดัน-อุณหภูมิของน้ำ

สำหรับเหล็กบริสุทธิ์ แสดงดังภาพที่ 6.2 จะมีเส้นแบ่งระหว่างเฟสของเหลวของแข็งนี้ บริเวณที่แสดงให้เห็นว่าเป็นของแข็งแบ่งออกเป็น 3 เขตด้วยกันคือที่อุณหภูมิ 13946 °C จะมีของแข็ง 3 เฟสซึ่งมีโครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกันอยู่คือเป็นเหล็กแอลฟา (α -Fe) เหล็กแกมมา (γ -Fe) และเหล็กเดลต้า (δ -Fe) ซึ่งเหล็กแอลฟาว่า และเหล็กเดลต้ามีโครงสร้างผลึกเป็น BCC ในขณะที่เหล็กแกมมามีโครงสร้างเป็น FCC ดังนั้นจากภาพที่ 6.2 จะมีจุด triple point ทั้งหมด 3 จุดคือที่อุณหภูมิ 1538 °C, 1394 °C และที่ 910 °C



ภาพที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดัน-อุณหภูมิของเหล็กบริสุทธิ์

6.2 GIBBS PHASE RULE

จากกฎเกณฑ์ทางเทอร์โมไดนามิกทำให้สามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างเฟส (P) (phase) ที่สามารถมีได้ที่สภาวะสมดุลในระบบ จำนวนที่ต่ำสุดของตัวผสม (C) (component) ซึ่งสามารถทำให้เกิดระบบที่ว่านั้น และระดับของความอิสระ (F) degree of freedom) ความสัมพันธ์ทั้ง 3 อย่างนี้จะเขียนเป็นสมการในรูป

$$P + F = C + 2$$

ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็น Gibbs phase rule ในสมการนี้ระดับความอิสระก็คือ จำนวนตัวแปรอุณหภูมิความดัน และส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงโดยไม่เปลี่ยนจำนวนเฟสในสภาวะสมดุลย์ ถ้าเป็นระบบโลหะส่วนมากความดันจะคงที่ที่ 1 atm จึงเหลือตัวแปรภายนอกเพียงตัวเดียวจะ ได้สมการเป็น

$$P + F = C + 1$$

จากภาพที่ 6.1 ที่เป็นแผนภูมิความดัน-อุณหภูมิของน้ำจะได้ว่าเมื่อพิจารณาจุดที่แสดงแผนผังสมดุลย์ระหว่างเฟส เนื่องจากตัวผสมมีแค่ 1 ตัว จำนวนเฟสเป็น 2 ฉะนั้นระดับความอิสระ (F) จะมีค่าเป็น 1 ซึ่งหมายความว่าเราสามารถกำหนดการเปลี่ยนแปลงเพียงชนิดหน้อยในอุณหภูมิหรือความดันก็ได้ และเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างใดอย่างหนึ่ง ไม่ใช่ทั้งสองอย่างพร้อมกัน สมมุติว่าเราต้องการหาสภาวะที่ของแข็ง ของเหลว และ ไอ อยู่ด้วยกันในภาวะสมดุล จำนวนตัวผสมยังคงเป็น 1 อยู่ จำนวนเฟสคือ 3 ดังนั้นจำนวนระดับความอิสระเป็นศูนย์ เราไม่สามารถเปลี่ยนค่าไปได้เลย และเกิด 3 เฟสอยู่ด้วยกัน

6.3 แผนภาพภาคของระบบ 2 ธาตุ

(Phase Diagram of Binary Systems)

ธาตุบริสุทธิ์คู่หนึ่ง หรือสารประกอบอาจผสมเข้าด้วยกันได้ในจำนวนไม่มีที่สิ้นสุดของอัตราส่วนต่าง ๆ กัน สำหรับแต่ละส่วนผสมตลอดทั้งหมดในสภาวะสมดุลย์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และความดันซึ่งเป็นไปตามกฎของฮัม-รุธเทตดังนี้

1. ขนาดของอะตอมต้องแตกต่างกันไม่เกิน 15%
2. แต่ละอะตอมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากันเอง ซึ่งค่าของอิเล็กโตรเนกาติวิตี
3. แต่ละอะตอมไม่ควรมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเหมือนกัน
4. โครงสร้างผลึกในสารละลายของแข็งควรมีขนาดเท่ากัน

ในระบบสมดุคของธาตุ 2 ธาตุ นั้นมีอยู่ 5 ระนาบดังนี้

1. ระบบสารละลายแข็ง (Solid Solution System) เป็นระบบที่โลหะหรือธาตุทั้งสองต่างผสมและละลายกันได้ทุกสัดส่วนทั้งในสภาพของเหลวและของแข็ง
2. ระบบยูเทคติก (Eutectic system) เป็นระบบที่โลหะหรือธาตุทั้งสองต่างละลายกันได้สัดส่วนในสภาพของเหลว แต่แยกกันอย่างเด็ดขาดในสภาพของแข็ง
3. ระบบผสมระหว่างสารละลายของแข็ง และระบบยูเทคติก เป็นระบบที่โลหะหรือธาตุทั้งสองต่างละลายกันได้ทุกสัดส่วนในสภาพของเหลว และละลายกันได้บ้างในสภาพของแข็ง
4. ระบบที่เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทคติก (Peritectic reaction) เป็นระบบที่โลหะหรือสารทั้งสองละลายเข้าด้วยกันได้ในสภาพของเหลว และแข็งตัวตามปฏิกิริยาเพอริเทคติก
5. สารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic compound) เป็นระบบที่โลหะหรือธาตุทั้งสองละลายเข้ากันได้หมดในสภาพของเหลว และรวมกันเป็นประกอบในสภาพของแข็ง

6.4 ระบบสารละลายของแข็ง

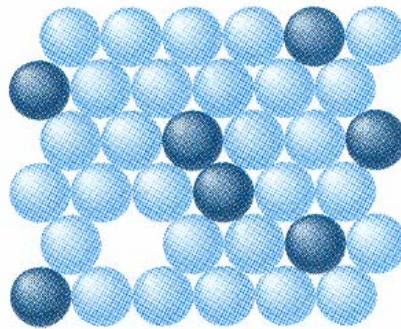
(Solid solution system)

เมื่ออะตอมของธาตุ 2 ชนิดหรือมากกว่ารวมตัวกันกลายเป็นของผสมที่มีเนื้อเดียวกัน และเกิดในสภาวะของแข็งเรียกว่าสารละลายของแข็ง ธาตุที่มีอะตอมอยู่มากเรียกว่าตัวทำละลาย (Solvent) และธาตุที่มีอะตอมน้อยกว่าเรียกว่า ตัวถูกละลาย (Solute)

สารละลายของแข็งเกิดได้ 2 ลักษณะคือ

6.4.1 สารละลายของแข็งโดยการแทนที่ (Substitutional Solid Solution)

