

# โลหะ

## (Metals)

# III

ตติยบท

"สำหรับผู้ที่สนใจงานด้านเหล็ก และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก"

โครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

การรับสภาพทางความร้อน

การชุบผิวแข็ง ฯลฯ

T.M.E.



## คำนำ

นี่เป็นเล่มที่ 3 ของเรื่องโลหะแล้ว เป็นความรู้เกี่ยวกับ  
ทฤษฎีของเหล็กที่จะลึกเข้ามาอีกนิด กล่าวถึงความรู้ระดับ  
โครงสร้างของเหล็ก

เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้จะกล่าวเกี่ยวกับ

- การวิเคราะห์โครงสร้างโลหะ
- การอ่านเฟสไดอะแกรมของเหล็ก
- การปรับสภาพของโลหะ เช่น การอบอ่อน การอบคืนตัว
- หลักการเปลี่ยนแปลงไปสู่มาเทนไซด์
- หลักการชุบแข็ง
- ฯลฯ

I have a dream.

ผู้เขียน และเรียบเรียง

T.M.E.

## สารบัญ

### ภาค 3 ทฤษฎีของเหล็ก (ต่อ)

บทที่ 11 โครงสร้างผลึก.....	13
11.1 สเปซแลตทิซ.....	17
11.2 การเติบโตของผลึก.....	46
11.3 ขนาดของเกรนเมื่อนำมาเทียบกับเวลา ในการทำความเย็น.....	51
11.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเฟอร์ไรต์ และมาเทนไซต์.....	53
บทที่ 12 การพัง และการเสียรูปของโลหะ.....	57
12.1 การเสียรูป.....	57
12.2 ความยืดหยุ่น และความเปราะ.....	59
12.3 โลหะเปราะ พังแบบแยกขาดออกจากกัน.....	61
12.4 โลหะเหนียว พังแบบถูกเฉือน.....	62
12.5 ผลึกใหญ่ และเล็ก.....	72
12.6 การเพิ่มความแข็งแรงในงาน.....	77
บทที่ 13 แผนผังเหล็กคาร์บอน.....	81
13.1 รูปแบบโครงสร้างของเหล็กกล้า.....	81
13.2 เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน.....	89
13.3 การใช้ และการอ่านเฟสไดอะแกรมของเหล็กกล้าผสม คาร์บอน.....	96

13.4 การเปลี่ยนแปลงไปสู่มาเทนไซด์.....	107
13.5 โครงสร้างเหล็กกล้าในบริเวณต่าง ๆ ของไดอะแกรม เหล็กกล้า- คาร์บอน.....	110
13.6 บริเวณการเปลี่ยนรูป.....	116
13.7 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง กับคุณสมบัติทางกล.....	120
13.8 การปรับปรุงความแข็งให้ดีขึ้น.....	123
<b>บทที่ 14 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....</b>	<b>125</b>
14.1 รูปโครงสร้างทางจุลภาค.....	129
14.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	143
14.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างที่เป็นสีสว่าง และมีด.....	153
<b>บทที่ 15 การปรับสภาพทางความร้อน และการชุบแข็ง....</b>	<b>156</b>
15.1 การปรับสภาพทางความร้อน.....	156
15.2 การชุบแข็ง.....	158
15.3 เทคนิค และสารตัวกลางชุบแข็ง.....	165
15.4 บทสรุปของกรรมวิธีการชุบแข็ง.....	173
15.5 อุณหภูมิของสารตัวกลางในการชุบแข็ง.....	177
15.6 เทคนิคการชุบแข็งในภาคปฏิบัติ.....	179
<b>บทที่ 16 การอบอ่อน และการอบปกติ.....</b>	<b>185</b>
16.1 ภาพรวมของการอบอ่อน และการอบปกติ.....	187
16.2 การอบอ่อน.....	189

16.3 การอบปกติ.....	190
16.4 ผลจากการทำการอบอ่อน และการอบปกติ.....	192
16.5 ความสามารถในการกลึงกัดไส.....	196
16.6 การขึ้นรูป.....	197
16.7 การลดความเค้นภายใน.....	199
16.8 เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของผลึก.....	201
16.9 ประเภทของการการอบอ่อน.....	201
16.10 การทำการอบอ่อนเต็ม.....	202
16.11 กระบวนการอบอ่อนหลังการขึ้นรูปเย็น.....	205
16.12 การเปลี่ยนเป็นคาร์ไบด์เม็ดกลม.....	207
16.13 วิธีการอบปกติ.....	209
16.14 การเปรียบเทียบการอบอ่อน, การอบปกติ และการชุบแข็ง....	211
<b>บทที่ 17 ผังไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงแบบอุณหภูมิคงที่.....</b>	<b>214</b>
17.1 ผังไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่เบื้องต้น.....	214
17.2 องค์ประกอบพื้นฐานของแผนภาพไอที.....	217
17.3 เส้นอุณหภูมิ-เวลา.....	219
17.4 ข้อจำกัดของแผนภาพไอที.....	222
17.5 การใช้งานแผนภาพไอที.....	222
17.6 อาณาบริเวณในแผนภาพไอที.....	225
17.7 การใช้แผนภาพไอทีเพื่อระบุเหล็กกล้า.....	233

17.8	แผนภาพไอทีทางอุตสาหกรรม.....	240
17.9	การเปรียบเทียบแผนภาพไอทีอุตสาหกรรม.....	244
17.10	การคิดค่าความแข็งโดยดูจากแผนภาพ.....	250
17.11	การพล็อตแผนภาพไอที.....	254
17.12	การเปรียบเทียบแผนภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่.....	255
<b>บทที่ 18 การอบคั่ว.....</b>		<b>271</b>
18.1	การอบคั่วเบื้องต้น.....	271
18.2	วัตถุประสงค์ของการอบคั่ว.....	274
18.3	ผลของการทำการอบคั่ว.....	275
18.4	กลไกการอบคั่ว.....	277
18.5	การอบคั่วภาคปฏิบัติ.....	278
18.6	ประเภทการอบคั่ว.....	287
18.7	การเปรียบเทียบวิธีการปรับสภาพทางความร้อน.....	300
<b>บทที่ 19 การชุบผิวแข็ง.....</b>		<b>305</b>
19.1	บทนำการชุบผิวแข็ง.....	305
19.2	การชุบผิวแข็งในเหล็กกล้า.....	307
19.3	ตัวอย่างชิ้นส่วนทางกลที่นำไปทำการชุบผิวแข็ง.....	308
19.4	วิธีการพื้นฐานของการชุบผิวแข็ง.....	315
19.5	กระบวนการชุบผิวแข็ง.....	321
19.6	คาร์บอนไนไตรดิง.....	353

---

19.7 การทำความแข็งด้วยเปลวไฟ.....	360
19.8 การชุบผิวแข็งด้วยการเหนียวจากกระแสไฟฟ้า.....	365
19.9 การเลือกใช้กระบวนการชุบผิวแข็ง.....	374

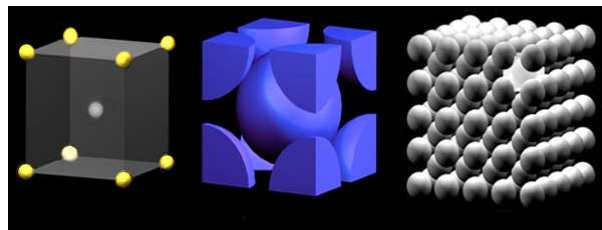


## เกริ่นนำ

ก่อนที่จะเข้าไปศึกษาเรียนรู้ในหนังสือ เล่มที่ 3 นี้ เรามาดูภาพรวมของหนังสือเล่มนี้ ในหนังสือเล่มนี้ จะประกอบไปด้วย

### ภาค 3 เหล็ก (ต่อ)

- โครงสร้างของผลึก มาดูว่าโลหะมีรูปร่างของผลึกเป็นเช่นไร เช่น โครงสร้างแบบ BCC, FCC, CPH ฯลฯ ความร้อนก่อให้เกิดผลต่อโครงสร้างของผลึก และการเติบโตของผลึก



รูป แบบจำลองโครงสร้างผลึกแบบ บีซีซี

ที่มา: <https://www.nde-ed.org>

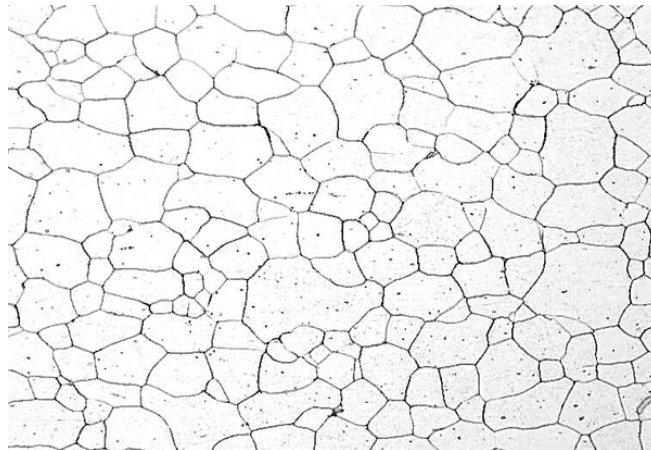
- การเสียรูป และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะในรูปแบบต่าง ๆ



รูปการทดสอบการเสียรูปของโลหะ

ที่มา: <http://img.alibaba.com>

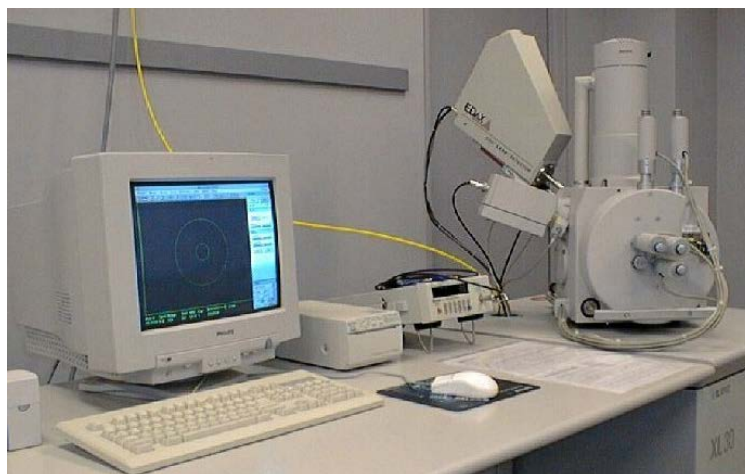
- แผนผังไดอะแกรมของเหล็กกล้า, โครงสร้างของเหล็กกล้าแบบต่าง ๆ เช่น เฟอร์ไรต์, เพลอไรต์, ซีเมนต์ไต ฯลฯ



รูปโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า

ที่มา: <http://automotive.arcelormittal.com>

- การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค วิเคราะห์โครงสร้างต่าง ๆ เช่น เฟอร์ไรต์, เพลอไรต์, ซีเมนต์ไต ฯลฯ



รูปห้องปฏิบัติการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

ที่มา: <http://www.nims.go.jp>

## ○ การปรับปรุงสภาพทางความร้อน และการชุบแข็ง



### รูปการปรับสภาพทางความร้อนให้กับชิ้นงาน

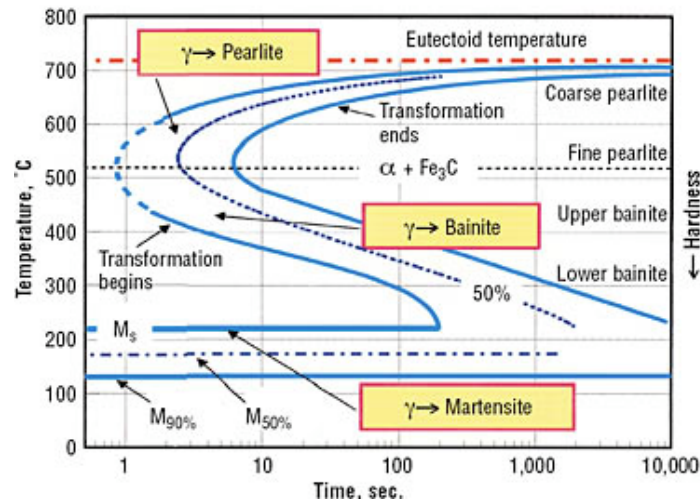
ที่มา: <https://hocktools.files.wordpress.com>

## ○ การอบอ่อน และการอบปกติ อธิบายถึงการอบโลหะ เพื่อให้ผลทางความแข็ง, ความแข็งแกร่ง, ความเปราะ ของโลหะ



รูปลอกกระสุนปืนก่อนการใช้งานจะต้องผ่านการอบอ่อน

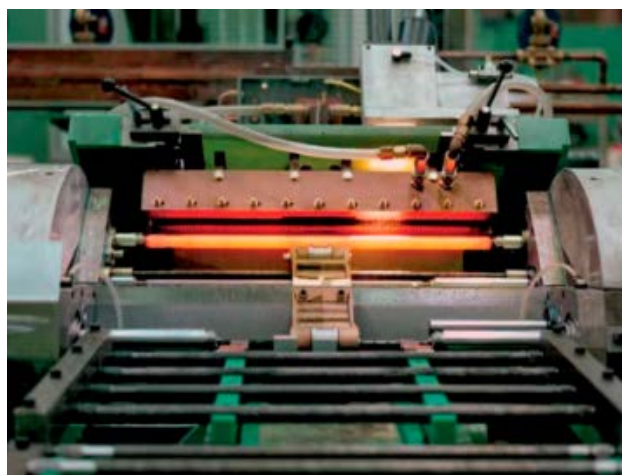
- แผนภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ วิธีการดู  
แผนภาพไดอะแกรมนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโลหะ



[รูปตัวอย่างแผนภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ ของ AISI 1080](#)

ที่มา: <http://www.industrialheating.com>

- การอบคืนตัว การปรับปรุงสภาพทางความร้อน เพื่อลด  
ความเค้น เพิ่มความแข็งแรงในโลหะ



[รูปชิ้นงานกำลังอบคืนตัว](#)

ที่มา: <http://img.directindustry.com>

- การขุบผิวแข็ง กล่าวถึงหลักการ และวัตถุประสงค์ของการขุบผิวให้แข็ง วิธีการขุบผิวแข็งแบบต่าง ๆ เช่นวิธีคาร์บูไรซิ่ง, วิธีการไนไตรดิง, วิธีการจุ่มก๊าดวงของความร้อน ฯลฯ



[รูปพื้นเฟืองที่กำลังทำการขุบผิวแข็ง](http://www.cflame.com)

ที่มา: <http://www.cflame.com>

## บทที่ 11 โครงสร้างผลึก (Crystal structure)



รูปเกร็ดน้ำแข็งในช่องแช่แข็งของตู้เย็น

ที่มา: <http://www.instructables.com>

เกร็ดน้ำแข็งที่เกาะตามขอบภาชนะในช่องแช่แข็งของตู้เย็น เกิดจากการที่ละอองน้ำในอากาศภายในช่องแช่แข็งเกิดการกลั่นตัวจนเป็นน้ำแข็ง

หรืออีกตัวอย่างก็คือ น้ำเกลือในหม้อต้มเมื่อต้มจนให้น้ำระเหยออกหมดก็จะเหลือแต่เกลืออยู่ภายในหม้อ เมื่อน้ำทั้งสองตัวอย่างมาสองขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ หรือแว่นขยายจะพบว่ามันมีลักษณะเป็นเหลี่ยม ๆ เป็นรูปแบบซึ่งเรียกลักษณะเหล่านี้ว่า **ผลึก (Crystal)**





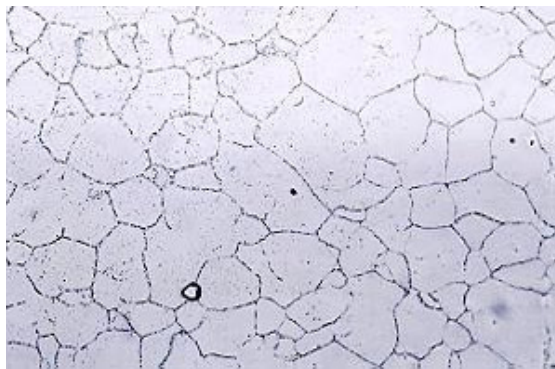
รูปผลึกของน้ำแข็ง



รูปเกลือที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมในรูปแบบผลึก

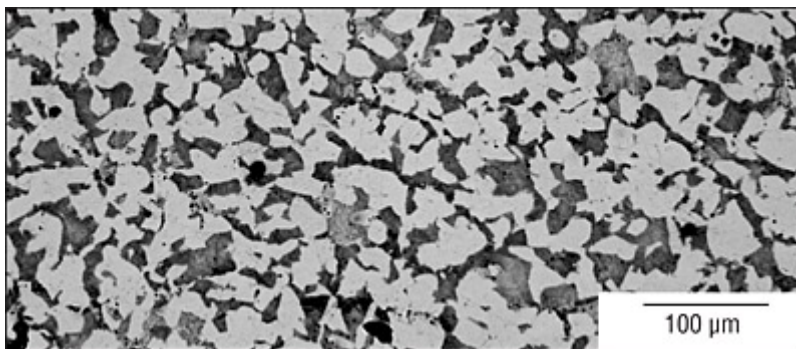
ในโลหะก็มีรูปแบบของผลึกเหมือนกัน โดยเหล็ก และเหล็กกล้าขณะที่กำลังหลอมตัว มันมีสถานะเป็นของเหลว อุณหภูมิสูง

และเมื่อเหล็กหลอมเหลวถูกทำให้เย็นตัวลงเกิดเป็นของแข็ง จะก่อรูปร่างเป็นผลึกในหลายส่วนของเหล็กหลอม โดยมีการเติบโตอย่างช้า ๆ โตขึ้นเรื่อย ๆ จนกลายเป็นของแข็ง การโตขึ้นของผลึกหลาย ๆ จุดที่อยู่ใกล้กันจนเกิดการชนกันระหว่างขอบของผลึก โดยชนกันแบบ **ขอบต่อขอบ (Elbow to elbow)** ของผลึก จนกลายเป็นสถานะของแข็งในที่สุด ดูที่รูป



รูปการเติบโตของผลึก โดยผลึกข้างเคียงชนกันแบบขอบต่อขอบ

ที่มา: <http://met-tech.com>



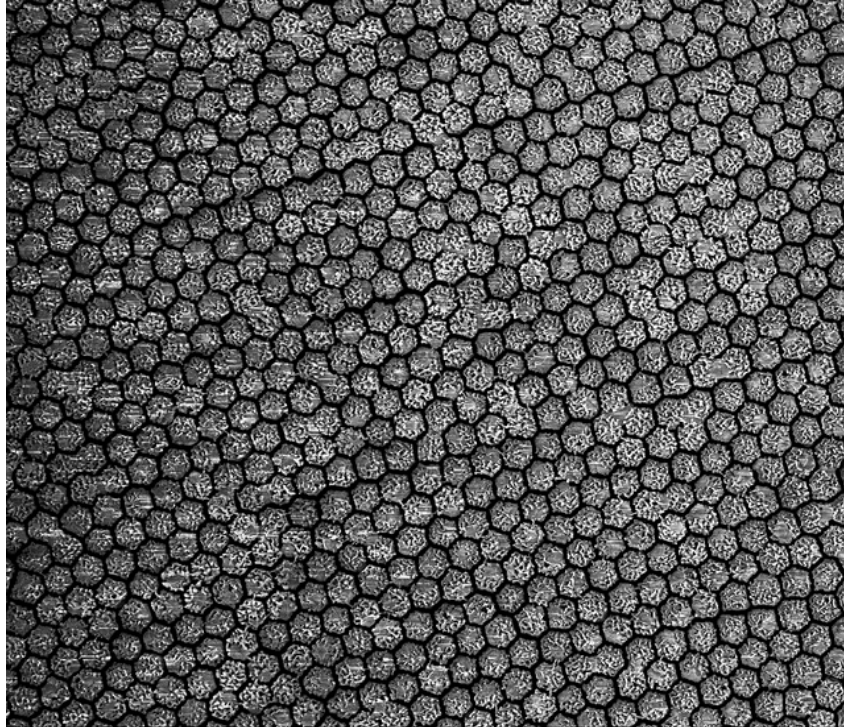
รูปโครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นถึง รูปแบบผลึกของเหล็กกล้า 1020 โครงสร้างเฟอร์ไรต์ มีเฟลไรต์เข้ามาแซม อัตราการขยาย 100 เท่า

ที่มา: <http://www.forgemag.com>

หลังจากที่ผลึกเหล่านี้แข็งตัว การจัดเรียงรูปแบบของอะตอมเหล่านี้ อาจจะมีทั้งรูปแบบที่สม่ำเสมอ มีความเป็นระเบียบ หรือ



อาจจะมีลักษณะรูปแบบที่มีความสับสนยุ่งเหยิงเกิดขึ้น โดยจะเกิดขึ้นในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง



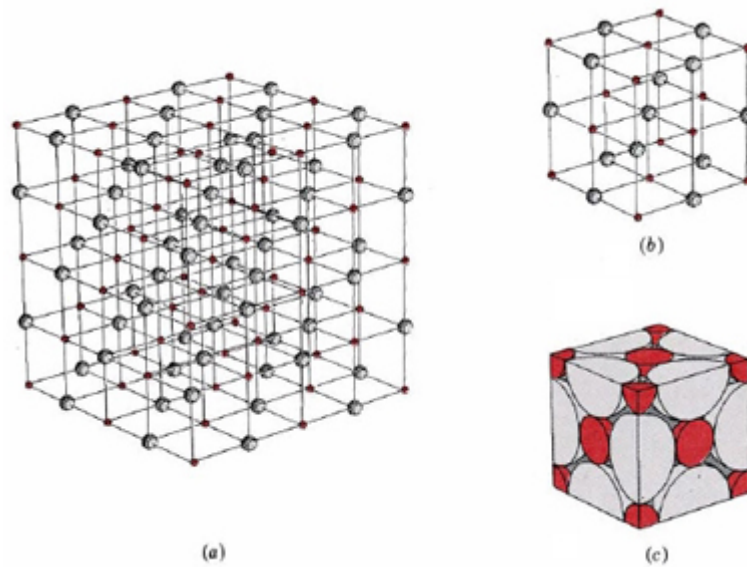
รูปโครงสร้างอนุภาคนาโนของอะตอมในผลึกปรากฏในรูปแบบที่เป็นระเบียบ

ที่มา: <http://farm5.staticflickr.com>

โครงสร้างภายในที่มีขนาดที่สม่ำเสมอเป็นระเบียบ และมีความเที่ยงตรงมาก อะตอมก็จะมีการจัดเรียงตัวกันเป็นแถวเป็นแนวคล้ายกับแถวของทหาร ผลึกที่มีรูปร่างแตกต่างกันอาจมีหรือไม่มีรูปแบบที่เหมือนกันก็ได้ การจัดเรียงลำดับอะตอมขนาดเล็ก ในรูปแบบความยาวเป็นแถวอย่างเป็นระเบียบเป็นแนวทิศทางเดียวทั้งหมดในแต่ละผลึก

## 11.1 สเปซแลตทิซ

การจัดรูปแบบของอะตอมในผลึก เราเรียกว่า ช่องว่างในโครงสร้างหรือ สเปซแลตทิซ (Space lattice) ดังตัวอย่างได้ที่รูป



[รูปตัวอย่างโครงสร้างสเปซแลตทิซ](http://wiki.chemprime.chemeddl.org)

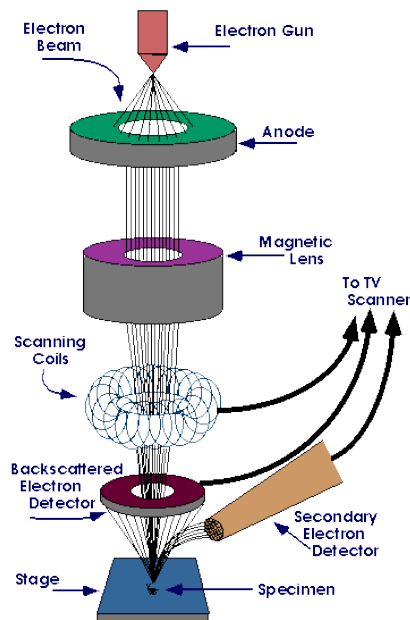
ที่มา: <http://wiki.chemprime.chemeddl.org>

อะตอมที่อยู่ในสเปซแลตทิซมีขนาดเล็กมากจนมองไม่เห็นเมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้า นักวิทยาศาสตร์จึงได้พัฒนา กล้องจุลทรรศน์เพื่อใช้ส่องดูอะตอมเหล่านี้ จนมีการสร้าง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscopes)



### รูปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ที่มา: <http://science.kukuchew.com>



### รูปส่วนประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

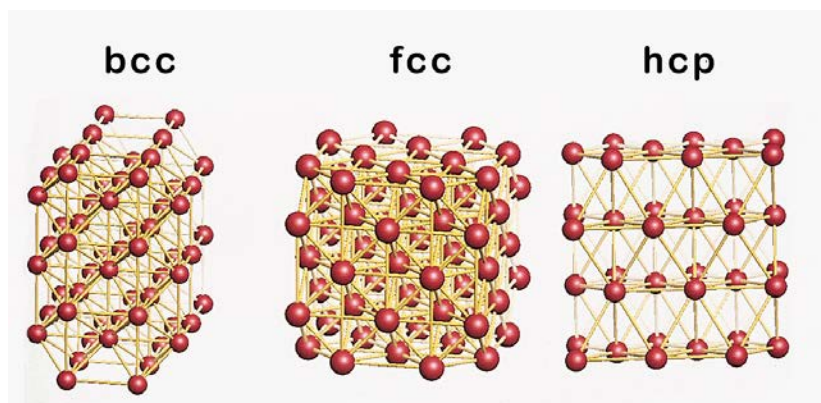
ที่มา: <http://www.purdue.edu>

เพื่อใช้ส่องหาอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ซึ่งสามารถส่องได้เล็กถึง  $1/10^9$  (เล็กถึงพันล้านเท่า หรือ นาโน) ทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถเห็นรูปร่างของอะตอมได้อย่าง **เลือนลาง** เทคโนโลยีในการวิจัยยังไม่หยุดยั้งที่จะพัฒนากล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายเต็มทีมากกว่านี้ ดังนั้นในวันหนึ่งข้างหน้าเราอาจจะเห็นตัวของอะตอมได้แบบเต็มตัวก็เป็นไปได้ ซึ่งบางทีอาจจะเห็นรูปร่าง หรือเกิดความรู้อื่น ๆ เกี่ยวกับรูปแบบอะตอมที่จะสามารถแตกแขนงในเรื่องของอะตอมเพื่อต่อยอดความรู้ต่อไปก็ได้

