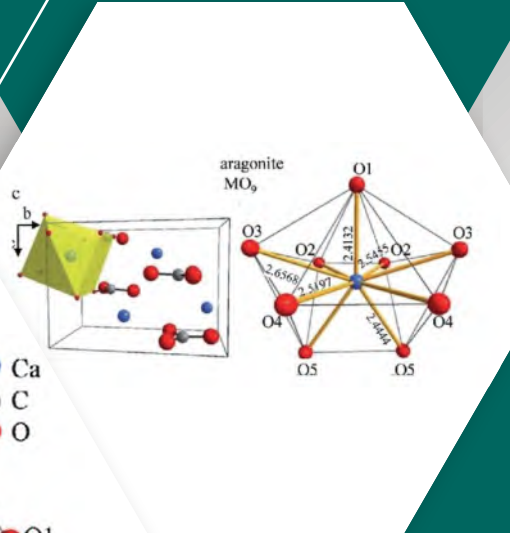
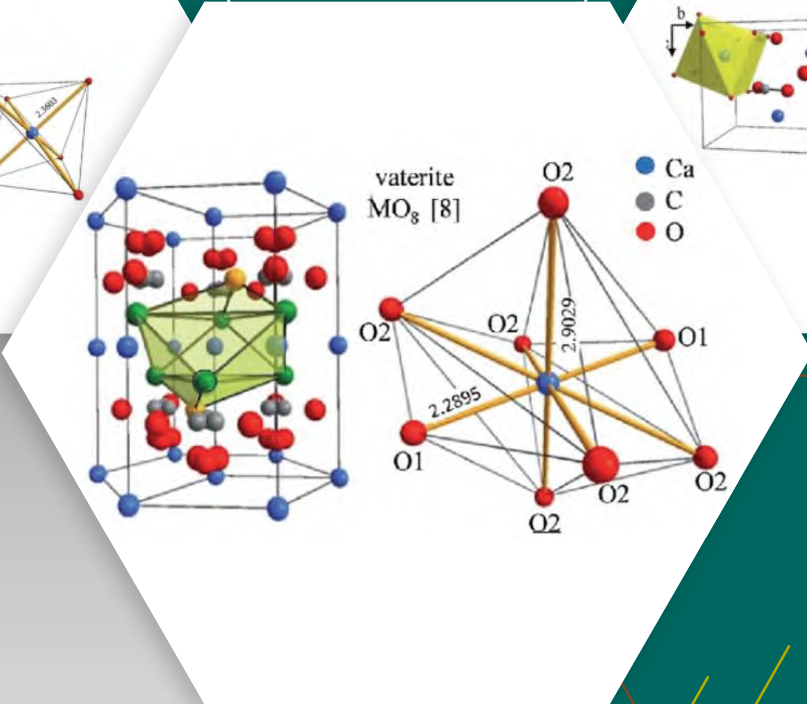
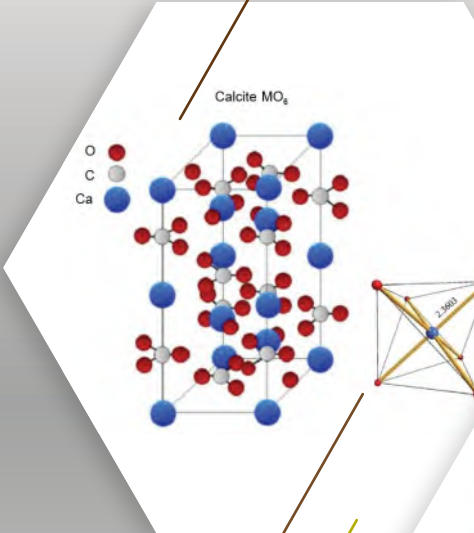
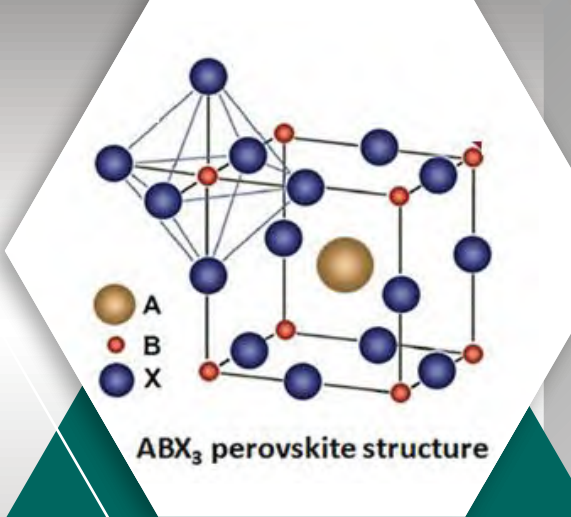


นวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ

Innovative Materials Engineering



Calcium

atomic number	20	atomic weight	40.078
symbol	Ca	acid-base properties of higher-valence oxides	●
electron configuration	[Ar]4s ²	crystal structure	■
name	calcium	physical state at 20 °C (68 °F)	—

Alkaline-earth metals	Solid
Face-centred cubic	Strongly basic

บุชนภา ตั้งบริบูรณ์

นวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ
(Innovative Materials Engineering)

นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

นวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ
(Innovative Materials Engineering)

จัดทำโดย รศ.ดร. นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ISBN ๙๗๘-๖๑๖-๖๐๘-๑๐๕-๓

จัดพิมพ์ครั้งที่ ๑
จำนวนพิมพ์ ๕๐๐ เล่ม
ปีที่พิมพ์ พ.ศ. ๒๕๖๖
จำนวน ๕๘๐ หน้า

พิมพ์ที่ สำนักพัฒนาการเรียนรู้ตลอดชีวิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เลขที่ ๕๐ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๐
โทรศัพท์ ๐-๒๙๔๒-๘๐๔๙