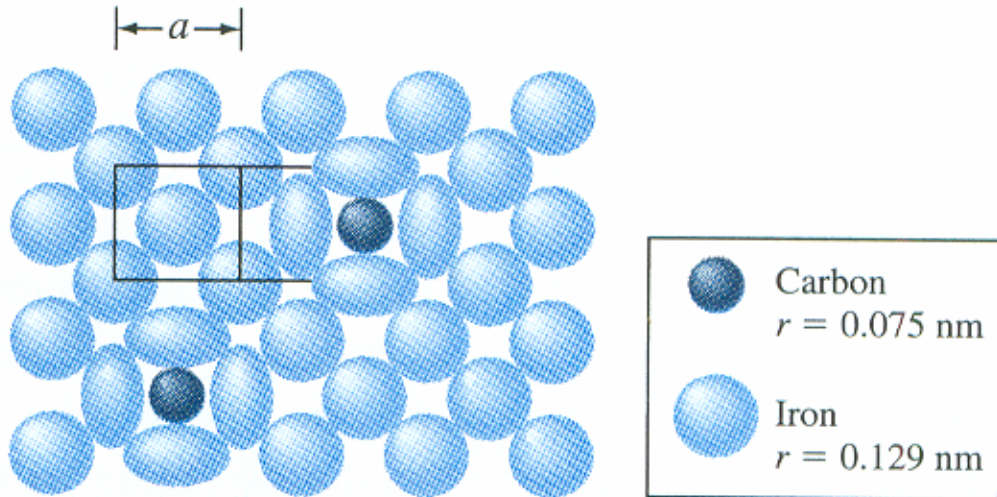
อะตอมตัวถูกละลายจะแทนที่อะตอมตัวทำละลายโดยตรง ดังภาพ แสดงอะตอมของธาตุ 2 ชนิด (Cu และ Ni) โดยอะตอมทองแดงจะเข้าไปแทนที่อะตอมของนิกเกิล



ภาพที่ 6.3 แสดงสารละลายแบบ Substitutional

6.4.2 สารละลายของแข็งโดยการแทรกตัว (Interstitial Solid Solution)

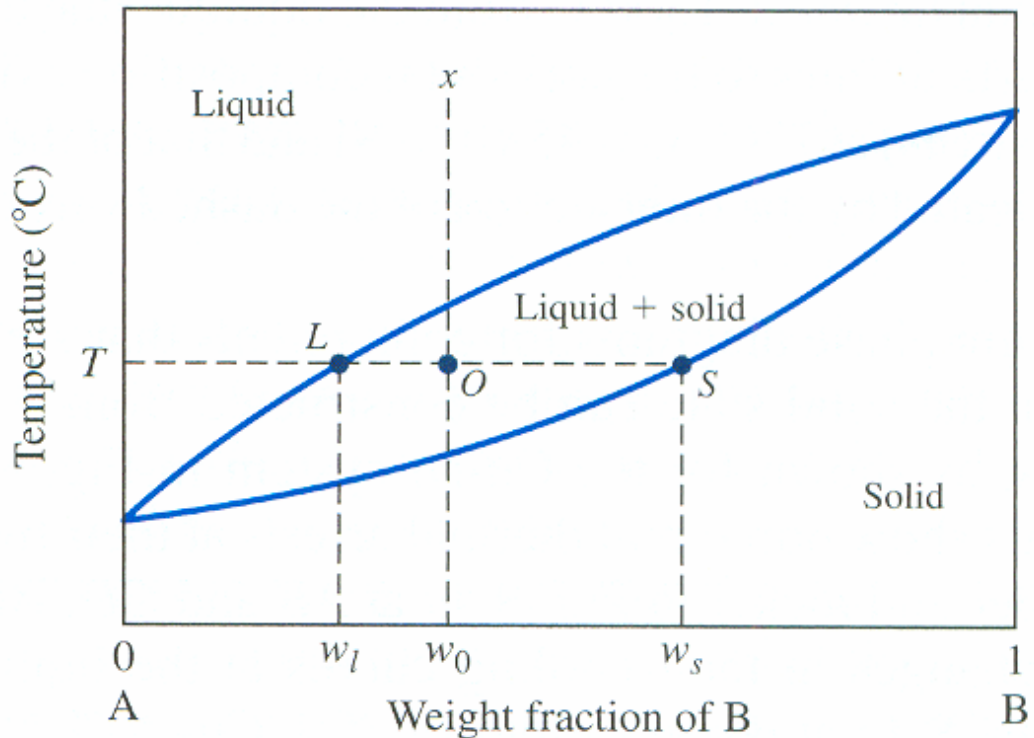
อะตอมตัวถูกละลายจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างระหว่างอะตอมตัวทำละลาย ดังภาพ อะตอมของคาร์บอนแทรกตัวระหว่างอะตอมเหล็ก



ภาพที่ 6.4 แสดงสารละลายแบบ Interstitial

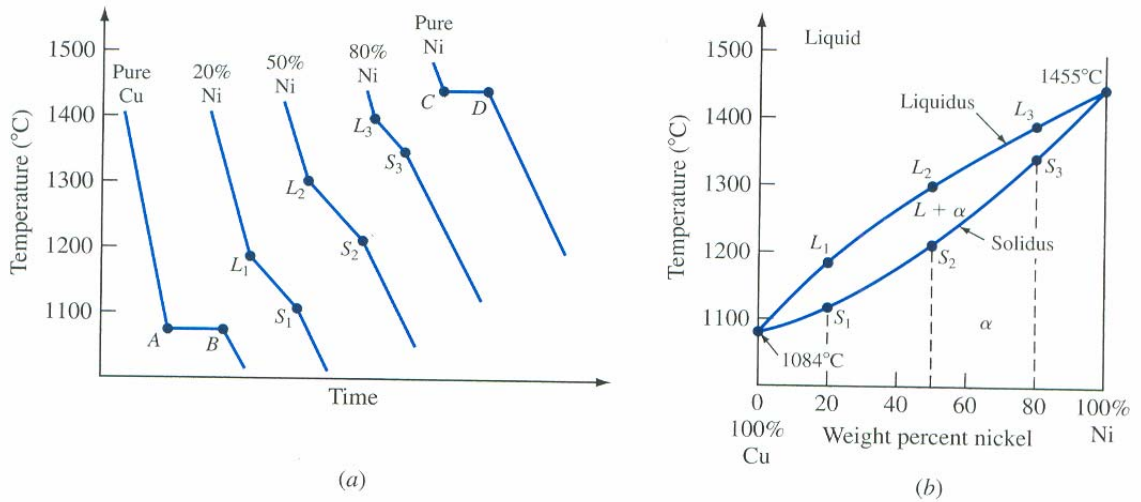
ธาตุต่าง ๆ ที่รวมกันแล้วกลายเป็นสารละลายของแข็งจะมีสัดส่วนที่จำกัด มีบางระบบเท่านั้นที่สามารถเป็นสารละลายของแข็งได้ทุกอัตราส่วนของธาตุที่นำมาผสมกัน เช่น Cu-Ni ปกติแล้วธาตุ Ni จะเข้าไปผสมในสารละลายของแข็งได้เพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้น ทำให้เกิดสารละลายของแข็งครั้งแรก (Primary solid solution) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับโลหะที่เป็นตัวทำละลาย ถ้าหากธาตุ Ni รวมตัวกับ Cu ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น จะเกิดเฟสใหม่ขึ้นมา และมีโครงสร้างแตกต่างจากเดิม เรียกว่าสารละลายของแข็งครั้งที่สอง (Secondary solid solution) ซึ่งถ้าเกิดขึ้นมากสารละลายของแข็งจะมีเนื้อไม่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น