### 11.1.1 หน่วยเซลล์

เป็นรูปแบบพื้นฐานอย่างง่ายที่สุด ของอะตอมที่อยู่ในสเปซแลตทิซ เราเรียกว่า **หน่วยเซลล์ (Unit cell)** โดยสเปซแลตทิซหนึ่งหน่วยอาจจะมีหน่วยเซลล์ถึงพันล้านหน่วยก็เป็นได้ โลหะแต่ละชนิดจะมีรูปแบบหน่วยเซลล์ที่อยู่ในสเปซแลตทิซเป็นของตัวเอง

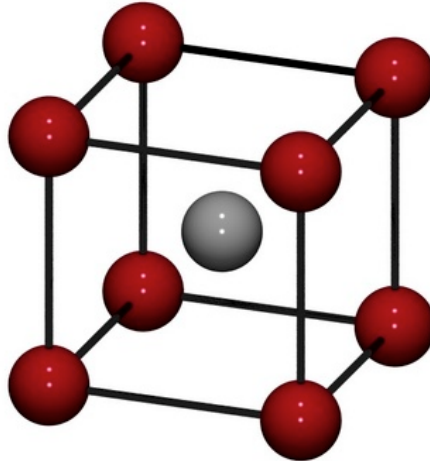
จึงมีหน่วยเซลล์ที่มีขนาดเท่ากัน สิ่งเหล่านี้จะบ่งบอกถึงโลหะหลากหลายชนิดที่มีความแตกต่างกัน ดูที่รูปด้านล่าง



[รูปตัวอย่างหน่วยเซลล์ที่อยู่ภายในสเปซแลตทิซ และสเปซแลตทิซก็อยู่ภายในโครงสร้างผลึกของโลหะในรูปแบบต่าง ๆ](#)

ชนิดโครงสร้างหน่วยเซลล์ในโลหะมีดังต่อไปนี้

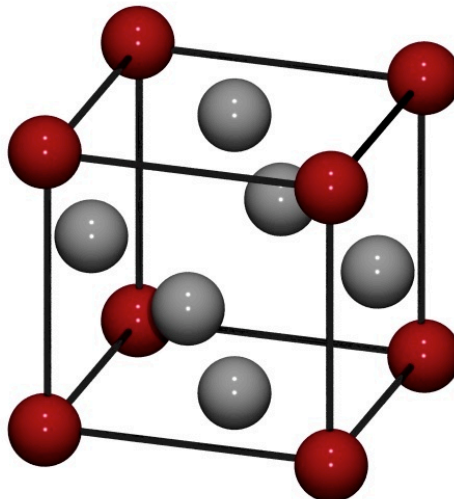
- 1) **บีซีซี (Body-Centered Cubic: BCC)** คืออะตอมอยู่ตามมุมสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จัตุรัส และที่ตรงกลาง



[รูปหน่วยเซลล์แบบบีซีซี](#)

ที่มา: <http://www.ficientdesign.com>

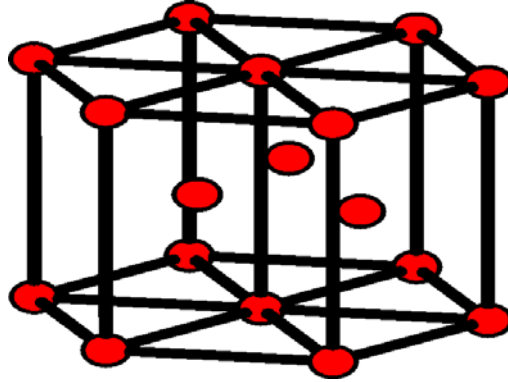
- 2) **เอฟซีซี (Face-Centered Cubic: FCC)** คืออะตอมอยู่ตามมุมสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จัตุรัส และที่ผิวหน้าแต่ละด้าน



[รูปหน่วยเซลล์แบบเอฟซีซี](#)

ที่มา: <http://www.ficientdesign.com>

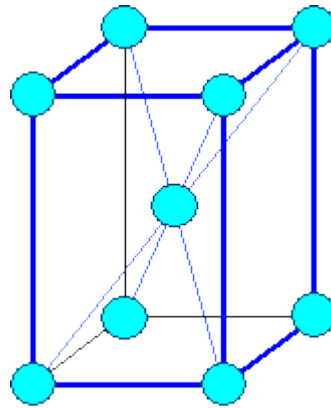
- 3) **ซีพีเฮกซ (Close-Packed Hexagonal: CPH)** คืออะตอมอยู่แบบลูกบาศก์หกเหลี่ยมชิดกันหนาแน่น



[รูปหน่วยเซลล์รูปแบบซีพีเฮกซ](http://www.everyscience.com)

ที่มา: <http://www.everyscience.com>

- 4) **บีซีที (Body-Centered Tetragonal: BCT)** คืออะตอมอยู่ตามมุมสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ไม่จัตุรัส และที่ตรงกลาง



[รูปหน่วยเซลล์รูปแบบบีซีที](http://www.tf.uni-kiel.de)

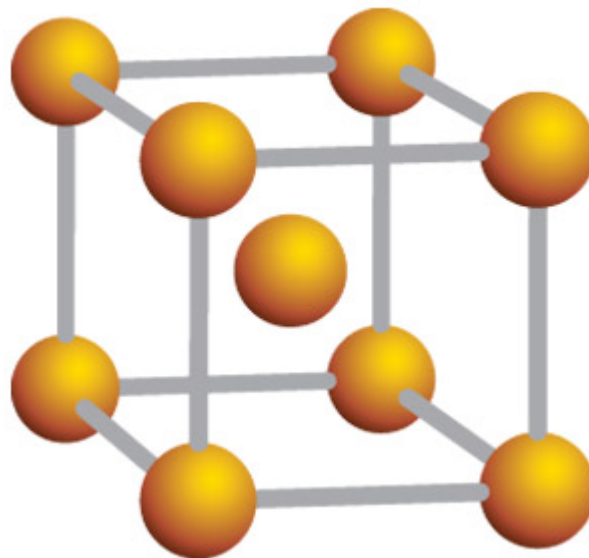
ที่มา: <http://www.tf.uni-kiel.de>

มีข้อสมมติฐานของโครงสร้างผลึกของอะตอมนั้นมีอยู่มากมาย แต่ในการศึกษาเกี่ยวกับโลหะวิทยาโครงสร้างทั้งสี่เหล่านี้เป็นที่นิยมในการอธิบายความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างผลึกมากที่สุด



### 11.1.1.1 สเปซแลตทิซแบบบีซีซี

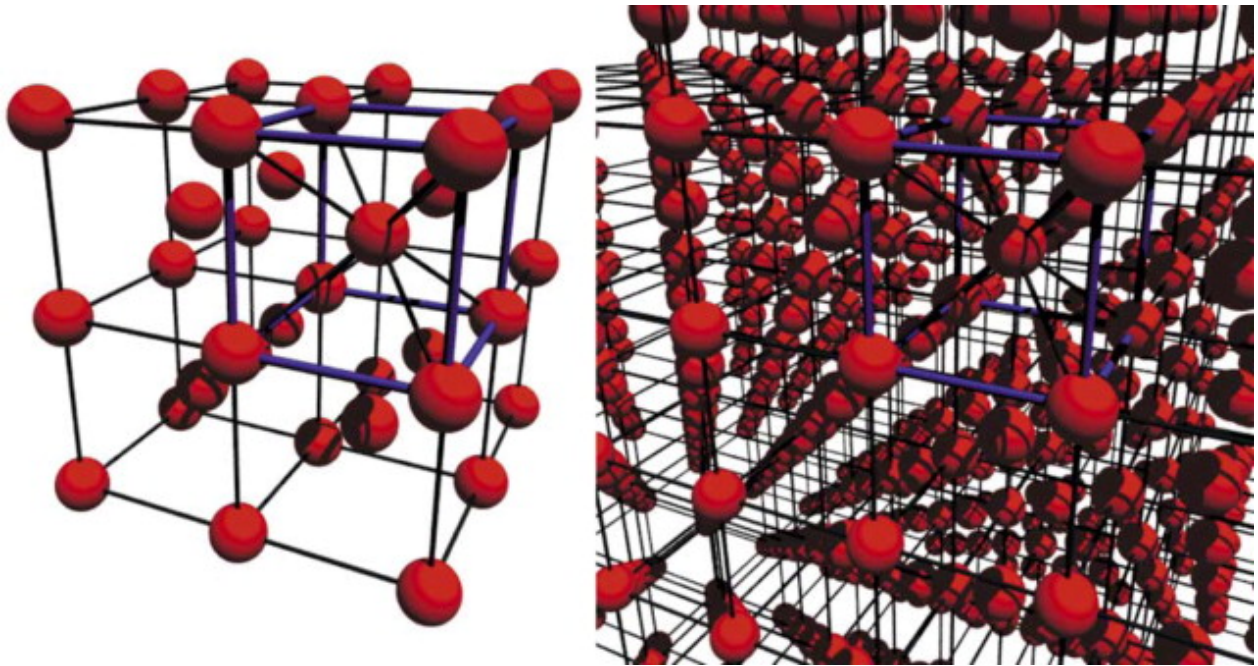
หน่วยเซลล์ของสเปซแลตทิซของบีซีซี มีรูปร่างเป็นรูป  
 ภาศกสี่เหลี่ยมจัตุรัส อะตอม (ลูกบอลทรงกลม) จะอยู่ตามมุมแต่ละ  
 มุมของลูกภาศกมีอยู่ 8 ตัว แล้วตรงกลางอีก 1 ตัว รวมแล้วมี  
 อะตอมทั้งหมด 9 ตัว ในรูปหน่วยเซลล์แบบบีซีซี จะเป็นดังรูป  
 ด้านล่าง



รูปหน่วยเซลล์แบบบีซีซี

ที่มา: <https://www.llnl.gov>

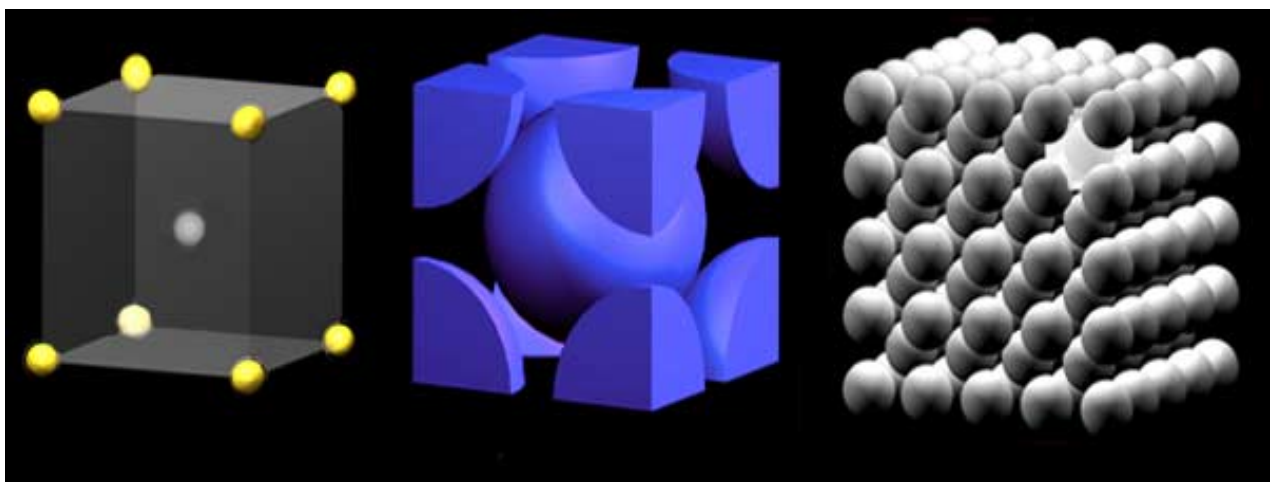
แต่เมื่อหน่วยเซลล์ของบีซีซี หลายหลายหน่วยเซลล์มารวมกัน  
 เป็นสเปซแลตทิซแล้ว อะตอมจะแชร์กันไม่ใช่ 9 ตัวเหมือนแบบ  
 หน่วยเซลล์เหมือนเดิมแล้ว เมื่ออยู่ในรูปของสเปซแลตทิซ  
 อะตอมจะแชร์กันเพื่อเกาะเกี่ยวกัน เป็นดังรูปด้านล่าง