คำนำ

หนังสือเล่มนี้ผู้เขียนได้เรียบเรียงองค์ความรู้จากประสบการณ์การศึกษา ค้นคว้าวิจัย และการรวบรวมองค์ความรู้จากหลักการ ทฤษฎีทางวิชาการ การค้นคว้าเพิ่มเติมจากตำราและเอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้องตามเอกสารอ้างอิงท้ายเล่ม โดยผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ให้กับอาจารย์ นิสิต นักวิจัย รวมทั้งผู้ที่มีความสนใจในศาสตร์และองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมวัสดุและเพื่อเป็นการเผยแพร่องค์ความรู้-ประโยชน์ของการรีไซเคิลวัสดุที่ใช้แล้วกลับมาทดแทนหรือใช้ซ้ำ เนื่องจากวัสดุที่ใช้แล้วเหล่านั้นอาจมีประโยชน์และสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นหรือสารตัวเติมในกระบวนการผลิตได้โดยอาศัยองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีการผลิต นวัตกรรมวัสดุ และสมบัติด้านวิศวกรรมวัสดุ เพื่อพัฒนาการใช้วัสดุทดแทนให้เป็นแหล่งทรัพยากรที่มีคุณค่าและเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมลดน้อยลงจากการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ซ้ำ รวมทั้งเป็นกระบวนการจัดการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมส่งเสริมต่อยอดงานด้านนวัตกรรมวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมสีเขียว ลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนสู่สิ่งแวดล้อมจากภาคอุตสาหกรรม ชุมชนและสังคม ลดการใช้ทรัพยากรจากแร่ธาตุในธรรมชาติซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม ชุมชนและสังคมมีอยู่จำนวนมากซึ่งบางวัสดุก็เป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีศักยภาพและมีปริมาณมาก การนำกลับมาใช้ซ้ำส่งผลดีทั้งเรื่องการลดราคาต้นทุนการผลิต ลดขั้นตอนในกระบวนการผลิต เพิ่มศักยภาพผลิตภัณฑ์ใหม่และเพิ่มทางเลือกของการลดกากของเสีย รวมทั้งเป็นการรณรงค์ให้ผู้ผลิตและผู้บริโภคได้ช่วยกันรักษาสิ่งแวดล้อม รักษาระบบนิเวศในธรรมชาติให้คงสภาพที่ดี เป็นการช่วยลดมลภาวะเป็นพิษต่อสังคม-ชุมชนและอุตสาหกรรม ก่อเกิดนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีใหม่ โดยผู้เขียนได้เรียบเรียงมิติที่เกี่ยวข้องกับนวัตกรรมวัสดุทั้งด้านวัสดุ กระบวนการผลิต คุณสมบัติด้านวัสดุหลักเกณฑ์กำหนดผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมทั้งแง่องค์ความรู้ทั่วไปด้านเศรษฐศาสตร์ และองค์ความรู้ด้านวิชาการ โดยผู้เขียนหวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทุกท่านแต่หากผิดพลาดประการใดก็ขออภัยไว้ ณ ที่นี้

นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและครอบครัวที่ให้อำนาจใจในการเขียนและการเรียบเรียงหนังสือนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุเล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีที่ผู้เขียนหวังว่าจะก่อเกิดประโยชน์ให้กับท่านผู้ที่สนใจศึกษาหาความรู้ด้านนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุต่อไปในอนาคต

ผู้เขียนขอขอบพระคุณบรรพคณาจารย์ทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในการเขียน เรียบเรียง และการจัดทำหนังสือเล่มนี้ เพื่อเป็นวิทยาทานให้กับนิสิตและผู้สนใจศึกษาหาความรู้ด้านนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านศาสตราจารย์อาวุธโสที่ได้ให้คำแนะนำการเขียนหนังสือเล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นเพื่อเป็นประโยชน์ต่อแวดวงวิชาการและการศึกษาทั่วไป

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านทั้งคณาจารย์ประจำภาควิชาฯ บุคลากร และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุน และการอำนวยความสะดวกด้านการเขียน การจัดทำหนังสือเล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบคุณเจ้าของผลงานทุกท่านที่เผยแพร่องค์ความรู้ ตำรา และเอกสารทางวิชาการเชิงสาธารณะทั้งในและต่างประเทศที่ผู้เขียนได้สืบค้นและรวบรวมนำมาประกอบไว้บางส่วนอยู่ในหนังสือฉบับนี้ตามเอกสารอ้างอิงท้ายเล่ม ทำให้การจัดทำหนังสือเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทนำ วัตถุประสงค์	1
บทที่ 1 การศึกษาคำจำกัดความและความหมายของวิศวกรรมวัสดุ	2
บทที่ 2 กระบวนการผลิตด้านวิศวกรรมวัสดุ	48
บทที่ 3 องค์ประกอบเฟสและเฟสไดอะแกรมที่สัมพันธ์กับวิศวกรรมวัสดุ	164
บทที่ 4 สมบัติทางกลที่สัมพันธ์กับวิศวกรรมวัสดุ	190
บทที่ 5 สมบัติทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับวิศวกรรมวัสดุ	208
บทที่ 6 สมบัติทางแสงที่สัมพันธ์กับวิศวกรรมวัสดุ	270
บทที่ 7 สมบัติทางแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับวิศวกรรมวัสดุ	306
บทที่ 8 สมบัติทางความร้อนที่สัมพันธ์กับวิศวกรรมวัสดุ	344
บทที่ 9 เทคโนโลยีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มคุณลักษณะและสมบัติที่ดีให้กับงานวิศวกรรมวัสดุ	362
บทที่ 10 การวิเคราะห์ทดสอบคุณลักษณะและสมบัติด้านต่างๆของงานวิศวกรรมวัสดุ	390
บทที่ 11 การพัฒนานวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ	424
บทที่ 12 การพัฒนาวัสดุทดแทนสำหรับนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ	460
เอกสารอ้างอิง	550
ภาคผนวก 1 ค่าคงตัวทางฟิสิกส์	564
ภาคผนวก 2 ความหนาแน่นของวัสดุ	565
ภาคผนวก 3 โครงสร้างและสมบัติของธาตุบางชนิด	566
ภาคผนวก 4 สัญลักษณ์และคำย่อที่สำคัญ	568
ภาคผนวก 5 ขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐาน U.S.	572
ภาคผนวก 6 ดัชนีหักเหของแสง	573
ภาคผนวก 7 อุณหภูมิวิกฤติของสารตัวนำยิ่งยวด (Superconductor)	574
ภาคผนวก 8 สมบัติเฟอร์โรแมกเนติก เฟอร์ไรต์ และ การ์เน็ต	574
ภาคผนวก 9 อุณหภูมิเนล (Néel temperature) ของแอนไทเฟอร์โรแมกเนติก	575
ภาคผนวก 10 สมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริก	576
ภาคผนวก 11 สมบัติทางกลของวัสดุเซรามิก	577
ภาคผนวก 12 สมบัติทางความร้อนและทางไฟฟ้าของวัสดุเซรามิก	578