แผนภาพของภาคของระบบสารละลายของแข็งนี้ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของ 2 สารหรือ 2 ธาตุ สมมุติ (A และ B) และอุณหภูมิ เมื่อความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ และจะอาศัยข้อมูลจากแผนภาพการเย็นตัวในการตกผลึกมาช่วย จากรูปที่ 7.4 เป็นรูปแสดงให้เห็นแผนภาพการเย็นตัวของโลหะผสม A และ B ซึ่งโลหะ A และ B เป็นโลหะ 2 ชนิดที่เกิดเป็นสารละลายของแข็ง ซึ่งเริ่มจาก A = 100% ที่อยู่ทางซ้ายมือไปยังทางขวามือจนกระทั่ง A = 0% โดย B จะเป็นสัดส่วนกันจาก B = 0% ทางซ้ายมือไปขวามือจนกระทั่ง B = 100%



ภาพที่ 6.5 แสดงแผนภาพการเย็นตัวของโลหะผสมระหว่าง A และ B

พิจารณาที่โลหะบริสุทธิ์ (คือที่ $A = 100\%$ หรือที่ $B = 100\%$) โดยที่ T_A และ T_B เป็นอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของโลหะ A และ B ตามลำดับ โลหะบริสุทธิ์จะตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ และใช้เวลาหนึ่งในการตกผลึก จากนั้นอุณหภูมิจึงสามารถลดลงเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง แต่เนื่องจากจุดหลอมเหลวของโลหะ A และ B ต่างกัน ดังนั้นสัดส่วนของโลหะผสมใด ๆ เมื่อลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิหนึ่งโลหะก็เริ่มตกผลึกออกมา และถ้าลดอุณหภูมิลงเรื่อย ๆ ของเหลวก็จะกลายเป็นของแข็งทั้งหมดแล้วจากนั้นก็จะได้โลหะผสมตามสัดส่วนที่กำหนด ยกตัวอย่างเช่น จากส่วนผสมโลหะ $A = 80\%$, $B = 20\%$ เมื่อลดอุณหภูมิลงมาถึง T_1 จะมีโลหะบางส่วนตกผลึกออกมา และจะตกผลึกออกมามากขึ้นเรื่อย ๆ และตกผลึกหมดที่อุณหภูมิ T_2 จากนั้นก็ลดลงต่อไปจนถึงอุณหภูมิกปกติ จะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะสังเกตโลหะที่สัดส่วนผสมใด ๆ ก็ได้ในลักษณะผสมคล้าย ๆ กัน ดังนั้นจึงสามารถต่อโยงสจุดที่ของเหลวของโลหะผสมทุกสัดส่วนเริ่มกลายเป็นน้ำของแข็งทั้งหมดก็จะได้เส้นของแข็ง (Solidus line) ดังนั้นถ้าลากเส้นพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแกนตั้ง และสัดส่วนของส่วนผสมในแกนนอน ก็จะได้แผนภาพสมดุลของภาคของระบบสารละลายของแข็งดังแสดงดังภาพที่ 6.5



ภาพที่ 6.6 แสดงระบบสมดุลแบบสารละลายของแข็ง

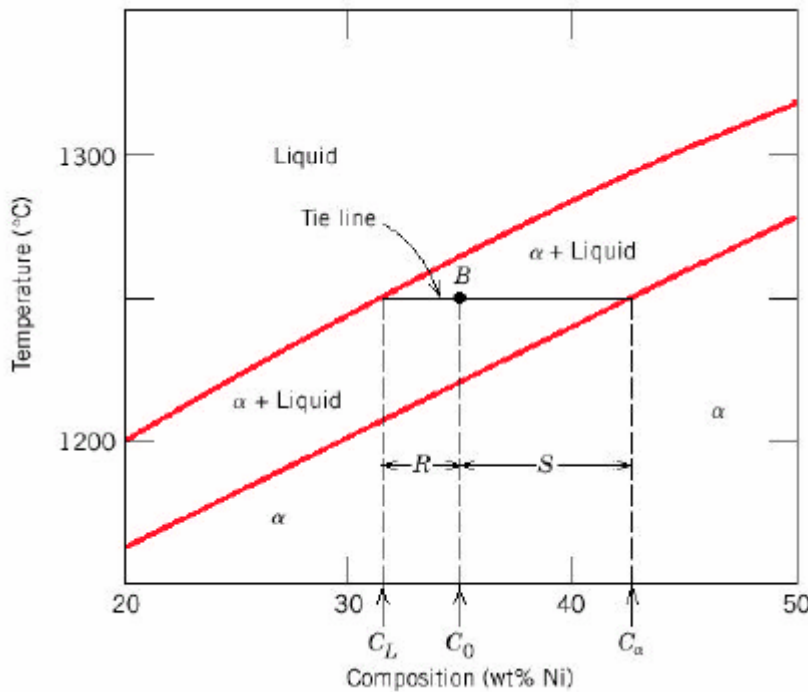
ภาพที่ 6.6 แสดงแผนผังของการละลายของแข็งระหว่างโลหะ A และ B ซึ่งละลายซึ่งกันและกันได้หมด แผนผังประกอบด้วยบริเวณของเหลวเฟสเดียว บริเวณของแข็งเฟสเดียว และบริเวณสองเฟสคือ ของแข็ง + ของเหลว และเส้นโค้งอุณหภูมิ-ส่วนผสมสำหรับบริเวณ 2 เฟส

เนื่องจาก solidus และ liquidus เป็นเส้นโค้งของอุณหภูมิ-ส่วนผสมสำหรับ 2 เฟส ในภาวะสมดุล ดังนั้นที่ปลายของเส้นลากในแนวระดับที่ต่อ solidus และ liquidus นี้จะแทนส่วนผสมของเฟสทั้งสองที่อุณหภูมินี้ เส้นแนวระดับที่อยู่ระหว่างเฟสทั้งสองนี้เรียกว่า tielines ดังนั้นเราจึงสามารถหาโลหะผสมที่ส่วนผสม C_0 ในแผนผังสมดุล ถ้าโลหะผสมอยู่ในภาวะสมดุลที่อุณหภูมิตั้งจุด a มันก็จะเป็นของเหลวหนึ่งเฟสที่ส่วนผสม C_0 ถ้าทำให้เย็นลงช้า ๆ จนถึงจุด b ของแข็งจะเริ่มเกิดขึ้นจำนวนส่วนผสม C_{s1} ทำให้เย็นลงต่อไป (ช้า ๆ เพื่อรักษาภาวะสมดุลไว้) ปริมาณเฉลี่ยส่วนผสมของแข็งจะเป็นไปตามเส้น solidus และปริมาณเฉลี่ยส่วนผสมของของเหลวจะเป็นไปตามเส้น liquidus จนกระทั่งถึงอุณหภูมิตั้งจุด c ซึ่งวัสดุจะประกอบด้วยของแข็งในส่วนผสม C ในภาวะสมดุลกับของเหลวในส่วนผสม C และถ้าทำให้เย็นลงต่อไปจนถึงต่อไปจนถึง d ส่วนที่เหลือเป็นของเหลว C_{f1} และส่วนที่เป็นของแข็งจะมีปริมาณเท่ากับส่วนผสมของโลหะผสม ที่อุณหภูมิตั้งจุดใด ๆ ที่ต่ำกว่าจุด d วัสดุจะเป็นของแข็งทั้งหมด โดยมีส่วนผสมในโลหะผสมเป็น C_0