### รูปสเปซแลตทิซของบีซีซี

ที่มา: <http://ars.els-cdn.com>

ดังนั้นอะตอมของบีซีซีที่อยู่ในสเปซแลตทิซ ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีจำนวนอะตอมดังนี้



### รูปหน่วยเซลล์ ภาคตัดหน่วยเซลล์ และสเปซแลตทิซของบีซีซี

ที่มา: <http://www.ndt-ed.org>



อะตอมที่อยู่ตรงกลางของหน่วยเซลล์ = 1

อะตอมที่อยู่ตรงมุม 1 มุม =  $1/8$  ตัว

อะตอมที่อยู่ทั้งมุม 8 มุม =  $(1/8) \times 8 = 1$  ตัว

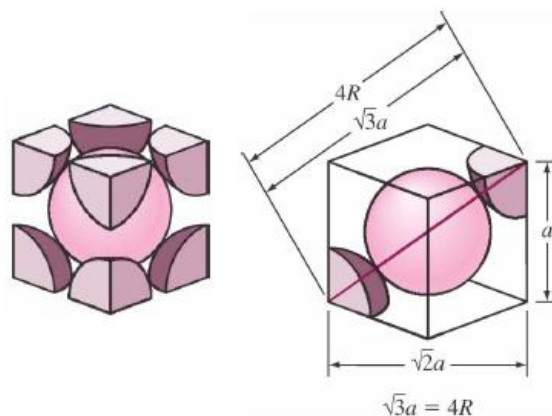
ดังนั้นอะตอมในหนึ่งหน่วยเซลล์ที่อยู่ในสเปซแลตทิซ =  $1 + 1 = 2$  ตัว

การหาความหนาแน่นของอะตอมในหน่วยเซลล์

(Atomic Packing Factor: APF: คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอะตอมทั้งหมดต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยเซลล์) ของอะตอมในหน่วยเซลล์ของบีซีซี ดังนั้น

ความหนาแน่นของอะตอมในหน่วยเซลล์ = ปริมาตรของอะตอม/ปริมาตรในหน่วยเซลล์

ในบีซีซี 1 หน่วยเซลล์จะมี 2 อะตอม เราจะมาคำนวณหาว่าความหนาแน่นของอะตอมจะเป็นเท่าไร ได้ดังนี้



[รูปความหนาแน่นต่อหน่วยเซลล์ของบีซีซี](#)

ที่มา: <http://www.oocities.org/>

จากรูปด้านบน หาความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต เพื่อหาปริมาตร  
ได้ดังนี้

จากสมการสามเหลี่ยมพีธากอรัส ( $a^2 = b^2 + c^2$ )

$$(4R)^2 = (a^2 + a^2) + a^2$$

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

$$\text{ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (V}_{\text{BCC}}) = a^3$$

แทนค่า a ลงไป

$$V_{\text{BCC}} = \left( \frac{4R}{\sqrt{3}} \right)^3$$

ปริมาตรของอะตอม (สมมติว่าเป็นทรงกลม)

$$V_{\text{Atom}} = \frac{4}{3} \pi R^3$$

อะตอมของบีซีซีในหน่วยเซลล์มี 2 อะตอม ดังนั้นปริมาตร  
อะตอมจะเท่ากับ

$$V_{\text{Atom}} = 2\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)$$

จากสมการความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่นของอะตอมในหน่วยเซลล์} = \frac{2\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3} = 0.68$$

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะได้

$$\text{คิดเป็นร้อยละ} = 0.68 \times 100 = 68\%$$

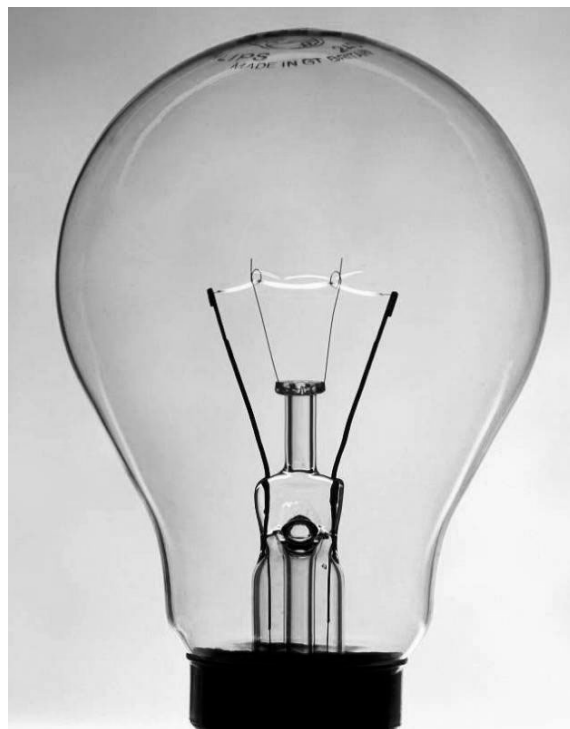
จะเห็นว่าในเนื้อที่ 1 หน่วยเซลล์ของบีซีซี จะมีส่วนที่เป็นอะตอมอยู่ 68% ส่วน อีก 32% จะเป็นพื้นที่ว่าง

โลหะที่มีโครงสร้างเป็นแบบบีซีซี เช่น โครเมียม, โมลิบดีนัม, แทนทาลัม, ทังสแตน, วาเนเดียม, ไนโอเบียม (Niobium) และเหล็กที่เป็นรูปแบบเฟอร์ไรต์ (Ferrite iron) (เหล็กรูปแบบนี้จะได้กล่าวถึงในภายหลัง)



[รูปโครเมียมโครงสร้างหน่วยเซลล์เป็นแบบบีซีซี](#)

ที่มา: <http://www.hobart.k12.in.us>

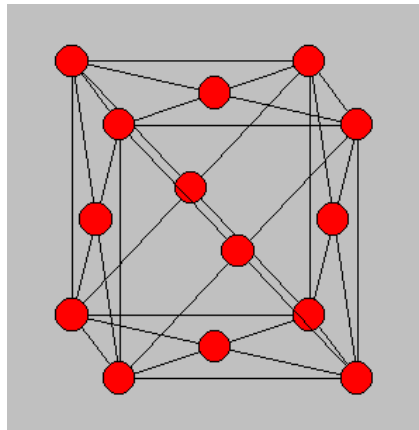


[รูปทังสเตนที่ทำเป็นขดลวดในหลอดไส้ไฟฟ้า](#)

ที่มา: <http://www.geevor.com>

### 11.1.1.2 สเปซแลตทิซแบบเอฟซีซี

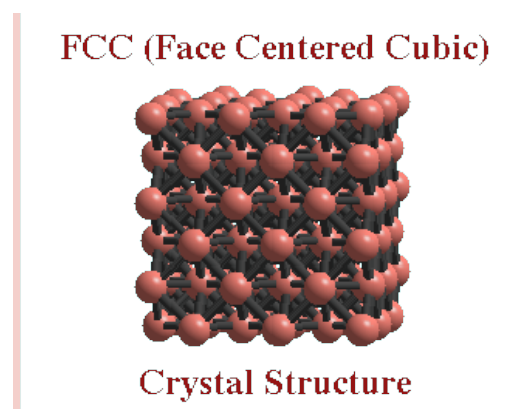
โลหะมักจะเป็นโครงสร้างหน่วยเซลล์แบบเอฟซีซี หน่วยเซลล์จะมีรูปร่างเป็นลักษณะลูกบาศก์ พร้อมกับมีอะตอมอยู่ประจํามุม 8 มุม และในผิวหน้าลูกบาศก์แต่ละด้าน 6 ตัว **รวมแล้วในหนึ่งหน่วยเซลล์ จะมีอะตอมทั้งหมด 14 ตัว** ดูที่รูป



[รูปหน่วยเซลล์แบบเอฟซีซีมีอะตอมทั้งหมด 14 อะตอม](#)

ที่มา: <http://ecee.colorado.edu>

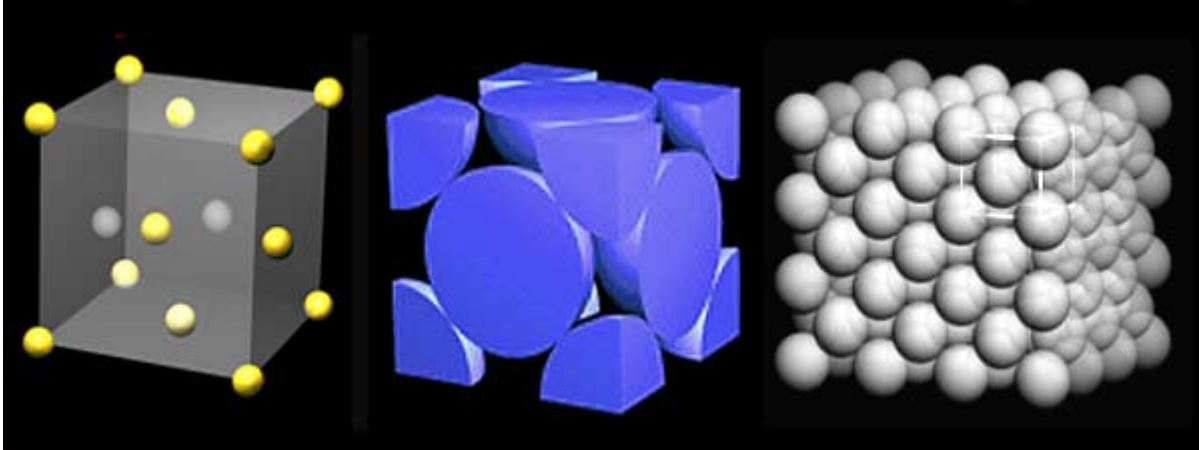
แต่เมื่อหน่วยเซลล์ของเอฟซีซี หลายหลายหน่วยเซลล์มารวมกันเป็นสเปซแลตทิซแล้ว อะตอมจะแชร์กันไม่ใช่ 14 ตัวเหมือนแบบหน่วยเซลล์เดี่ยว ๆ เหมือนเดิมแล้ว เมื่ออยู่ในรูปของสเปซแลตทิซ จะเป็นดังรูป



[รูปสเปซแลตทิซของเอฟซีซี](#)

ที่มา: <http://www.museum.mtu.edu>

ดังนั้นอะตอมของเอพซีซีที่อยู่ในสเปซแลตทิซ ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีจำนวนอะตอมดังนี้



รูปหน่วยเซลล์ ภาคตัดหน่วยเซลล์ และสเปซแลตทิซของเอพซีซี

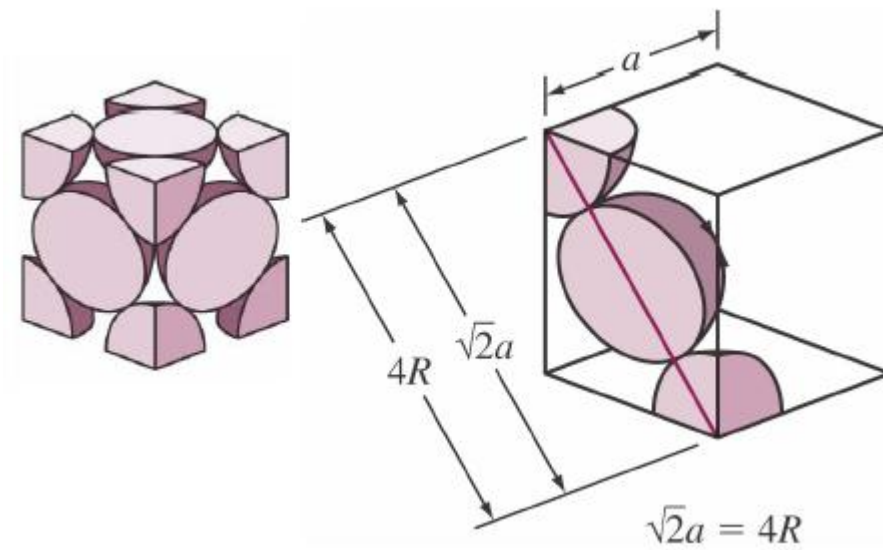
ที่มา: <https://www.nde-ed.org>

อะตอมอยู่ที่มุม 8 มุม =  $(1/8) \times 8 = 1$  ตัว

อะตอมที่อยู่ตรงกลางผิวหน้าทั้ง 6 ด้าน =  $(1/2) \times 6 = 3$  ตัว

ดังนั้น รวมอะตอมทั้งหมดในหนึ่งหน่วยเซลล์ที่อยู่ในสเปซแลตทิซ = 4 ตัว

ในเอพซีซี 1 หน่วยเซลล์จะมี 4 อะตอม เราจะมาคำนวณหาว่าความหนาแน่นของอะตอมจะเป็นเท่าไร ได้ดังนี้



รูปความหนาแน่นต่อหน่วยเซลล์ของเอฟซีซี

ที่มา: <http://www.oocities.org>

$$\sqrt{2}a = 4R$$

$$a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$$

ปริมาตรของหน่วยเซลล์ ( $V_{\text{FCC}} = a^3$ )