สารบัญ

บทที่	หน้า
ภาคผนวก 13การวัดอุณหภูมิในเตาเผาด้วย Cone	579

- วัตถุประสงค์**
1. การศึกษาคำจำกัดความและความหมายของวิศวกรรมวัสดุ
 2. การศึกษาโครงสร้าง ทฤษฎีและการจำแนกประเภทวัสดุ
 3. การศึกษากระบวนการผลิตวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรม
 4. การศึกษาเฟสและองค์ประกอบเฟสสำหรับกระบวนการผลิต
 5. การศึกษาสมบัติทางกล ไฟฟ้า แสง แม่เหล็กและความร้อนของวัสดุ
 6. การศึกษาการพัฒนานวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ
 6. การพัฒนาวัสดุและวัสดุทดแทนจากวัสดุชีวภาพและวัสดุอุตสาหกรรมเพื่อลดการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติและเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ในอนาคต

V · T · E

Periodic table

Group

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

Hydrogen & alkali metals

Alkaline earth metals

Triels

Tetrels

Prictogens

Chalcogens

Halogens

Noble gases

Period

Hydrogen

Helium

1

1

H

1.0080

2

He

4.0026

2

Lithium

Beryllium

Boron

Carbon

Nitrogen

Oxygen

Fluorine

Neon

3

3

Li

6.94

4

4

Be

9.0122

5

5

B

10.81

6

6

C

12.011

7

7

N

14.007

8

8

O

15.999

9

9

F

18.998

10

10

Ne

20.180

3

Sodium

Magnesium

Argon

3

11

Na

22.990

12

12

Mg

24.305

13

13

Al

26.982

14

14

Si

28.085

15

15

P

30.974

16

16

S

32.06

17

17

Cl

35.45

18

18

Ar

39.95

4

Potassium

Calcium

Scandium

Titanium

Vanadium

Chromium

Manganese

Iron

Cobalt

Nickel

Copper

Zinc

Gallium

Germanium

Arsenic

Selenium

Bromine

Krypton

4

19

K

39.098

20

20

Ca

40.078

21

21

Sc

44.956

22

22

Ti

47.867

23

23

V

50.942

24

24

Cr

51.996

25

25

Mn

54.938

26

26

Fe

55.845

27

27

Co

58.933

28

28

Ni

58.693

29

29

Cu

63.546

30

30

Zn

65.38

31

31

Ga

69.723

32

32

Ge

72.630

33

33

As

74.922

34

34

Se

78.971

35

35

Br

79.904

36

36

Kr

83.798

5

Rubidium

Strontium

Yttrium

Zirconium

Niobium

Molybdenum

Technetium

Ruthenium

Rhodium

Palladium

Silver

Cadmium

Indium

Tin

Antimony

Tellurium

Iodine

Xenon

5

37

Rb

85.468

38

38

Sr

87.62

39

39

Y

88.906

40

40

Zr

91.224

41

41

Nb

92.906

42

42

Mo

95.95

43

43

Tc

[97]

44

44

Ru

101.07

45

45

Rh

102.91

46

46

Pd

106.42

47

47

Ag

107.87

48

48

Cd

112.41

49

49

In

114.82

50

50

Sn

118.71

51

51

Sb

121.76

52

52

Te

127.60

53

53

I

126.90

54

54

Xe

131.29

6

Caesium

Barium

Lutetium

Hafnium

Tantalum

Tungsten

Rhenium

Osmium

Iridium

Platinum

Gold

Mercury

Thallium

Lead

Bismuth

Po

Astatine

Radon

6

55

Cs

132.91

56

56

Ba

137.33

*

71

Lu

174.97

72

72

Hf

178.49

73

73

Ta

180.95

74

74

W

183.84

75

75

Re

186.21

76

76

Os

190.23

77

77

Ir

192.22

78

78

Pt

195.08

79

79

Au

196.97

80

80

Hg

200.59

81

81

Tl

204.38

82

82

Pb

207.2

83

83

Bi

208.98

84

84

Po

[209]

85

85

At

[210]

86

86

Rn

[222]

7

Francium

Radium

Lawrencium

Rutherfordium

Dubnium

Seaborgium

Bohrium

Hassium

Meitnerium

Darmstadtium

Roentgenium

Copernicium

Nihonium

Flerovium

Moscovium

Livermorium

Tennessee

Oganesson

7

87

Fr

[223]

88

88

Ra

[226]

*

103

Lr

[266]

104

104

Rf

[267]

105

105

Db

[268]

106

106

Sg

[269]

107

107

Bh

[270]

108

108

Hs

[269]

109

109

Mt

[278]

110

110

Ds

[281]

111

111

Rg

[282]

112

112

Cn

[285]

113

113

Nh

[286]

114

114

Fl

[289]

115

115

Mc

[290]

116

116

Lv

[293]

117

117

Ts

[294]

118

118

Og

[294]

*

Lanthanum

Cerium

Praseodymium

Neodymium

Promethium

Samarium

Europium

Gadolinium

Terbium

Dysprosium

Holmium

Erbium

Thulium

Ytterbium

*

57

La

138.91

58

58

Ce

140.12

59

59

Pr

140.91

60

60

Nd

144.24

61

61

Pm

[145]

62

62

Sm

150.36

63

63

Eu

151.96

64

64

Gd

157.25

65

65

Tb

158.93

66

66

Dy

162.50

67

67

Ho

164.93

68

68

Er

167.26

69

69

Tm

168.93

70

70

Yb

173.05

*

Actinium

Thorium

Protactinium

Uranium

Neptunium

Plutonium

Americium

Curium

Berkelium

Californium

Einsteinium

Fermium

Mendelevium

Nobelium

*

89

Ac

[227]

90

90

Th

232.04

91

91

Pa

231.04

92

92

U

238.03

93

93

Np

[237]

94

94

Pu

[244]

95

95

Am

[243]

96

96

Cm

[247]

97

97

Bk

[247]

98

98

Cf

[251]

99

99

Es

[252]

100

100

Fm

[257]

101

101

Md

[258]

102

102

No

[259]

Primordial

From decay

Synthetic

Border shows natural occurrence of the element

Ca: 40.078 — Abridged value (uncertainty omitted here)^[2]