7.5 ปริมาณสัมพันธ์ของเฟส

(Relative Amounts of Phases)

แผนผังสมดุลของภาคนอกจากจะกำหนดจำนวนเฟสที่เกิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ และส่วนผสมแล้ว ยังช่วยให้เราสามารถคำนวณหาปริมาณสัมพันธ์ของแต่ละเฟสที่อุณหภูมินั้น

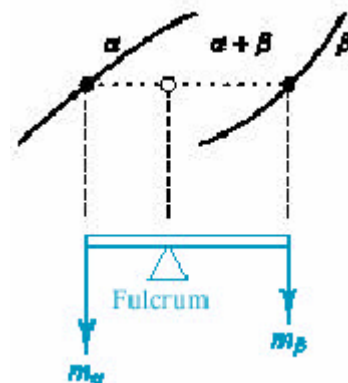


ภาพที่ 6.7 แสดงการเขียน tie line

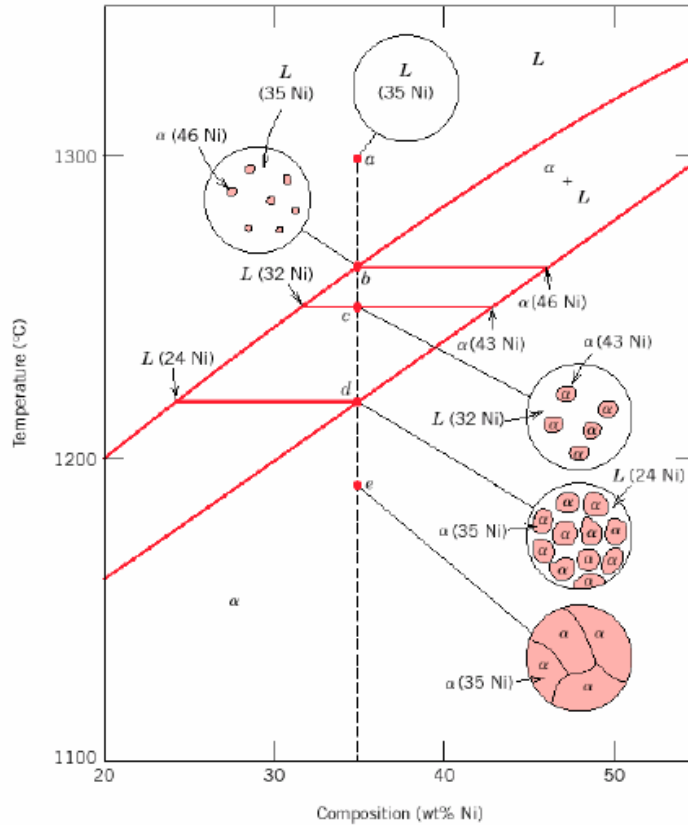
เรามาศึกษาวัสดุส่วนผสม \$C_0\$ ในรูปที่ 6.6 อีกครั้งหนึ่ง ที่อุณหภูมิจุด c จะมีเฟสของส่วนผสม \$C_L\$ และ \$C_s\$ ในภาวะสมดุล จำนวนอะตอมของตัวผสม B ในส่วนผสมเริ่มต้นคือผลรวมของอะตอม B ในเฟสของแข็งกับของอะตอม B ในเฟสของเหลว โดยหลักการสมดุลของมวลถ้าให้ \$X_s\$ เป็นอัตราส่วนของวัสดุในเฟสของแข็ง และ \$X_l\$ เป็นอัตราส่วนของวัสดุในเฟสของเหลว เราจะได้

$$X_s = \frac{C_0 - C_l}{C_s - C_l}$$

$$X_l = \frac{C_0 - C_0}{C_s - C_l}$$



ความสัมพันธ์นี้ใช้ได้ในพื้นที่ที่มีสองเฟสของแผนผังสมดุลไบนารีและเรียกว่า Lever Rule ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังภาพที่ 6.8



ภาพที่ 6.8 แสดงส่วนผสมเฟส ณ จุดต่างๆ ของ Cu - Ni

6.6 ระบบยูเทกติก

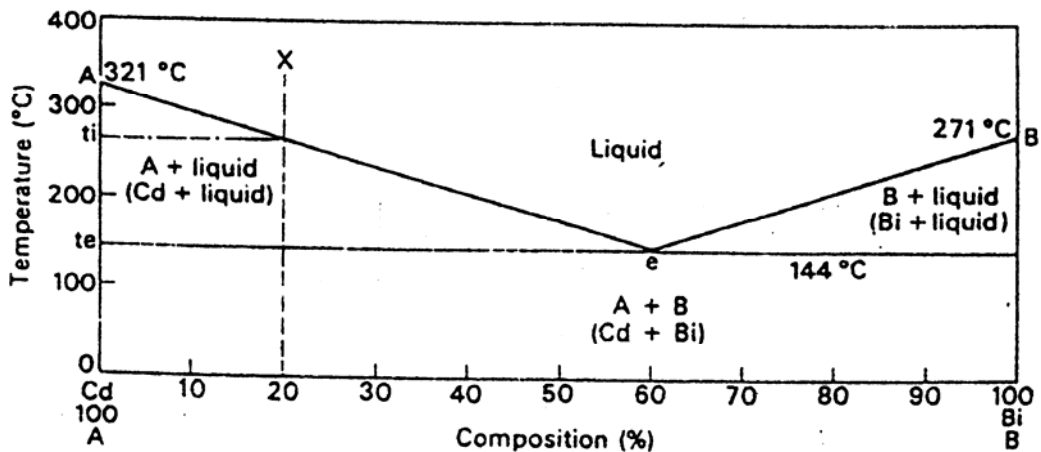
(Binary Eutectic Alloy System)

เป็นระบบที่โลหะหรือธาตุทั้งสองต่างละลายกันได้ทุกสัดส่วนในสภาพของเหลว แต่จะแยกกันอย่างเด็ดขาดในสภาพของแข็ง สารผสมจะอยู่ในระบบยูเทกติก Cooling curve ของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมที่มีโลหะบริสุทธิ์อีกชนิดหนึ่งเข้าไป ถ้ามีปริมาณ B เข้าไปผสมจะทำให้จุดแข็งตัวต่ำลง และจะต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณ B เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่ต่ำที่สุดที่เรียกว่าจุดยูเทกติก (Eutectic point) เมื่อเพิ่ม B มากขึ้นค่าของจุดแข็งตัวจะสูงขึ้นไปอีก สารผสมที่จุดยูเทกติกนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนธาตุหรือโลหะบริสุทธิ์ในด้านการแข็งตัว

คือ แฉ่งตัวที่อุณหภูมิคงที่ โลหะทั้งสองชนิดจะเกิดโครงสร้างสลับกับของเนื้อโลหะระหว่าง A และ B เรียกว่าโครงสร้างยูเทกติก แสดงดังภาพที่ 6.9