แทนค่า  $a$  ลงไป

$$V_{\text{FCC}} = \left( \frac{4R}{\sqrt{2}} \right)^3$$

ปริมาตรของอะตอม

$$V_{\text{Atom}} = \frac{4}{3} \pi R^3$$

อะตอมของเฟอซีซีในหน่วยเซลล์มี 4 อะตอม ดังนั้นปริมาตรอะตอมจะเท่ากับ

$$V_{\text{Atom}} = 4 \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right)$$

จากสมการความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่นของอะตอมในหน่วยเซลล์} = \frac{4 \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{\left( \frac{4R}{\sqrt{2}} \right)^3} = 0.74$$

$$\text{คิดเป็นร้อยละ} = 0.74 \times 100 = 74\%$$

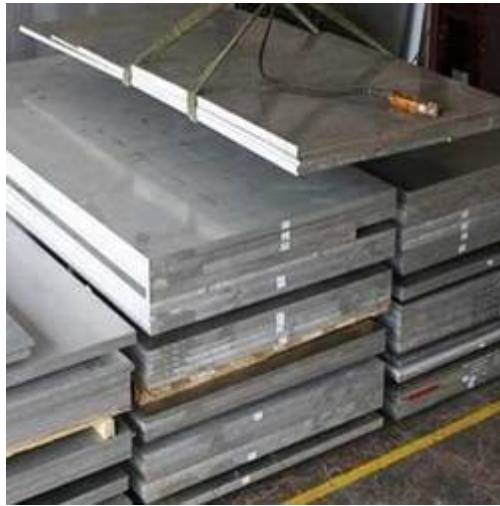
จะเห็นว่าในเนื้อที่ 1 หน่วยเซลล์ของเฟอซีซี จะมีส่วนที่เป็นอะตอมอยู่ 74% ส่วนอีก 26% จะเป็นพื้นที่ว่าง

เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างบีซีซี จะเห็นว่าโครงสร้างเฟอซีซีจะมีความหนาแน่นของอะตอมมากกว่า อะตอมทุกตัวจะชิดติดกัน โครงสร้างนี้จึงมีการเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า **ลูกบาศก์สี่เหลี่ยมชิดกันหนาแน่น (Cubic Close-Packed: CCP: โครงสร้างของอะตอมอัดตัวกันอย่างหนาแน่นที่สุด)**

โลหะธรรมดาทั่วไปที่เป็นโครงสร้างแบบนี้ เช่น อะลูมิเนียม, ทองแดง, ทองคำ, ตะกั่ว, นิกเกิล, ทองคำขาว (Platinum),



## เงิน และเหล็กออสเทนไนต์ (Austenitic iron) (เหล็กแบบนี้จะได้ กล่าวถึงในภายหลัง)



[รูปอลูมิเนียมโครงสร้างหน่วยเซลล์เป็นแบบเอฟซีซี](http://2.imimg.com)

ที่มา: <http://2.imimg.com>



[รูปทองคำโครงสร้างหน่วยเซลล์เป็นแบบเอฟซีซี](http://www.munknee.com)

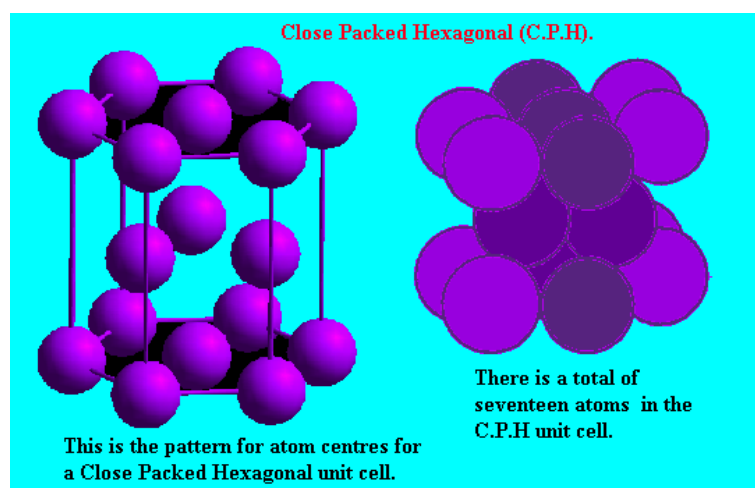
ที่มา: <http://www.munknee.com>

### 11.1.1.3 สเปนซ์แลตทิซแบบซีพีเฮช

แม้ว่าโครงสร้างหน่วยเซลล์ของโลหะทั่วไป จะเป็นแบบลูกบาศก์ก็ตาม แต่ยังมีโครงสร้างผลึกโลหะอีกรูปแบบหนึ่งที่มีรูปแบบ **ลูกบาศก์หกเหลี่ยม (Hexagonal)** หน่วยเซลล์แบบซีพีเฮช หรืออะตอมวางอยู่ในลูกบาศก์หกเหลี่ยมชิดกันหนาแน่น

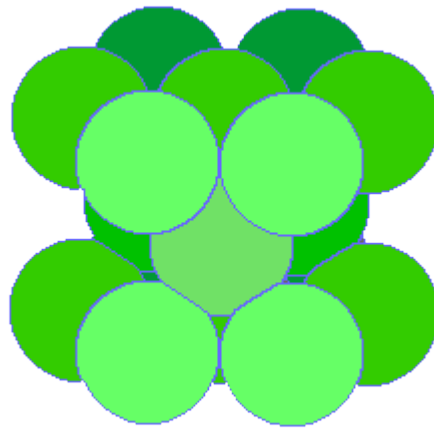
โครงสร้างของอะตอม ค่อนข้างจะแตกต่างจากบีซีซี และเอฟซีซี ที่มีโครงสร้างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ เป็นรูปแบบที่มีความเปราะบางมาก มักพบในโลหะที่มีความยืดตัวได้น้อย

หน่วยเซลล์ของซีพีเฮช ประกอบด้วย **อะตอม 17** **อะตอม** โดย อะตอม 7 ตัวอยู่ด้านที่เป็นหกเหลี่ยมทั้งด้านบนและด้านล่าง และอีก 3 ตัวอยู่ที่กึ่งกลางของโครงสร้าง ดังรูปด้านล่าง



#### รูปหน่วยเซลล์แบบซีพีเฮช

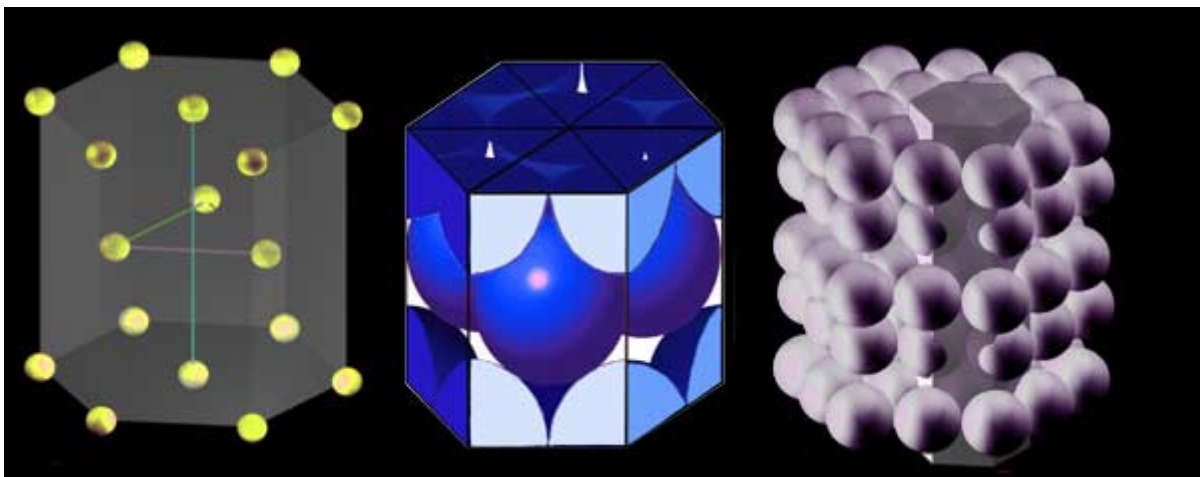
ที่มา: <http://www.rmutphysics.com>



รูปหน่วยเซลล์แบบซีพีเอส 2

ที่มา:

แต่เมื่อหน่วยเซลล์ของซีพีเอส หลายหลายหน่วยเซลล์มารวมกันเป็นสเปซแลตทิซแล้ว อะตอมจะแชร์กันไม่ใช่ 17 ตัวเหมือนแบบหน่วยเซลล์เหมือนเดิมแล้ว เมื่ออยู่ในรูปของสเปซแลตทิซ จะเป็นดังรูป



รูปหน่วยเซลล์ภาคตัดหน่วยเซลล์ และสเปซแลตทิซของซีพีเอส

ที่มา: <http://www.ndt-ed.org>

อะตอม 1 ตัวมีหน่วยเซลล์ซีพีเฮชใช้ร่วมกัน = 6 หน่วยเซลล์

ดังนั้น 1 มุมของหน่วยเซลล์จะมีอะตอมอยู่ =  $1/6$

หน่วยเซลล์ของซีพีเฮชมีมุมอยู่ทั้งหมด 12 มุม

จำนวนอะตอมที่มุม =  $(1/6) \times 12 = 2$  อะตอม

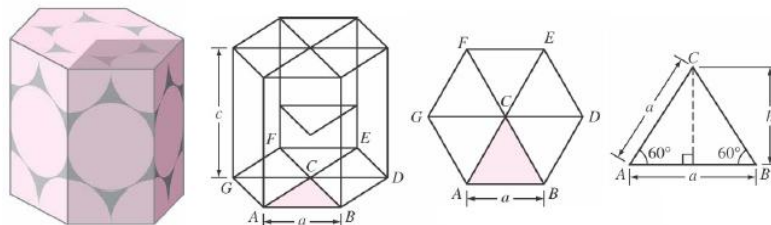
อะตอมที่อยู่ตรงกลางมีจำนวนอะตอมอยู่ = 3 อะตอม

แล้วยังมีอะตอมที่อยู่ตรงกลางที่ด้านของหกเหลี่ยมอีกด้านละ 1 ตัว เมื่อใช้ร่วมกับหน่วยเซลล์ข้างเคียง

ดังนั้น แต่ละหน่วยเซลล์จะมีอะตอมที่กึ่งกลางด้าน 1 ด้าน =  $1/2$

รวมอะตอมที่อยู่ด้านบน และด้านล่าง =  $(1/2) \times 2 = 1$  อะตอม

รวมอะตอมซีพีเฮชทั้งหมดที่อยู่ภายในสเปซแลตทิซ =  $2 + 3 + 1 = 6$  อะตอม



### สรุปความหนาแน่นต่อหน่วยเซลล์ของซีพีเฮช

ที่มา: <http://www.oocities.org>

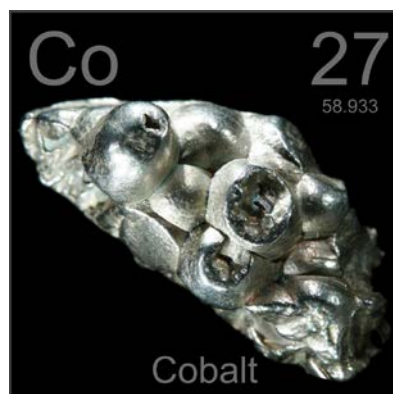
ส่วนค่าความหนาแน่นของอะตอมในหน่วยเซลล์ มีค่าเท่ากับ  $0.74 = 74\%$  มีพื้นที่ว่างเท่ากับ  $0.26 = 26\%$  จะเห็นได้ว่าจะมีค่าเท่ากับหน่วยเซลล์แบบเอฟซีซี ซึ่งถือว่าเป็นค่าสูงที่สุดของหน่วยเซลล์ ความแตกต่างของโครงสร้างทั้งสองก็คืออยู่ที่ลำดับการเรียงตัวของอะตอม

โลหะที่มีรูปแบบสเปซแลตทิซแบบนี้ได้แก่ แคดเมียม (Cadmium: Cd), โคบอลต์ (Cobalt: Co), แมกนีเซียม, เซอร์โคเนียม, เบริลเลียม (Beryllium) และสังกะสี (Zinc)



[รูปโลหะแคดเมียมที่มีโครงสร้างเป็นแบบซีพีเฮช](#)

ที่มา: <http://www.5nplus.com>

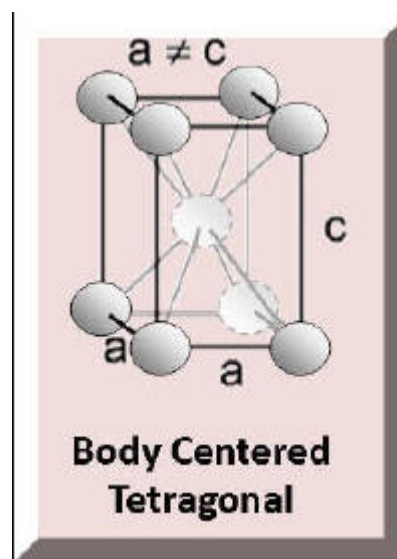


[รูปโคบอลต์โครงสร้างเป็นแบบซีพีเฮช](#)