Standard atomic weight $A_{\text{r, std}}(\text{E})$ ^[1]Po: [209] — mass number of the most stable isotope

s-block

f-block

d-block

p-block

Group

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

Period

Nonmetals

1

H

2

He

Metals

2

3

Li

4

Be

3

11

Na

12

Mg

4

19

K

20

Ca

5

37

Rb

38

Sr

6

55

Cs

56

Ba

La to Yb

7

87

Fr

88

Ra

Ac to No

Transition metals

(sometimes excl. group 12)

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

Sc

Ti

V

Cr

Mn

Fe

Co

Ni

Cu

Zn

Ga

Ge

As

Se

Br

Kr

Y

Zr

Nb

Mo

Tc

Ru

Rh

Pd

Ag

Cd

In

Sn

Sb

Te

I

Xe

Lu

Hf

Ta

W

Re

Os

Ir

Pt

Au

Hg

Tl

Pb

Bi

Po

At

Rn

Lr

Rf

Db

Sg

Bh

Hs

Mt

Ds

Rg

Cn

Nh

Fl

Mc

Lv

Ts

Og

s-block

f-block

d-block

p-block (excl. He)

Lanthanides

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

Actinides

Ac

Th

Pa

U

Np

Pu

Am

Cm

Bk

Cf

Es

Fm

Md

No

Some elements near the dashed staircase are sometimes called *metalloids*

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

B

C

N

O

F

Ne

Al

Si

P

S

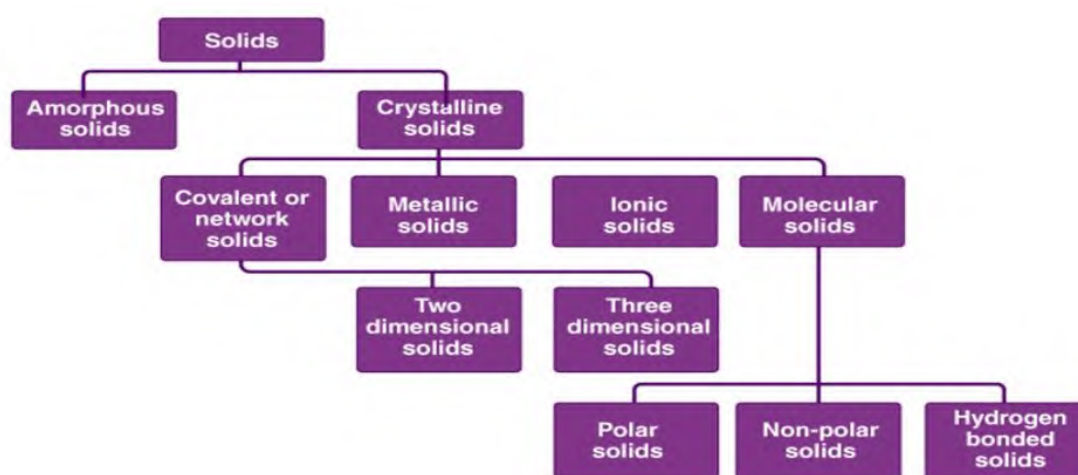
Cl

Ar

บทที่ 1

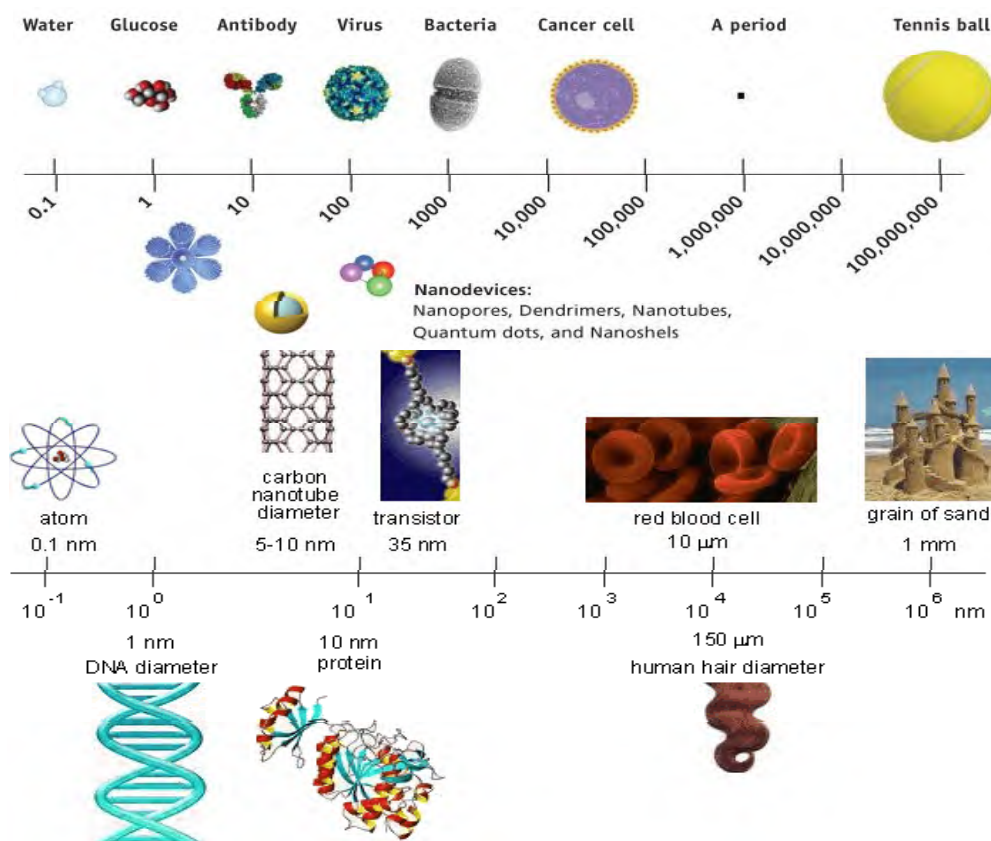
การศึกษาคำจำกัดความและความหมายของวิศวกรรมวัสดุ

คำว่า วิศวกรรมวัสดุ คือการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทั้งด้านกายภาพ ทางเคมี โครงสร้างและสมบัติของวัสดุ โดยอาศัยองค์ความรู้จากหลายหลายสาขาวิชา ได้แก่ ฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ เคมี ชีววิทยา ธรณีวิทยา ไฟฟ้า แสง แม่เหล็ก ความร้อน การแพทย์ และเภสัชกรรมประกอบเข้าด้วยกัน รวมทั้งองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยี กลไก ชิ้นส่วนและเครื่องจักรกล เพื่อก่อให้เกิดนวัตกรรมและเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมวัสดุ โดยมุ่งเน้นการพัฒนางานด้านวัสดุสมัยใหม่ ที่อยู่ในสถานะของแข็ง (solid state) มีโครงสร้างเฉพาะแต่ละชนิดวัสดุ ทั้งในระดับอะตอม หรือโมเลกุล ดังรูปที่ 1.1