ภาพที่ 6.9 แสดงถึงแผนภาพสมดุลโลหะผสมระหว่างบิสมัทกับแคดเมียม ซึ่งเราจะเห็นว่าแผนภาพภาคสมดุลของระบบนี้แบ่งออกเป็น 4 สนามภาค (Phase field) คือ ภาคของเหลว, (ภาคของเหลว + ภาคของแฉ่ง A), (ภาคของเหลว + ภาคของแฉ่ง B) และ (ภาคของแฉ่ง A + ภาคของแฉ่ง B)

โดยทฤษฎีแล้วในระบบ Bi-Cd ธาตุทั้งสองละลายกันได้บ้างแต่น้อยมากจนถึงถือว่าไม่ละลายซึ่งกันและกัน



ภาพที่ 6.9 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะผสมระหว่าง Bi และ Cd

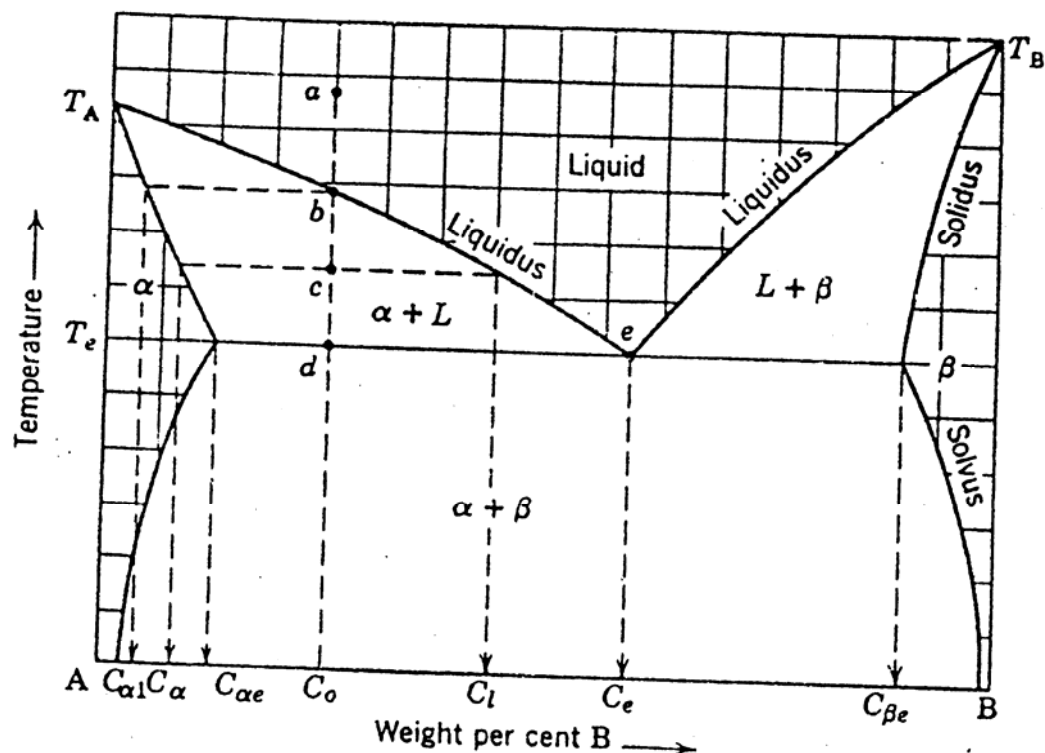
พิจารณาอุณหภูมิที่มีส่วนผสม X ในสภาพของเหลว เมื่อลดอุณหภูมิจนถึง t_i ตัดเส้น Liquidus โลหะแคดเมียมบริสุทธิ์จะตกผลึก ในขณะที่ของเหลวที่เหลือจะมีส่วนผสมของแคดเมียม และบิสมัทตามแนวเส้น Liquidus ไปจนถึงจุด e (อุณหภูมิ t_e) โครงสร้างประกอบไปด้วยผลึกของโลหะแคดเมียมและของเหลวที่มีส่วนผสม e ของเหลวส่วนที่เหลือนี้จะแข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่แล้วมีโครงสร้างสลับกันระหว่างโลหะแคดเมียม และโลหะบิสมัท ดังนั้นจึงมีโครงสร้างสุดท้ายเป็นโลหะแคดเมียมและยูเทกติก

ในการทำงานเดียวกันถ้าพิจารณาที่มีส่วนผสมที่มีบิสมัทมากกว่ายูเทกติก โครงสร้างก็จะประกอบไปด้วยผลึกของโลหะบิสมัท และโครงสร้างยูเทกติก

ในระบบของโลหะผสม Cd-Bi ส่วนผสมของยูเทกติกคือ Cd = 40% และ Bi = 60% การหาปริมาณภาพสัมพันธ์ ก็ใช้กฎของคาน (Lever arm rule) หาปริมาณของของเหลวและปริมาณของของแข็ง

6.7 ระบบผสมระหว่างระบบสารละลายของแข็งกับระบบยูเทกติก

ระบบนี้เป็นระบบที่ธาตุ 2 ธาตุ หรือสาร 2 ชนิดละลายกันได้หมดในสภาพของเหลวแต่จะละลายได้เพียงบางส่วนเมื่อกลายสภาพเป็นของแข็ง แผนภาพสมดุลภาคของระบบนี้แสดงดังภาพที่ 6.10 ซึ่งเป็นแผนภาพสมดุลระหว่าง โลหะ A และโลหะ B จะเห็นว่าในระบบนี้มี 6 สนามภาคด้วยกัน คือ ประกอบด้วยภาคของเหลว, (ภาคของแข็ง α + ของเหลว), ภาคของแข็ง β + ของเหลว), ภาคของแข็ง α , ภาคของแข็ง β , และ (ภาคของแข็ง ($\alpha + \beta$)) โดยปกติภาคของแข็ง α หมายความว่า ภาค A ที่มี B ละลายอยู่บ้าง และ β เป็นภาค B ที่มี A ละลายอยู่บ้าง



ภาพที่ 6.10 แสดงแผนผังสมดุลแบบ Hypothetical binary สำหรับ ธาตุ A และ B ซึ่งละลายในกันและกันได้ทุกส่วน

พิจารณาโลหะผสมที่ C_0 ซึ่งเป็นของเหลวเฟสเดียวที่จุด a เมื่อทำให้เย็นลงจุด b ส่วนผสมของของแข็งที่เกิดขึ้นทราบได้โดยอาศัยเส้นแบ่งเขตของบริเวณ 2 เฟส คือ C เมื่อทำให้เย็นต่อไปจนถึงจุด c ก็จะมีเฟสของแข็งที่ส่วนผสม C และเฟสของเหลวที่ส่วนผสม C_1 ที่สภาวะสมดุลย์ในกรณีของแผนผังของสารละลายแข็งประมาณสัมพันธ์ของเฟสทั้งสองในสภาวะสมดุลย์อาจคำนวณได้โดยใช้ Lever arm rule ที่จุด c

$$\text{ส่วนที่เป็น เฟส } \alpha = \frac{(C_l - C_0)}{(C_l - C_\alpha)}$$

$$\text{ส่วนที่เป็นเฟสของเหลว} = \frac{(C_0 - C_\alpha)}{(C_l - C_\alpha)}$$

ความจริงแล้วบริเวณสองเฟสข้างบนในภาพที่ 6.10 คือ $(\alpha + \beta)$ และ $(L + \beta)$ สามารถพิจารณาเสมือนหนึ่งแผนผังของสารละลายของแข็งคู่หนึ่งได้ คืออันหนึ่งเป็นการละลายของ A ใน B และอีกอันหนึ่งเป็นการละลายของ B ใน A