ที่มา: <http://www.periodictable.com>

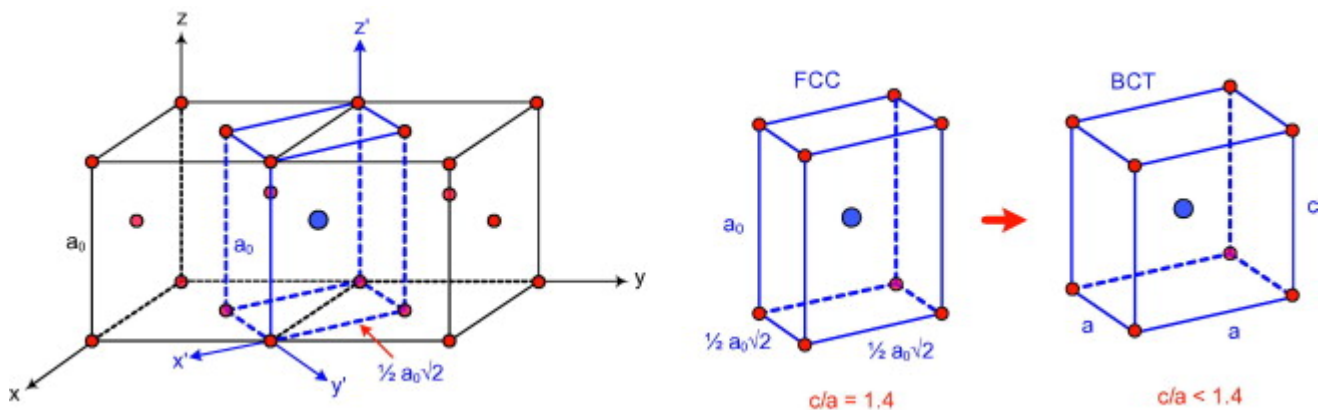
## 11.1.1.4 สเปซแลตทิซแบบบีซีที

หน่วยเซลล์แบบบีซีที จะมีรูปร่างคล้ายกับหน่วยเซลล์แบบบีซีซี แตกต่างกันตรงที่ว่ามันเป็นรูปร่างปริมาตรสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดูที่รูป



หน่วยเซลล์แบบบีซีที

ที่มา: <http://www.netwelding.com>

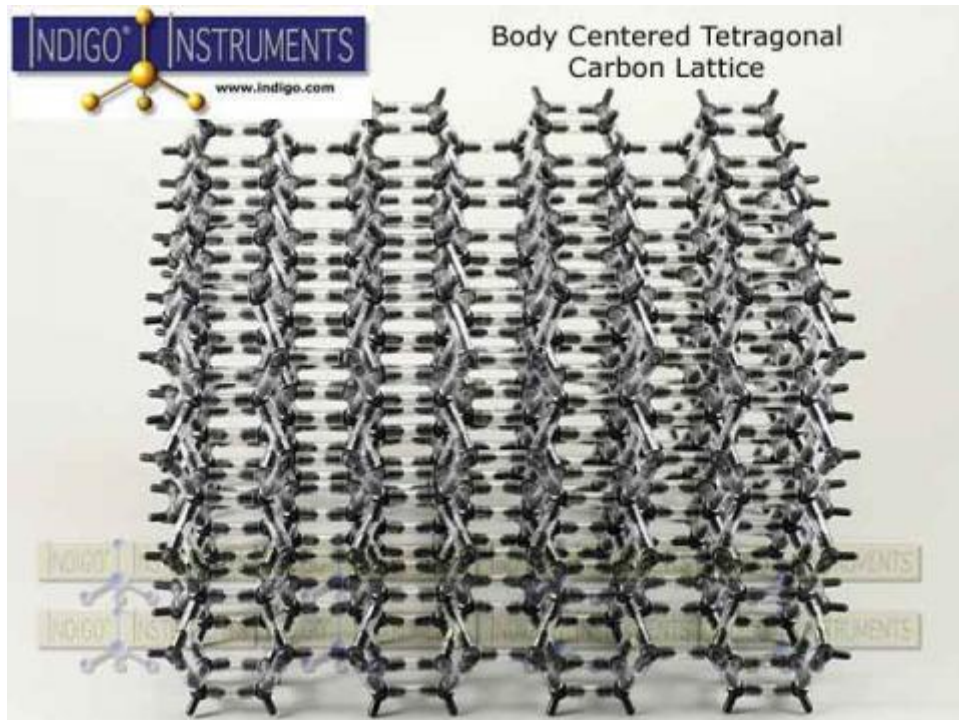


รูปหน่วยเซลล์บีซีทีโครงสร้างเป็นปริมาตรสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ที่มา: <http://ars.els-cdn.com>



จำนวนของอะตอมก็มีเท่ากับบีซีซี นั่นก็คือ 9 ตัว ส่วนสเปซแลตทิซดูที่รูป



รูปโครงสร้างบีซีทีในรูปแบบสเปซแลตทิซ

ที่มา: <https://www.indigo.com>

สเปซแลตทิซแบบบีซีที จะมีความแข็งที่สุด, แข็งแกร่งที่สุด และเปราะมากที่สุด ตัวอย่างโครงสร้างแบบนี้จะพบเห็นในโลหะเพียงรูปแบบเดียว นั่นก็คือ เหล็กที่เป็นรูปแบบ **มาเทนไซต์ (Martensitic iron)** (**เหล็กรูปแบบนี้จะได้กล่าวถึงในภายหลัง**)



[รูปท่อเหล็กไร้สนิมที่มีรูปแบบเป็นเหล็กมาแทนไซด์](http://image.made-in-china.com)

ที่มา: <http://image.made-in-china.com>

ในโครงสร้างแบบบีซีซี เอฟซีซี และซีพีเอส อาจมีการเปลี่ยนแปลงตัวเองได้ถ้าอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง การรวมตัวกันของโลหะชนิดหนึ่งกับโลหะอีกชนิดหนึ่งนั้นยอมเป็นไปได้ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิดของโครงสร้างผลึก และอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าอะตอมมีขนาดใกล้เคียงกัน และมีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันก็อาจรวมกันได้

โลหะผสมที่เกิดขึ้นมาใหม่นั้นอาจมีโครงสร้างผลึกเหมือนเดิม หรือผิดแผกไปจากเดิมก็ได้ แต่ถ้าอะตอมมีขนาดที่แตกต่างกันมาก และโครงสร้างผลึกเป็นคนละรูปแบบ ซึ่งเป็นการยากที่จะสามารถนำมารวมกันได้



โลหะที่มีโครงสร้างแบบบีซีซี เป็นโลหะที่ค่อนข้าง แข็งแกร่ง มีความแข็งค่อนข้างสูง สามารถรับแรงทางดึงได้ดี แต่จะไม่สามารถตีให้เป็นแผ่น หรือดึงให้เป็นเส้นได้ง่าย

โลหะที่มีโครงสร้างเป็นแบบเอฟซีซี เป็นโลหะที่มีเนื้อ ค่อนข้างอ่อน และมีความเหนียวมากกว่าแบบบีซีซี ทำให้ สามารถตีเป็นแผ่น หรือยืดเป็นเส้นได้ง่ายกว่า

โลหะที่มีโครงสร้างแบบซีพีเฮช เมื่อนำมาตีเป็นแผ่น หรือ ยืดเป็นเส้นจะได้ความแข็งแรงมากขึ้น

### 11.1.2 โครงสร้างสเปซแลตทิซใน เหล็ก และ เหล็กกล้า

เมื่อได้ศึกษาถึงสเปซแลตทิซทั้ง 4 ชนิดมาแล้ว โครงสร้าง เหล่านี้จะพบอยู่ในเหล็ก และเหล็กกล้า เมื่อโลหะเหล่านี้ถูก ปรับปรุงโครงสร้างผ่านการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อะตอม ของมันสามารถจัดรูปแบบโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะมีผลต่อ โลหะในด้านความแข็งแรง, ความแข็ง และความยืดหยุ่นของ เหล็ก

**กระบวนการปรับสภาพทางความร้อน (Heat-treating processes)** เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเหล็ก จนทำให้เหล็กเกิดเป็นรูปแบบเฟอร์ไรต์, ออสเทนไนต์ และมาเทน ไซต์ รายละเอียดรูปแบบของเหล็กจะมีดังนี้

❖ **เหล็กเฟอร์ริติก (Ferritic iron: เฟอร์ไรต์)** เป็นเหล็กโครงสร้างบีซีซี รูปแบบเหล็กเฟอร์ไรต์เป็นพื้นฐานของเหล็กทั่วไปที่อุณหภูมิของเหล็ก อยู่ในอุณหภูมิห้อง กล่าวให้ง่ายนั้นก็คือ มันเป็นเหล็กที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพทางความร้อนใด ๆ

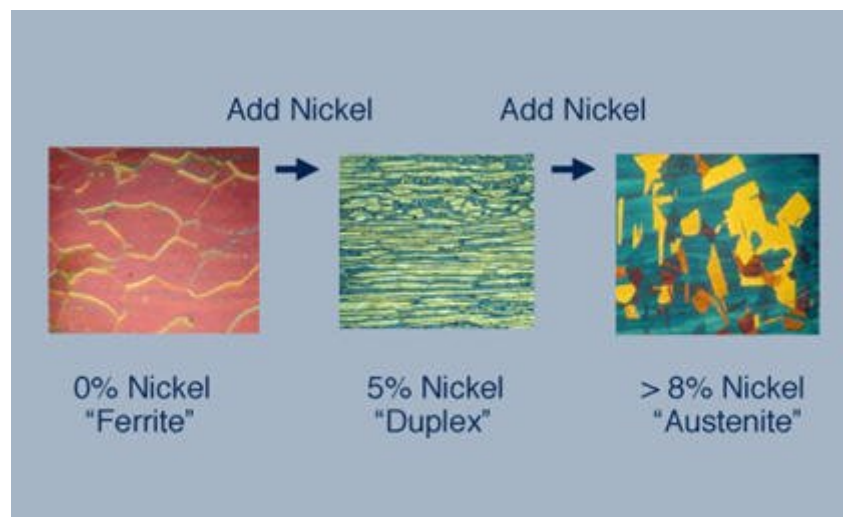
❖ **เหล็กออสเทนนิติก (Austenite: ออสเทนไนต์)** มีโครงสร้างเป็นเอฟซีซี ออสเทนไนต์จะเกิดขึ้นกับเหล็กเมื่อเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า เฟอร์ไรต์ได้กลายเป็นออสเทนไนต์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นออสเทนไนต์ อะตอมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายในผลึก

ในทางตรงกันข้าม เมื่อรูปแบบเหล็กออสเทนไนต์ถูกทำให้เกิดความเย็นลงอย่างช้า ๆ มันก็จะย้อนกลับไปเป็นรูปแบบเหล็กเฟอร์ไรต์

❖ **เหล็กมาเทนไซด์ (Martensite: มาเทนไซด์)** มีโครงสร้างแบบบีซีที โดยเหล็กจะเป็นรูปแบบเหล็กมาเทนไซด์ได้ก็ต่อเมื่อเหล็กถูกทำให้ร้อน และนำไป **ชุบแข็ง (Quenching)** อย่างรวดเร็ว ผลของการให้ความร้อน และผ่านการชุบแข็งอย่างทันที มีผลทำให้โลหะแข็งขึ้น ฉะนั้น จะพบว่าเหล็กมาเทนไซด์เป็นรูปแบบเหล็กที่มีความแกร่งที่สุด, แข็งที่สุด และเปราะง่ายที่สุด

## ดูข้อสรุป

- เหล็กทั่วไป (เหล็กเฟอร์ไรต์) (บีซีซี)      ให้ความร้อน →      เหล็กออสเตนไนต์ (เอฟซีซี)
- เหล็กออสเตนไนต์      ให้ความเย็นอย่างช้า ๆ →      เหล็กเฟอร์ไรต์
- เหล็กออสเตนไนต์      ผ่านการชุบแข็ง →      เหล็กมาเทนไซต์ (บีซีที)



รูปการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบเหล็กเฟอร์ไรต์ผ่านกระบวนการทางความร้อน และการผสมนิกเกิล (ตามรูป) จนกลายเป็นรูปแบบเหล็กออสเตนไนต์

ที่มา: <http://img.alibaba.com>

เฟอร์ไรต์	ออสเตนไนต์	มาเทนไซด์
สเปซแลตทิซแบบบีซีซี	สเปซแลตทิซแบบเอฟซีซี	สเปซแลตทิซแบบบีซีซี
อยู่ที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิห้อง)	อยู่ที่อุณหภูมิสูง	อยู่ที่อุณหภูมิต่ำ (อย่างรวดเร็ว)
เป็นแม่เหล็ก	ไม่เป็นแม่เหล็ก	เป็นแม่เหล็ก
ความแข็งน้อยกว่าเหล็กส่วนใหญ่	ไม่มีความแข็งแกร่ง	ความแข็งมากกว่าเหล็กส่วนใหญ่
อ่อน	(ไม่สามารถใช้ได้)	เปราะ
ความเค้นภายในเกิดขึ้นน้อยกว่าเหล็กส่วนใหญ่	(ไม่สามารถใช้ได้)	ความเค้นภายในเกิดขึ้นมากกว่าเหล็กส่วนใหญ่