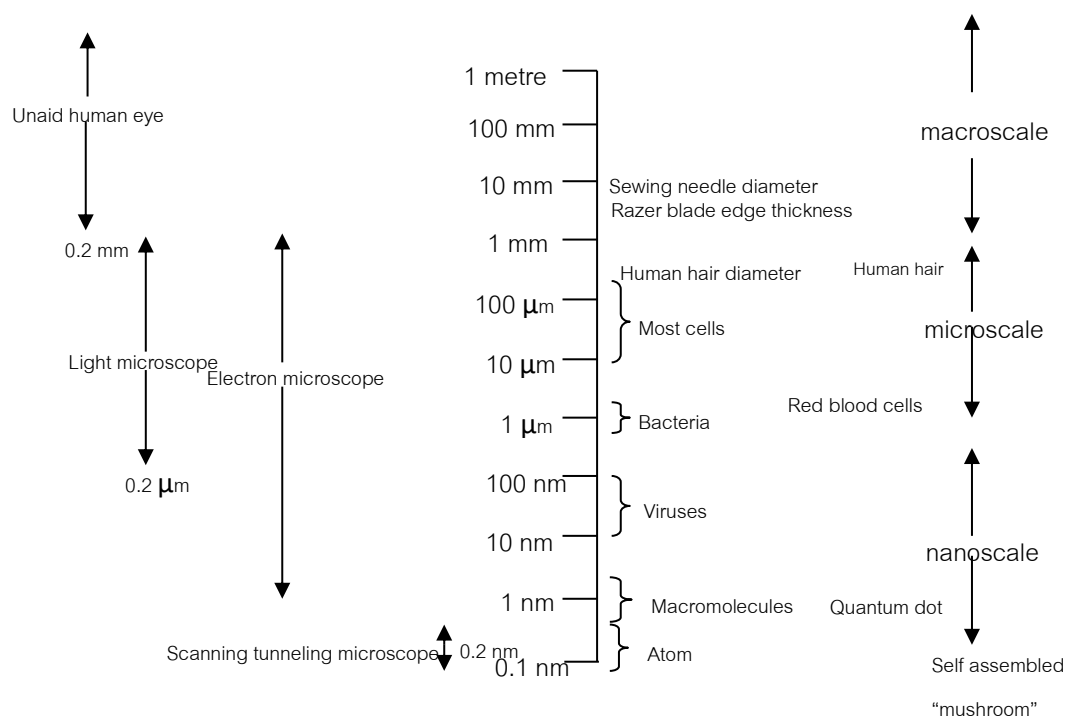


รูปที่ 1.1 แผนภาพการจำแนกวัสดุของแข็ง (Solid materials)

เนื่องจากพื้นฐานทางโครงสร้างของวัสดุที่มีสมบัติหลายประการทั้งด้านไฟฟ้า แสง แม่เหล็ก ความร้อน ทางกล ส่งผลให้การศึกษาด้านวิศวกรรมวัสดุจึงประกอบด้วยองค์ความรู้หลายด้าน จึงจำเป็นต้องเข้าใจคุณลักษณะ ชนิด ประเภทและสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุ ด้วยการวิเคราะห์ ทดสอบจากเครื่องมือและเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมเพื่อช่วยทำให้เกิดความเข้าใจศาสตร์ด้านวิศวกรรมวัสดุได้ชัดเจนมากขึ้น เพื่อการนำวิชาการด้านวิศวกรรมวัสดุต่อยอด พัฒนาให้เกิดนวัตกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ให้กว้างขวางมากขึ้น ลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้น้อยลง ลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เพิ่มความสะดวก ประหยัดเวลาและพลังงาน เพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ลดต้นทุนการผลิต โดยจำเป็นต้องพัฒนาการออกแบบ กระบวนการผลิตทางวิศวกรรมให้สูงขึ้น เพื่อตอบเจตจำนงความต้องการการใช้งานในหลากหลายด้าน การศึกษาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมวัสดุเบื้องต้น ควรทำความเข้าใจเรื่องขนาดอนุภาค ดังรูปที่ 1.2

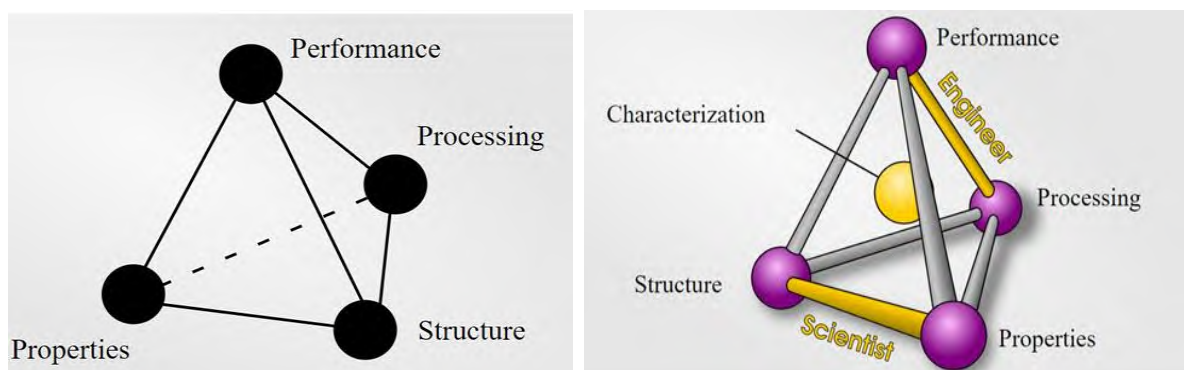


รูปที่ 1.2 ตัวอย่างวัสดุที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ที่มา Richard P. Feynman, 2003