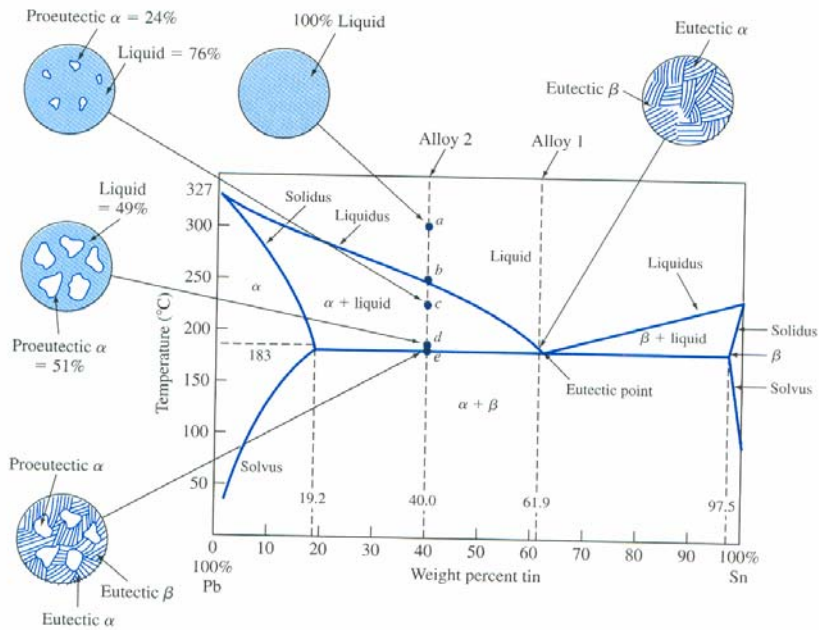
ถ้าวัสดุถูกทำให้เย็นลงต่อไปจนต่ำกว่าจุด c ก็จะเกิดของแข็งมากขึ้น และส่วนผสมของของเหลวก็จะเป็นไปตามเส้น Liquidus จนถึงจุด c ซึ่งเรียกว่าจุดยูเทคติก (Eutectic point) และของเหลวยูเทคติกที่ส่วนผสม C_e ก็จะแข็งตัวไปเรื่อย ๆ ที่อุณหภูมิคงที่ซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิยูเทคติก ; T_e การเปลี่ยนเฟสเช่นนี้เรียกว่าปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic reaction) ซึ่งเป็นระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนได้ เนื่องจากมี 3 เฟสอยู่ในสภาวะสมดุลย์ในระหว่างการแข็งตัวของของเหลวยูเทคติก ไม่มีระดับของความอิสระอุณหภูมิส่วนผสมของของเหลว และส่วนผสมของเฟสของของแข็งทั้งสองตายตัวหมดไม่สามารถแปรเปลี่ยนได้

ปฏิกิริยายูเทคติกในระบบนี้ แสดงสมการ

Liquid Solid A + Solid B หรือ

Liquid α + β

เมื่อของเหลวยูเทคติกได้แข็งตัวหมดแล้ว อุณหภูมิจึงเริ่มลดลง อาจเห็นดัง 4kr ที่ 6.10 ว่าการละลายตัวของ B ใน A (และของ A ใน B) ลดลงเมื่อลดอุณหภูมิต่ำกว่า T_e และ B ที่เกินไปก็จะตกตะกอนออกมาเมื่อทำให้เย็นลง และส่วนผสมก็จะเป็นไปตามเส้น Solvus หรือเส้นการละลายสูงสุดอะตอมของ B ที่เกินไปก็จะไม่ละลายใน α อีกต่อไป ที่อุณหภูมิต่ำกว่าก็จะไม่ละลายออกมาเป็นอะตอม B บริสุทธิ์ เพราะตามที่เราเห็นในรูป A สามารถละลายใน B ได้เช่นกัน ดังนั้นตะกอนของ B ที่ออกมาก็จะเป็นรูปแบบของ β



ภาพที่ 6.11 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่ว ตัวอย่างที่ 2

ให้วิเคราะห์เฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ ต่อไปนี้ของโลหะผสมระหว่างดีบุก-ตะกั่ว ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6.11

- (a) ที่ Eutectic composition ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 183 °C (eutectic temperature)
- (b) ที่จุด c ที่ 40 % Sn และ 230 °C
- (c) ที่จุด d ที่ 40 % Sn และ 183 °C + ΔT
- (d) ที่จุด e ที่ 40 % Sn และ 183 °C + ΔT

(a) ที่ Eutectic composition ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 183 °C

Phase present :	alpha	beta
Compositions of		
Phases :	19.2%Sn in	97.5%Sn in
	Alpha phase	beta phase
Amount of	$\frac{97.5 - 61.5}{97.5 - 19.2} \times 100$	$\frac{61.9 - 19.2}{97.5 - 19.2} \times 100$
Phase :	= 45.5%	= 54.5%

(b) ที่จุด c ที่ 40 % Sn และ 230 °C

Phase present :	liquid	alpha
Compositions of	48%Sn in	15%Sn in
Phases :	liquid phase	alpha phase
Amount of	$\frac{40 - 15}{48 - 15} \times 100$	$\frac{48 - 40}{48 - 15} \times 100$
Phase :	= 76%	= 24%

(c) ที่จุด d ที่ 40 % Sn และอุณหภูมิ 183 °C + T

Phase present :	liquid	alpha
Compositions of	61.9%Sn in	19.2%Sn in
Phases :	liquid phase	alpha phase
Amount of	$\frac{40 - 19.2}{61.9 - 19.2} \times 100$	$\frac{61.9 - 40}{61.9 - 19.2} \times 100$
Phase :	= 49%	= 51%

(d) ที่จุด e ที่ 40 % Sn และ 230 °C - T

Phase present :	liquid	beta
Compositions of	19.2%Sn in	97.5%Sn in
Phases :	alpha phase	beta phase
Amount of	$\frac{97.5 - 40}{97.5 - 19.2} \times 100$	$\frac{40 - 19.2}{97.5 - 19.2} \times 100$
Phase :	= 73%	= 27%

6.8 ระบบเพอริเทกติก

(Peritectic)

เป็นระบบที่โลหะที่ผสมกัน 2 ชนิดสามารถละลายได้ดีในสภาพหลอมเหลว แต่จะละลายได้บางส่วนในสภาพของแข็ง และให้ปฏิกิริยาเพอริเทกติก