ตารางที่ 11.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของเหล็ก เฟอร์ไรต์, ออสเตนไนต์ และ มาเทนไซด์

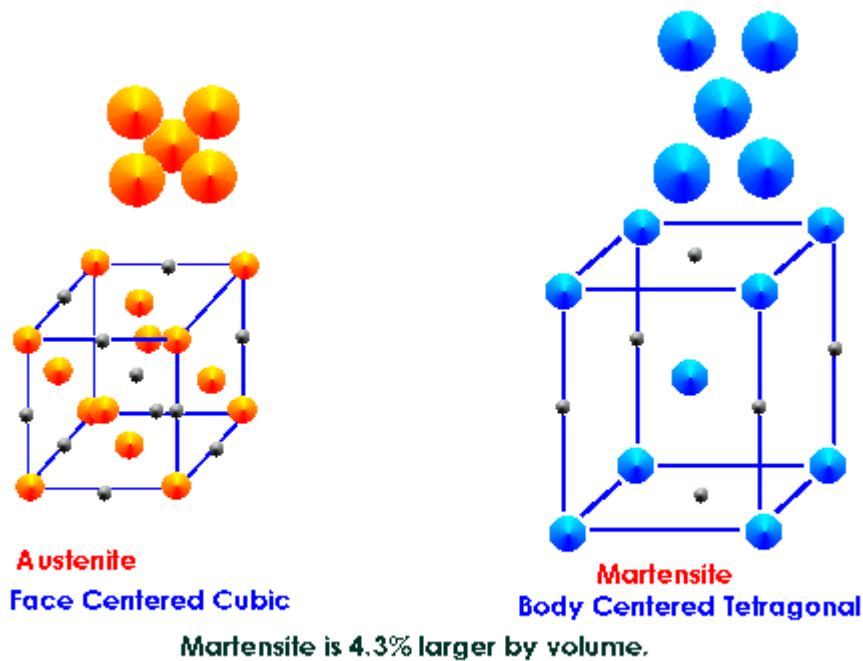
### 11.1.3 อุณหภูมิของการเปลี่ยนรูป

เหล็กเฟอร์ไรต์ถูกเปลี่ยนไปเป็น เหล็กออสเตนไนต์ เราลองมาทำความเข้าใจ ถึงหลักการเกี่ยวกับอุณหภูมิของการเปลี่ยนรูป (Transformation temperatures) โดยมีที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนก็คือ



1. อุณหภูมิของการเปลี่ยนรูปด้านต่ำ (Lower transformation temperature) คืออุณหภูมิที่โครงสร้างบีซีซีเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างเอฟซีซี นั่นก็คืออุณหภูมิที่เริ่มต้นเปลี่ยนจากเหล็กเฟอร์ไรต์ ไปเป็น เหล็กออสเตนไนต์ 100% อุณหภูมิการเปลี่ยนรูปสำหรับเหล็ก และเหล็กกล้าทั้งหมด อยู่ที่ประมาณ  $720^{\circ}\text{C}$  ( $1,330^{\circ}\text{F}$ )
2. อุณหภูมิของการเปลี่ยนรูปด้านสูง (Upper transformation temperature) คืออุณหภูมิที่ทำให้เหล็กที่มีโครงสร้างบีซีซีอย่างสมบูรณ์ เป็นเหล็กที่มีโครงสร้างแบบเอฟซีซี ณ อุณหภูมิตรงจุดนี้ จะไม่มีเหล็กเฟอร์ไรต์เหลืออยู่ แต่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นออสเตนไนต์สมบูรณ์แบบ 100% อุณหภูมิการเปลี่ยนรูปจะเปลี่ยนไปตามแต่ละชนิดของโลหะ ช่วงกว้างของอุณหภูมิของค่าด้านต่ำจะอยู่ที่  $720^{\circ}\text{C}$  ( $1,330^{\circ}\text{F}$ ) ส่วนค่าด้านสูงอยู่ที่  $1,100^{\circ}\text{C}$  ( $2,000^{\circ}\text{F}$ )

ถ้าเหล็กถูกชุบแข็งอย่างรวดเร็ว จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากออสเตนไนต์ไปเป็นมาเทนไซต์ (บีซีที) โดยจะไม่กลับคืนมาเป็นเหล็กเฟอร์ไรต์



รูปโครงสร้างเหล็กออสเตนไนต์ถูกเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเหล็กมาเทนไซต์

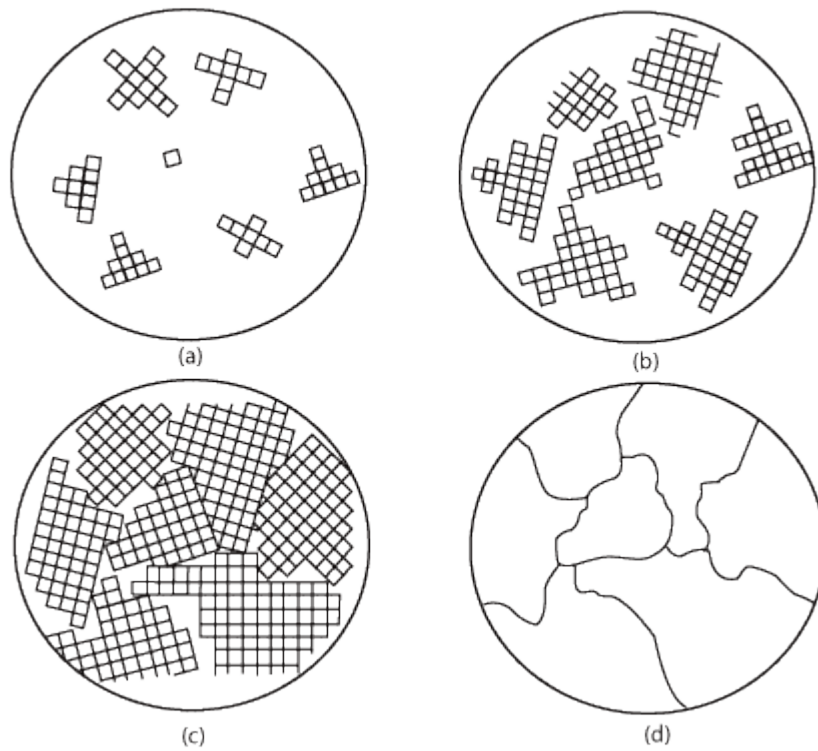
ที่มา: <http://www.metal-wear.com>

## 11.2 การเติบโตของผลึก (Crystal Growth)

เมื่อเหล็กถูกให้ความร้อนจนไปถึงอุณหภูมิของการเปลี่ยนรูปด้านสูง มันก็จะเกิดการหลอมเหลว จนกลายเป็นเหล็กหลอม แล้วเมื่อปล่อยให้มันเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ การเย็นตัวของโลหะเหลวจะเริ่มเป็นของแข็งจับตัวกัน และท้ายสุดก็กลายเป็นเหล็กเฟอร์ไรต์

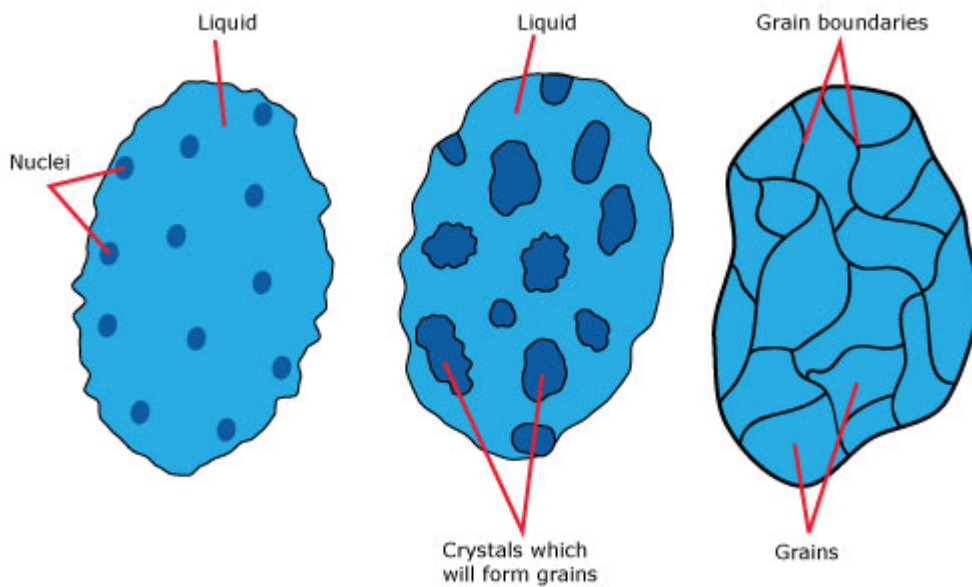
การเปลี่ยนแปลงจากเหล็กที่เป็นของเหลว จนเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง (หรือ การเติบโตของผลึก) แสดงให้เห็นในรูปแบบด้านล่าง





### รูปแสดงกระบวนการเติบโตของผลึก

ที่มา: <http://www.ndt-ed.org>



© 2007 - 2009 The University of Waikato | [www.sciencelearn.org.nz](http://www.sciencelearn.org.nz)

### รูปการเติบโตของผลึกของเหล็ก

ที่มา: <http://www.sciencelearn.org.nz>



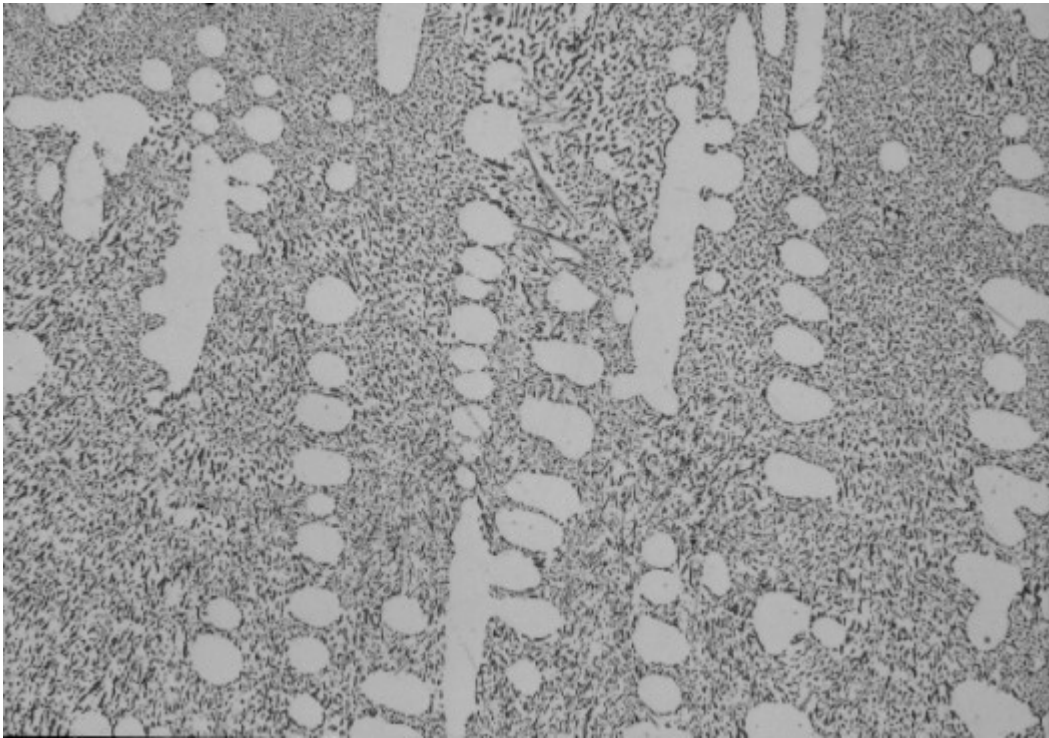
ที่นี่เรามาดูกระบวนการเติบโตของผลึก เหล็กเริ่มต้นจากสถานะของเหลวร้อน ต่อมาเมื่อมีการลดอุณหภูมิลงต่ำลงอย่างช้า ๆ ณ จุดจุดหนึ่งน้ำเหล็ก เมื่อเย็นพอ มันจะเริ่มจะจับตัวกันเป็นของแข็ง หน่วยเซลล์ก็จะเริ่มเป็นรูปเป็นร่างที่จุดนี้ (**เหล็กออสเตนไนต์**) ตามอุณหภูมิการเปลี่ยนรูป ยิ่งอุณหภูมิลดลงต่อเนื่องหน่วยเซลล์ก็จะเกิดมากขึ้น และหน่วยเซลล์ด้านข้างก็แผ่เป็นกิ่งก้านสาขา และมาเกาะเกี่ยว

การโตขึ้นเรื่อย ๆ และมีการแผ่เป็นแขนงกิ่งก้านสาขาเพื่อเกาะจับตัวรวมกันของสถานะของแข็ง จนเป็นโครงร่างที่กำลังเติบโต หรือออกขึ้นใหม่ แต่ยังไม่สมบูรณ์ เราเรียกส่วนที่กำลังแผ่กิ่งก้านนี้ว่า **กิ่งก้านยื่นแผ่ หรือเดนไดรต์ (Dendrites)**