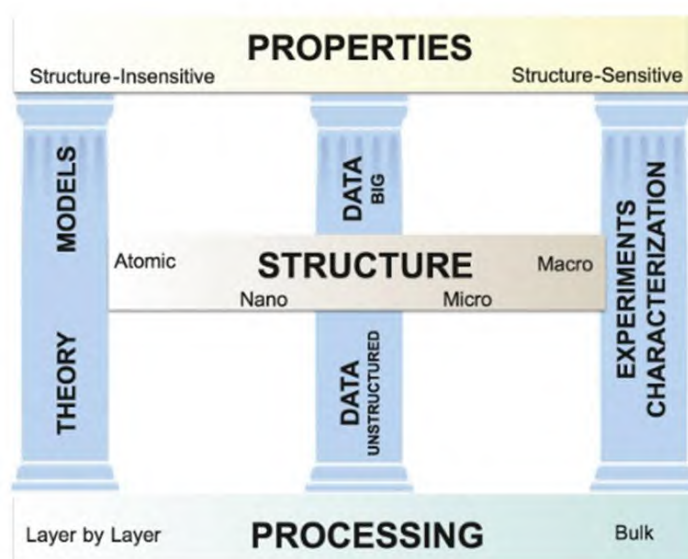
รูปที่ 1.3 การจัดลำดับขนาดอนุภาคของวัสดุ ที่มา Richard P. Feynman, 2003

จากรูปที่ 1.2 และ 1.3 วัสดุมีขนาดแตกต่างกันที่สามารถพบได้ทั่วไปหลายขนาดเช่น มิลลิเมตร ไมโครเมตร นาโนเมตร ส่งผลต่อสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุทำให้มีความแตกต่างกันดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ของวัสดุ-กระบวนการผลิต-และสมบัติเดิมของวัสดุ

เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่มีสมบัติโดดเด่นมากขึ้น จากความสัมพันธ์ของโครงสร้าง-กระบวนการผลิต-สมบัติของวัสดุและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์วัสดุมีลักษณะเป็นรูปปริมาตรสามเหลี่ยมมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันที่ประสานและสอดคล้องกัน การเลือกใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์เพื่อการตรวจวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ก็มีความสำคัญและมีความจำเป็นต่อระบบการผลิตด้านวัสดุด้วยเช่นกันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี เหมาะต่อการใช้งาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แข็งแรง ทนทาน เนื่องจากความสัมพันธ์ของโครงสร้างตั้งแต่หน่วยย่อยที่เล็กสุดระดับอะตอม นาโนเมตร ไมโครเมตร ส่งผลต่อสมบัติโดยรวม (macroscale) ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ของกระบวนการผลิต โครงสร้าง และสมบัติของผลิตภัณฑ์

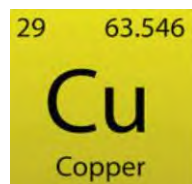
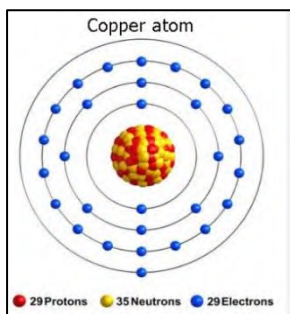
ดังนั้นโครงสร้างของวัสดุเป็นเรื่องแรกที่เราควรทำความเข้าใจในเบื้องต้น โดยทั่วไปวัสดุอาจมีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน เนื่องจากกระบวนการเตรียม การสังเคราะห์ การสกัด หรือการบดย่อยวัสดุและวัตถุดิบทั้งหลายนั้นมี

หลากหลายวิธี ดังนั้นในเบื้องต้นจึงควรทำความเข้าใจเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเป็นไปตามลำดับ โดยเริ่มต้นด้วยการจำแนกประเภทวัสดุ ตามหลักการของงานวิศวกรรมวัสดุดังนี้ คือ

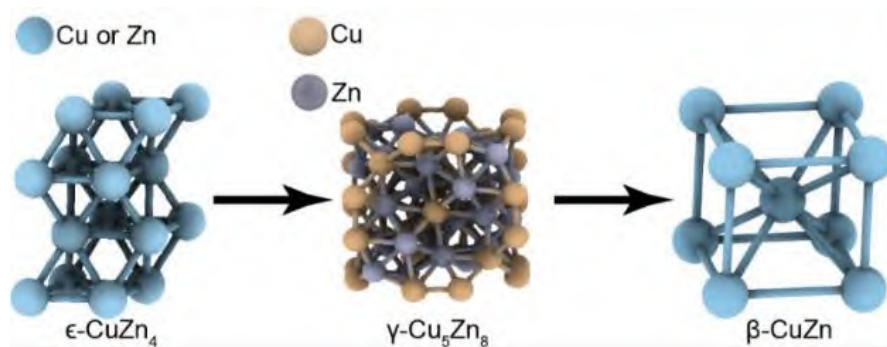
1. วัสดุโลหะ (metallic materials) ประกอบด้วย 2 กลุ่มวัสดุโลหะที่ประกอบกันด้วยพันธะโลหะ (metallic bonding) ดังนี้คือ

1.1 โลหะบริสุทธิ์เกิดจากธาตุเพียงชนิดเดียว เช่น ทองแดง (Cu), ทองคำ (Au), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe), ไททาเนียม (Ti), เงิน (Ag) เป็นต้น ดังรูปที่ 1.6

1.2 โลหะอัลลอยด์ประกอบด้วยธาตุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เช่น ทองเหลือง (Brass), นาก, นิกโครม, บรอนซ์ แมกนีเซียมอัลลอยด์ เป็นต้น ดังรูปที่ 1.7

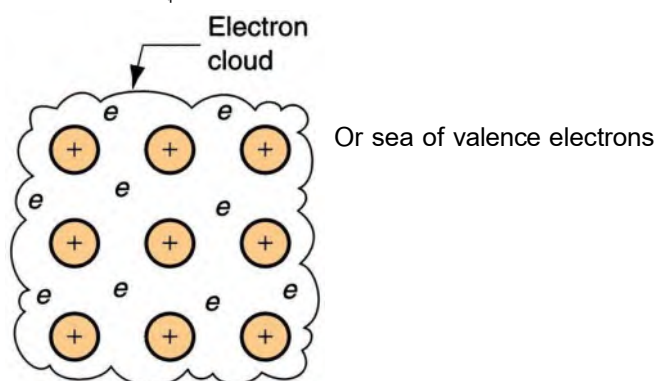


รูปที่ 1.6 โครงสร้างอะตอมของธาตุทองแดงบริสุทธิ์



รูปที่ 1.7 โครงสร้างอะตอมของทองเหลือง Wang et al.