ในความหมายของเพอริเทกติก เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการรวมตัวของโลหะผสมหลอมเหลวที่มีส่วนผสมแน่นอน กับสารละลายของแข็งที่มีส่วนผสมแน่นอนจำนวนหนึ่ง ได้สารละลายของแข็งที่ส่วนผสมแตกต่างจากทั้งโลหะผสมหลอมเหลว และสารละลายของแข็ง เข้าทำปฏิกิริยากับโลหะผสมหลอมเหลว ดังปฏิกิริยา



การเกิดปฏิกิริยาเพอริเทกติกจะเกิดที่อุณหภูมิคงที่ t_p ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะใช้เวลา นานมาก เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุล เพราะโลหะหลอมเหลวที่จะทำปฏิกิริยากับสารละลายของแข็ง S_1 จะเกิด S_2 ได้แต่เฉพาะบริเวณผิวของ S_1 เป็นส่วนใหญ่ กว่าที่ได้จะได้ S_2 หมดจะต้องใช้เวลายาวนาน เพราะจะต้องมีอะตอมของธาตุผสมใน S_1 แพร่ซึมออกมาเพื่อปรับส่วนผสมให้เป็นส่วนผสมใหม่ใน S_2 ซึ่งในทางปฏิบัติแทบจะกล่าวได้ว่า โอกาสที่จะให้ปฏิกิริยาเพอริเทกติกเกิดได้ในสภาวะสมดุลเป็นไปได้ยาก ดังนั้นโครงสร้างของโลหะผสมที่ให้ปฏิกิริยาเพอริเทกติก จะปรากฏลักษณะของโครงสร้างหนึ่งห่อหุ้มอีกโครงสร้างหรือเฟสหนึ่งอย่างชัดเจน เช่น ในที่นี้จะพบว่า S_2 จะอยู่รอบ ๆ เกรนของ S_1 ทำให้ได้ชื่อว่าโครงสร้างเพอริเทกติก

ลักษณะของแผนภูมิสมดุลของโลหะ A และโลหะ B ทำให้ปฏิกิริยาเพอริเทกติก จะปรากฏดังภาพที่ 6.12 อุณหภูมิ t_p คือ อุณหภูมิเพอริเทกติก และจุด d เป็นจุดโลหะผสมเพอริเทกติก

ภาพที่ 6.12 แผนภาพสมดุลของโลหะ Liquidus คือเส้น AeB ถ้าโลหะผสมมีอุณหภูมิอยู่เหนือเส้นนี้จะมีสภาวะเป็นโลหะผสมหลอมเหลว

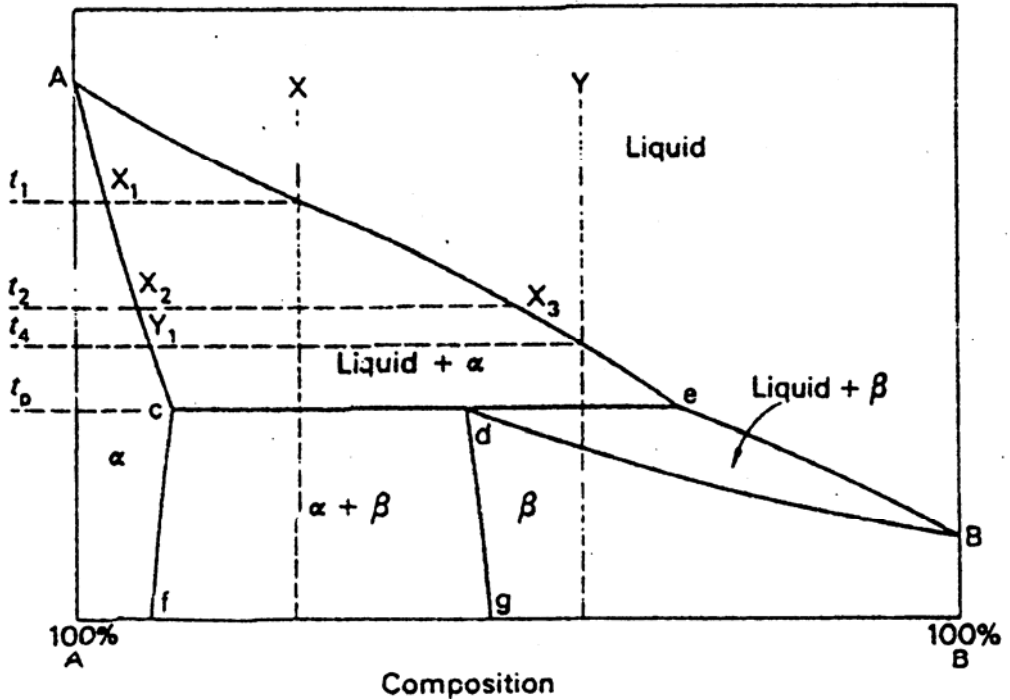
พื้นที่ Ace เป็นอาณาเขตเฟส โลหะผสมหลอมเหลว (Liquid) กับเฟสสารละลายของแข็ง

พื้นที่ Bde เป็นอาณาเขตเฟส โลหะผสมหลอมเหลว กับเฟสสารละลายของแข็ง

พื้นที่ทางด้านติดกับแกนตั้งของอุณหภูมิ กับโลหะบริสุทธิ์ A จะเป็นอาณาเขตของสารละลายของแข็ง

พื้นที่ทางด้านขวามือ Bdg เป็นอาณาเขตของสารละลายของแข็ง

พื้นที่ $cdgf$ ซึ่งอยู่ใต้เส้นอุณหภูมิ t_p เป็นอาณาเขตของเฟส สารละลายของแข็ง กับ
รวมกัน



ภาพที่ 6.12 ปฏิกริยาเพอริเทกติก

เพื่อความเข้าใจปฏิกริยาเพอริเทกติก ขอยกตัวอย่างโลหะผสม X เพื่อยกการศึกษา
เส้นโลหะผสม X ตัดกับเส้น Liquidus ที่อุณหภูมิ t_1 จะปรากฏนิวเคลียสของเฟสสารละลาย
 α เกิดขึ้น โดยมีส่วนผสม X เมื่ออุณหภูมิลดลงเป็น t_2 เฟส α จะปรับส่วนผสมใหม่ให้เข้าสู่
สภาวะสมดุลย์ โดยเปลี่ยนจาก X_2 และมีเฟสโลหะหลอมเหลวที่ล้อมรอบมีส่วนผสมเป็น X_3 จะ
สังเกตพบว่า ขณะที่อุณหภูมิลดลง เฟส จะเปลี่ยนแปลงส่วนผสม โดยมีปริมาณของโลหะ B
เพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันเฟสโลหะหลอมเหลวจะมีปริมาณของโลหะ B เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน
เมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึง t_p เฟสละลายของแข็ง α จะมีส่วนผสมตรงจุด c และเฟสโลหะ
หลอมเหลวจะมีส่วนผสมตรงจุด c จะเกิดปฏิกริยาเพอริเทกติก โดยเฟส α ทำปฏิกริยากับ
เฟสโลหะหลอมเหลวให้เฟสสารละลาย β จำนวนหนึ่ง และมีเฟสโลหะหลอมเหลวหมดไป
เหลือเฟสสารละลาย α จำนวนหนึ่ง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า t_p โลหะผสมจะเป็นของแข็ง
และมีโครงสร้างประกอบด้วยเฟสสารละลายของแข็ง α กับ β ซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่า t_p จะมี

การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของ α และ β ตามเส้นกราฟ cf และ dg ตามลำดับ แต่ลักษณะโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลง

สมมติว่า โลหะผสมเปลี่ยนจาก X เป็น Y การเย็นตัว และการเกิดปฏิกิริยาเพอริเทกติก จะมีส่วนคล้ายคลึงกัน โดยเริ่มเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวเป็นของแข็ง และให้กำเนิดนิวเคลียสของเฟส ส่วนผสม Y_1 ที่อุณหภูมิลดต่ำลงจะปรากฏเฟสสารละลายของแข็ง α กับเฟสโลหะหลอมเหลว เปลี่ยนแปลงส่วนผสมตามเส้น Ac และ Ae ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึง t_p ก็จะเกิดปฏิกิริยาเพอริเทกติก โดยมีเฟส α ที่ส่วนผสมตรงจุด c ทำปฏิกิริยากับเฟสโลหะหลอมเหลวที่ส่วนผสมตรงจุด e ให้เฟสสารละลายของแข็ง β ที่ส่วนผสมตรงจุด d กับเฟสโลหะหลอมเหลว ซึ่งต่างไปจากกรณีของโลหะผสม X ที่เหลือเฟสสารละลายของแข็ง α

เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า t_p เล็กน้อย หรือปฏิกิริยาเพอริเทกติกสิ้นสุดลง โลหะผสมจะมีโครงสร้างประกอบด้วยเฟสสารละลาย β กับเฟสโลหะหลอมเหลว จะปรากฏว่าเฟสโลหะหลอมเหลวจะลดปริมาณลง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะของแข็ง โดยให้เฟสสารละลายของแข็ง β เพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจาก t_p และสุดท้ายเฟสโลหะหลอมเหลวจะเปลี่ยนเป็นเฟสสารละลายของแข็ง β หมด เมื่อเส้นโลหะผสม Y ติดกับเส้น Solidus หลังจากนั้นจะปรากฏโครงสร้างของโลหะผสมมีเฟสเดียวคือ β เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาจนถึงอุณหภูมิต่ำ

6.9 ระบบสารประกอบระหว่างโลหะ

(Intermetallic Compound)

เป็นระบบที่โลหะ A และโลหะ B สามารถละลายได้ดีในสภาพหลอมเหลว และไม่สามารถละลายได้ในสภาพของแข็ง แต่จะให้สารประกอบเชิงโลหะในฟอร์ม A_xB_y ซึ่งในกรณีนี้แผนภาพสมดุลจะมี 2 ลักษณะขึ้นอยู่กับการละลายของสารประกอบ A_xB_y กล่าวคือ ถ้า A_xB_y คงสภาพอยู่ตลอดในขณะถูกความร้อน โดยไม่มีการแตกตัวหรือเปลี่ยนเฟสไปเป็นอย่างอื่น จนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวจึงจะสลายตัวเป็นโลหะผสมหลอมเหลวเรียกว่าเป็น Congruent สารประกอบลักษณะนี้จะมีสภาพเหมือนโลหะบริสุทธิ์ทุกประการแม้ในขณะที่เย็นตัว เมื่อเปลี่ยนสภาวะจากหลอมเหลวเป็นสารประกอบเชิงโลหะ A_xB_y ก็ยังคงสภาพเป็นสารประกอบ A_xB_y ไปจนถึงอุณหภูมิต่ำ จากสมดุลของโลหะแมกนีเซียม และซิลิกอนที่แสดงจะพบว่า

เมื่อโลหะผสมมีซิลิกอนผสม 37% โดยน้ำหนักจะเป็นส่วนผสมของสารประกอบเชิงโลหะ Mg_2Si และ Si จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แผนภูมิสมดุลงระหว่าง Mg กับ Mg_2Si ซึ่งมีอุณหภูมิยูเทคติกอยู่ที่ $638.8\text{ }^{\circ}C$ และตรงส่วนผสมประมาณ 2% ซิลิกอน

อีกส่วนหนึ่งของแผนภูมิสมดุลงคือ ระหว่าง Mg_2Si กับ Si โดยมีอุณหภูมิยูเทคติกอยู่ที่ $946.7\text{ }^{\circ}C$ ที่ส่วนผสม 56.5% ซิลิกอน

การศึกษาแผนภูมิสมดุลงของโลหะ Mg และ Si หรือระบบที่ใช้ลักษณะของแผนภูมิสมดุลงเช่นนี้คงกระทำอย่างเดียวกับในกรณีโลหะ A และ โลหะ B สามารถละลายได้ดีในสภาพหลอมเหลว แต่ไม่สามารถละลายได้ในสภาพของแข็ง โดยวิธีแบ่งลักษณะการศึกษาตามปริมาณของซิลิกอนในโลหะผสมถ้าน้อยกว่า 37% การศึกษาเรื่องโครงสร้างจะอยู่ในพื้นที่ของแผนภูมิสมดุลง Mg- Mg_2Si ถ้าโลหะผสมมีปริมาณซิลิกอนมากกว่า 37% โครงสร้างจะอยู่ในพื้นที่ของแผนภูมิสมดุลงระหว่าง Mg_2Si -Si กรณีที่สารประกอบ A_xB_y มีการเปลี่ยนสภาวะและแตกตัวก่อนถึงจุดหลอมเหลวเรียกว่าเป็น Non- congruent ลักษณะของแผนภูมิสมดุลงจะเปลี่ยนไปโดยเฉพาะจะให้เกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างออกไป คือจะให้เกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติก และยูเทคติก ตัวอย่างของแผนภูมิสมดุลงจะเปลี่ยนไปโดยเฉพาะจะให้เกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างออกไป คือจะให้เกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติกและยูเทคติก ตัวอย่างของแผนภูมิสมดุลงที่ยกมาเป็นตัวอย่างนี้ได้แก่ แผนภูมิสมดุลงของโลหะทองกับบิสมัท โดยจะให้สารประกอบเชิงโลหะ Au_2Bi ที่ส่วนผสม 34% บิสมัท และปฏิกิริยาเพอริเทคติกจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ $371\text{ }^{\circ}C$ ($700\text{ }^{\circ}F$) นอกจากนี้เกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติกแล้วยังเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ $241\text{ }^{\circ}C$ ($482\text{ }^{\circ}F$) การศึกษาโครงสร้างคงอาศัยหลักในการพิจารณาเหมือนกับโลหะผสมที่ทำให้ปฏิกิริยาเพอริเทคติก และ ยูเทคติก เช่นที่กล่าวมาแล้ว ผิดแต่ว่า Au_2Bi มีลักษณะเป็นเส้นโลหะบริสุทธิ์อยู่ระยะหนึ่งที่อุณหภูมิไม่เกิน $371\text{ }^{\circ}C$ ถ้าพ้นอุณหภูมินี้ไปแล้วจะแตกตัวให้เฟสเป็นโลหะ Au กับโลหะผสมหลอมเหลว ดังแสดงในแผนภูมิสมดุลงระหว่าง Au กับ Bi

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุ(ไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