[รูปตัวอย่างเดนไดรต์ที่กำลังยื่นออกมาจับตัวกัน](#)

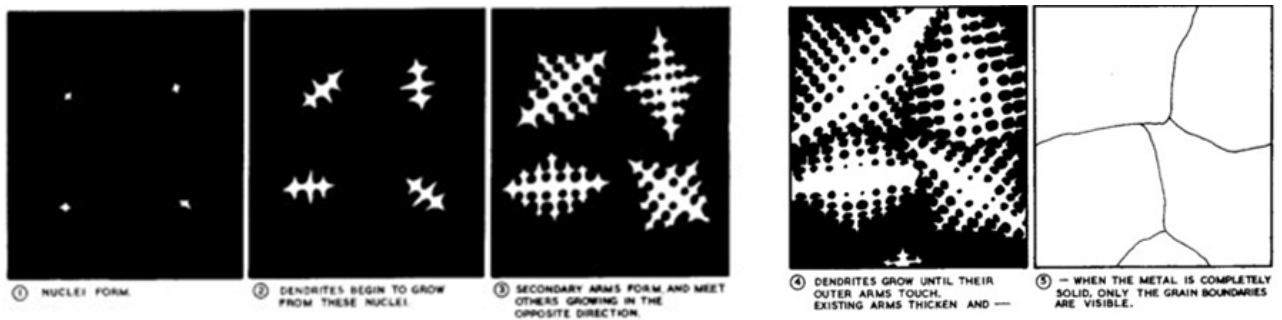
ที่มา: <http://www.metallographic.com>



### รูปเดนไดรต์ของโลหะผสมชนิดหนึ่ง

ที่มา: <http://www.metallographic.com>

เมื่อหน่วยเซลล์เริ่มมีมากขึ้นแล้ว จากเริ่มเป็นของแข็ง จนเกิดเดนไดรต์เริ่มจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดมีการแผ่กิ่งก้านแตกแขนงออกไปชนกับแขนงตัวข้างเคียง การโตขึ้นของเดนไดรต์มีอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดสภาพการณ์ที่เป็นของแข็งใกล้จะเสร็จสมบูรณ์ การแผ่ขยายของเดนไดรต์ก็จะขยายจนเต็มพื้นที่ จะหยุดก็ต่อเมื่อโลหะมีสภาพกลายเป็นของแข็งทั้งหมด

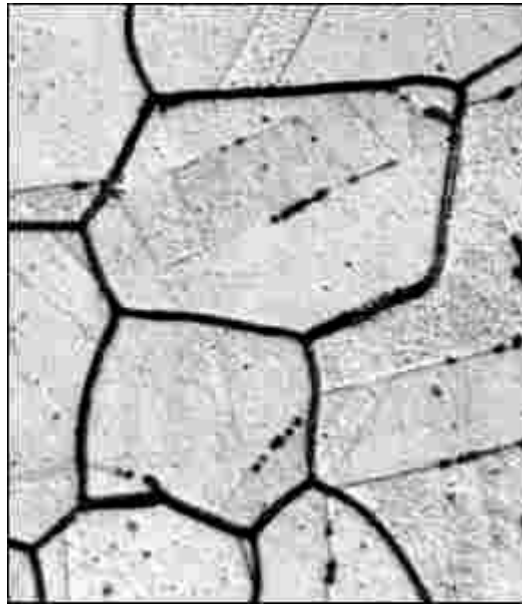


### รูปเหล็กหลอมเหลวที่อุณหภูมิลดลง และกำลังจับตัวกันเป็นกลุ่มของแข็ง

ทำให้เกิดมีอาณาบริเวณเป็นขอบเขตเล็ก ๆ ยิ่งอุณหภูมิลดลงอีกเรื่อย ๆ ขอบเขตของแข็งก็จะกลายเป็นแผ่นใหญ่ขึ้น ของแข็งแผ่นข้างเคียงก็เริ่มมาติดกัน จนกลายเป็นอาณาบริเวณขอบเขตกว้างขึ้นเรื่อย ๆ

การเข้าจับตัวกันเป็นก้อน จะได้เหล็กที่มีสถานะกลายเป็นของแข็งเย็นตัว (**เหล็กเฟอร์ไรต์**) แล้วลองนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบว่าเนื้อเหล็กจะมีขอบเขตเหมือนรอยแตก ซึ่งขอบเขตจะมีกระจายกระจายไปทั่วผืนโลหะ เล็กบ้างใหญ่บ้าง (**วัสดุบางชนิดอาจเห็นได้ด้วยตาเปล่า**)

ขอบเขตที่เกิดเด่นไตรท์แต่ละขอบเขตมีขนาดไม่เท่ากัน เนื่องมาจากการเติบโตของเดรนไตรท์เป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน ซึ่งจากการที่ไม่เท่ากันนี้เอง ทำให้เกิด **เกรน (Grain)** ซึ่งแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวที่ต่างกันเมื่อเกรนบริเวณข้างเคียงมาชนกันก็จะถูกแบ่งออกเป็นขอบเขต การแบ่งเส้นขอบเขตของแต่ละส่วน ซึ่งเราเรียกว่า **ขอบเขต หรือขอบเกรน (Grain Boundary)**



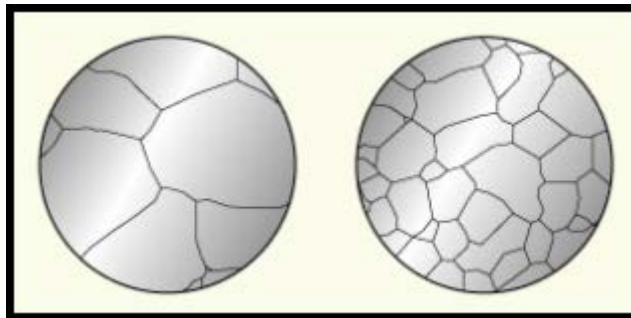
รูปเกรน และขอบเกรนของเหล็กเฟอไรต์

ที่มา: <http://corrosionlab.com>

## 11.3 ขนาดของเกรนเมื่อนำมาเทียบกับเวลา ในการทำความเย็น

ขนาดของเกรนของโลหะจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการเย็นตัวของโลหะ จากโลหะที่กำลังร้อนหลอมเหลว ถ้ายังทำให้การเย็นอย่างช้า ๆ นานขึ้นเท่าใด ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่มากขึ้น

ในทางกลับกัน เมื่อโลหะที่กำลังร้อนหลอมเหลว ถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วอัตราการเติบโตของเกรนก็จะมีเวลาที่จำกัด ทำให้เกรนมีขนาดเล็ก ผลของการทำความเย็นช้า และเร็วในโลหะให้ดูที่รูปด้านล่าง



รูปขนาดของเกรนซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาในการทำให้เย็น ด้านซ้ายทำให้เย็นอย่างช้า ๆ ด้านขวาทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว

ที่มา: <http://www.velteclabs.com>

**“การทำความเย็นอย่างช้า ๆ มีผลทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ การทำความเย็นอย่างรวดเร็วมีผลทำให้เกรนมีขนาดเล็ก”**

## ผลที่เกิดจากขนาดเกรน

ขนาดของเกรนจะมีผลต่อโลหะในด้านความแข็งแรง, ความแข็ง, ความเปราะ และความเหนียวของโลหะ โลหะที่มีขนาดเกรนที่ใหญ่ทำให้ถูกฉีก, ทำลาย หรือร้าวได้ง่าย เกรนโลหะที่มีขนาดเล็ก จะมีความต้านทานต่อการถูกทำลายที่สูงกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตก การแตกร้าวเล็ก ๆ ในโลหะยากมากกว่า

ขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่า ให้ความแข็งแรงที่มากกว่าขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่ เพราะฉะนั้น ในทางโลหะวิทยา จึงมี

ความพยายามที่จะทำให้เกรนมีขนาดเล็กเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อมีความต้องการใช้โลหะมีความแข็งแรง

ความแข็งแรง, ความแข็ง และความเปราะเป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กัน การที่ทำให้เกรนมีขนาดเล็กไม่เพียงแต่ทำให้เกิดลักษณะด้านความแข็งแรงที่ดีขึ้นเท่านั้น แต่มันยังส่งผลในด้านความแข็ง และความเปราะในโลหะอีกด้วย แต่ถ้าต้องการให้โลหะมีความเหนียวเป็นคุณสมบัติเด่นขนาดของเกรนจะต้องทำให้มีขนาดใหญ่

## 11.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเฟอร์ไรต์และมาเทนไซต์

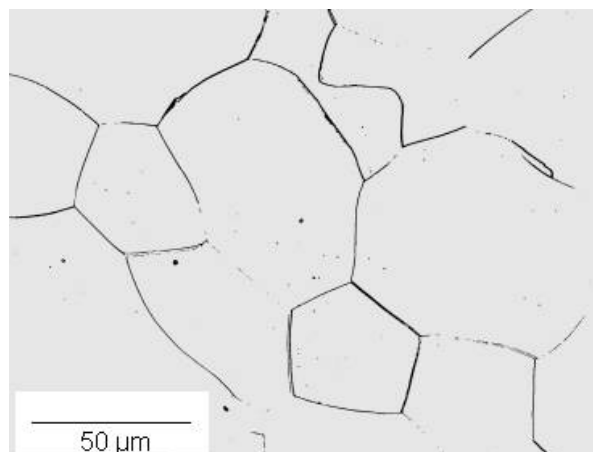
คุณสมบัติบางอย่างของเฟอร์ไรต์ และมาเทนไซต์ถูกเปรียบเทียบ ในตารางที่ 11.2



## ทำการเปรียบเทียบ ณ อุณหภูมิห้อง

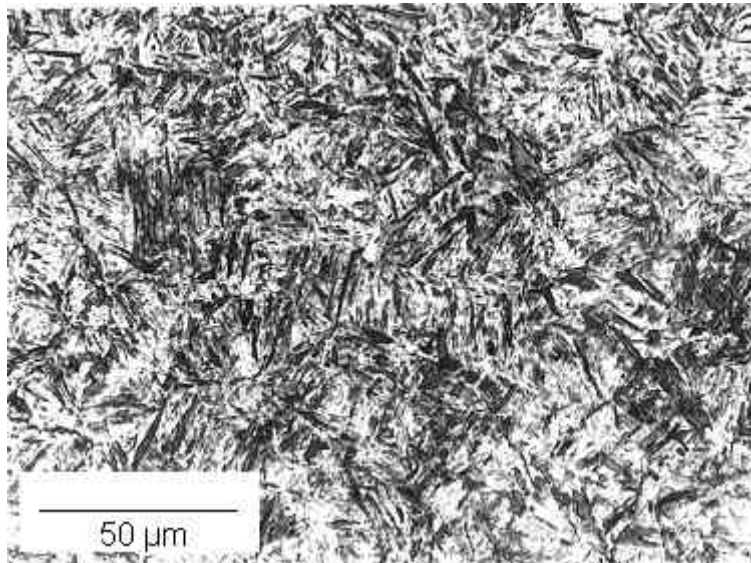
	เหล็กเฟอร์ไรต์	เหล็กมาเทนไซต์
ขนาดของเกรน	ใหญ่	เล็ก
ความเร็วการทำความเย็น	ช้า	เร็ว
ความแข็งแรง	ต่ำกว่า	สูงกว่า
ความแข็ง	ต่ำกว่า	สูงกว่า
ความเหนียว	เหนียว	เปราะ
การบิด/การแตกร้าว	มีแนวโน้มที่น้อย	มีแนวโน้มที่มาก
ความสามารถในการกลึง	ไม่ยาก	ยาก
กัดไฮ/การขึ้นรูป		

ตารางที่ 11.2 ตารางเปรียบเทียบโครงสร้างเหล็ก 2 ประเภทที่อุณหภูมิห้อง นั่นก็คือ เหล็กเฟอร์ไรต์ และเหล็กมาเทนไซต์



รูปเหล็กเฟอร์ไรต์

ที่มา: <http://threeplanes.net/>



### รูปเหล็กมาเทนไซด์

ที่มา: <http://threeplanes.net>

ข้อสังเกตโครงสร้างผลึกของเหล็กเฟอร์ไรต์ มีข้อดีอยู่ที่สามารถยืดได้มากกว่า ดังนั้น เหล็กเฟอร์ไรต์สามารถถูกนำไปกระทำการกลึงกัดไสได้ง่ายกว่า โดยขณะกระทำจะก่อให้เกิดรอยแตกร้าวได้น้อยกว่า

ส่วนโครงสร้างผลึกของเหล็กมาเทนไซด์ จะตรงกันข้ามกัน มีข้อดี ในด้านมีความแข็งแรง และความแข็งสูงกว่า แต่มันก็มีความเปราะมากกว่าเช่นกัน เมื่อมีแรงมากระทำจึงก่อให้เกิดรอยแตกได้มากกว่า และทำให้เกิดการเสียรูปได้มากกว่าเหล็กเฟอร์ไรต์ สาเหตุที่เป็นแบบนี้ก็เนื่องมาจากกระบวนการทำความเย็นเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน เพื่อต้องการให้ได้เกรนที่มีขนาดเล็ก

**จบบทที่ 11**