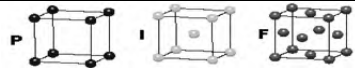
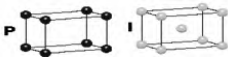
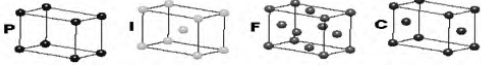
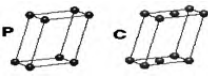
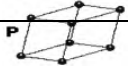
การยึดเกาะระหว่างอะตอมเกิดขึ้นเนื่องจากพันธะโลหะที่มีการรวมกลุ่มเรียกว่า sea of electrons or cloud of electron ดังรูปที่ 1.8 ทำให้โลหะมีคุณลักษณะและสมบัติพิเศษคือการนำความร้อน การนำไฟฟ้าสูง



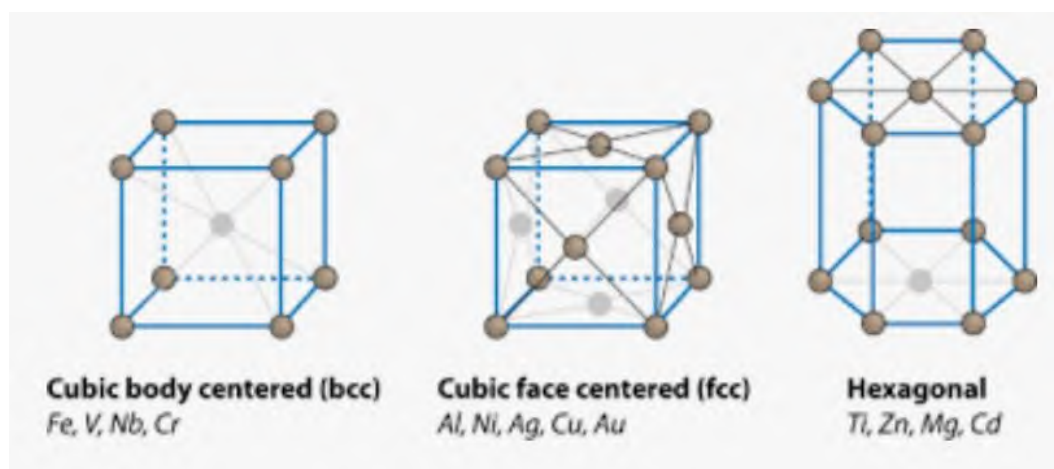
รูปที่ 1.8 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของพันธะโลหะ

โดยโครงสร้างผลึกจะจัดเรียงตามระบบ Bravais lattice ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ที่มีโครงสร้างทั้งหมด 14 รูปแบบ

ตารางที่ 1.1 โครงสร้างผลึกตามมาตรฐาน Bravais Lattice

ชนิดของผลึก (Types of Crystal)	แลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameter)	รูปแบบผลึก
คิวบิก (Cubic)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (Tetragonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เฮกซะโกนอล (Hexagonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมโนคลินิก (Monoclinic)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 120^\circ$	
ไตรคลินิก (Triclinic)	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	
ไตรโกนอล (Trigonal)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

ตัวอย่างผลึกของวัสดุโลหะ ดังรูปที่ 1.9 และตารางที่ 1.2



รูปที่ 1.9 โครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะบริสุทธิ์

ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างโครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะบริสุทธิ์

<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure^a</i>	<i>Atomic Radius^b (nm)</i>	<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure</i>	<i>Atomic Radius (nm)</i>
Aluminum	FCC	0.1431	Molybdenum	BCC	0.1363
Cadmium	HCP	0.1490	Nickel	FCC	0.1246
Chromium	BCC	0.1249	Platinum	FCC	0.1387
Cobalt	HCP	0.1253	Silver	FCC	0.1445
Copper	FCC	0.1278	Tantalum	BCC	0.1430
Gold	FCC	0.1442	Titanium (α)	HCP	0.1445
Iron (α)	BCC	0.1241	Tungsten	BCC	0.1371
Lead	FCC	0.1750	Zinc	HCP	0.1332

^aFCC = face-centered cubic; HCP = hexagonal close-packed; BCC = body-centered cubic.
^bA nanometer (nm) equals 10^{-9} m; to convert from nanometers to angstrom units ($\text{\AA}$), multiply the nanometer value by 10

จากตารางดังกล่าวข้างต้น วัสดุโลหะจะมีโครงสร้างผลึกตามระบบผลึก Bravais lattice ที่มีค่ารัศมีอะตอมแตกต่างกัน สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นตามทฤษฎีและสมการการเรียงตัวของโครงสร้างผลึก (APF) ได้จากสมการ

$$\rho = \frac{\sum A}{NV} = \frac{\sum A}{(6.02 \times 10^{23})(V' \times 10^{-21})} = \frac{\sum A}{602V'} \quad (1.1)$$

กำหนดให้ ρ = density (g/cm^3), and V' = unit cell volume in nm^3

$$APF = \frac{\text{Volume of Atoms in an Unit Cell}}{\text{Volume of an Unit Cell}} \quad (1.2)$$

2. วัสดุเซรามิก (ceramic materials) คือวัสดุเซรามิกที่สามารถถูกจำแนกได้หลายวิธี เช่น การจำแนกตามชนิดพันธะหลักของโครงสร้างทางเคมี, การจำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี, การจำแนกตามสูตรทางเคมี และการจำแนกตามลักษณะโครงสร้างผลึก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การจำแนกวัสดุเซรามิกตามโครงสร้างสารประกอบ ดังนี้คือ

2.1.1 เซรามิกที่มีโครงสร้างในรูปสารประกอบออกไซด์ เช่น ซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3), ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นต้น

2.1.2 เซรามิกที่มีโครงสร้างในรูปสารประกอบคาร์ไบด์ เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC), ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), ไททานเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เป็นต้น

2.1.3 เซรามิกที่มีโครงสร้างในรูปสารประกอบไนไตรด์ เช่น ซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4), โบรอนไนไตรด์ เป็นต้น

2.1.4 เซรามิกที่มีโครงสร้างในรูปสารประกอบคลอไรด์ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2), โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl), คอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2), แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) เป็นต้น

2.1.5 เซรามิกที่มีโครงสร้างในรูปสารประกอบไฮโอไดด์ ได้แก่ โพแทสเซียมไฮโอไดด์ (KI), ลิเทียมไฮโอไดด์ (LiI) เป็นต้น

2.1.6 เซรามิกที่มีโครงสร้างในรูปสารประกอบซัลไฟด์ ได้แก่ ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS), แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), ตะกั่วซัลไฟด์ (PbS) เป็นต้น

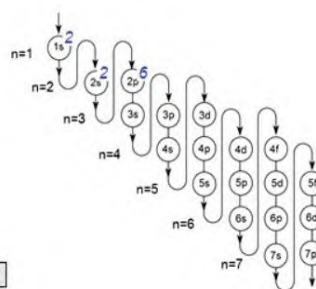
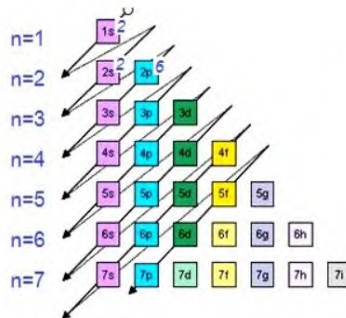
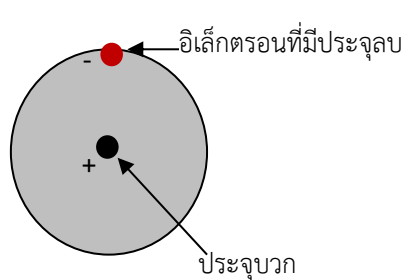
2.1.7 สารประกอบฟลูออไรด์ ได้แก่ แคลเซียมไดฟลูออไรด์ (CaF_2), แบเรียมฟลูออไรด์ (BaF) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารประกอบเซรามิกอยู่ในรูปเชิงซ้อนอีกหลายชนิด ได้แก่ สารประกอบซัลเฟต เช่น แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4), คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) หรือสารประกอบไนเตรด เช่น โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3), แคลเซียมไนเตรด ($\text{Ca(NO}_3)_2$) หรือสารประกอบฟอสเฟต ได้แก่ แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), แคลเซียมไฮดรเจนฟอสเฟตหรือไฮดรอกซีอะพาทาइट ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) เป็นต้น

2.2 การจำแนกตามโครงสร้างพันธะหลัก (Primary bonding) ได้แก่ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์ โดยหลักการจำแนกตามค่าผลต่างของอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) ดังนี้

	4.0	1.7	0.4	0
	Ionic bond	Polar covalent bond	Non-polar covalent bond	
Percent ionic	100%	50%	5%	0%
Percent covalent	0%	50%	75%	100%

รูปที่ 1.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีกับการเกิดพันธะไอออนิก

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของแคตไอออนและแอนไอออน ทำให้เซรามิกมีโครงสร้างพื้นฐานของการเกิดพันธะหลักได้สองชนิดคือ พันธะไอออนิก (Ionic bonding) ประกอบด้วย 2 ทฤษฎีที่สำคัญคือ 1. การส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างแคตไอออนและแอนไอออน (Electron transfer between cation and anion) ตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนตามระดับชั้นพลังงาน s, p, d, f เป็นต้น เป็นไปตามสมการ $2n^2$ โดยที่ n คือ 1, 2, 3,... หมายถึงคาบหรือระดับชั้นพลังงาน และ 2. การเกิดสารประกอบตามแรงยึดเกาะที่เป็นไปได้เนื่องจากค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของธาตุตามตารางธาตุ เช่น Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 เป็นต้น



รูปที่ 1.11 โครงสร้างอะตอมและการจัดเรียงอิเล็กตรอนตามระดับชั้นพลังงาน

และพันธะหลักอีกชนิดหนึ่งคือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) โดยหลักการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (Electron sharing) ตัวอย่างเช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC), ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), ซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4), อะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) เป็นต้น

New IUPAC notation																		Old IUPAC notation																		IUPAC = International Union of Pure and Applied Chemistry																		18 VIIIB	
1 H 1.00794																		2 He 4.00260																		18 VIIIB																			
3 Li 6.941		4 Be 9.01218																		13 IIIB		14 IVB		15 VB		16 VIB		17 VIIB		18 VIIIB																									
11 Na 22.98977		12 Mg 24.305																		13 Al 26.98154		14 Si 28.0855		15 P 30.97376		16 S 32.066		17 Cl 35.453		18 Ar 39.948																									
19 K 39.0983		20 Ca 40.078		21 Sc 44.9559		22 Ti 47.88		23 V 50.9415		24 Cr 51.996		25 Mn 54.9380		26 Fe 55.847		27 Co 58.9332		28 Ni 58.69		29 Cu 63.546		30 Zn 65.39		31 Ga 69.72		32 Ge 72.61		33 As 74.9216		34 Se 78.96		35 Br 79.904		36 Kr 83.80																					
37 Rb 85.4678		38 Sr 87.62		39 Y 88.9059		40 Zr 91.224		41 Nb 92.9064		42 Mo 95.94		43 Tc (98)		44 Ru 101.07		45 Rh 102.9055		46 Pd 106.42		47 Ag 107.8682		48 Cd 112.41		49 In 114.82		50 Sn 118.710		51 Sb 121.757		52 Te 127.60		53 I 126.9045		54 Xe 131.29																					
55 Cs 132.9054		56 Ba 137.33		57 La 138.9055		58 Ce 140.12		59 Pr 140.9077		60 Nd 144.24		61 Pm (145)		62 Sm 150.36		63 Eu 151.96		64 Gd 157.25		65 Tb 158.9254		66 Dy 162.50		67 Ho 164.9304		68 Er 167.26		69 Tm 168.9342		70 Yb 173.04		71 Lu 174.967																							
87 Fr (223)		88 Ra 226.0254		89 Ac 227.0278		90 Th 232.0381		91 Pa 231.0359		92 U 238.0289		93 Np 237.048		94 Pu (244)		95 Am (243)		96 Cm (247)		97 Bk (247)		98 Cf (251)		99 Es (252)		100 Fm (257)		101 Md (258)		102 No (259)		103 Lr (260)																							

รูปที่ 1.12 ตารางธาตุ

Electronegativity (EN)																	2
																	He
1																	10
2.2																	Ne
3																	18
4																	Ar
Li																	36
Be																	Kr
1.0																	54
1.5																	Xe
11																	86
12																	Rn
Na																	
Mg																	
0.9																	
1.2																	
19																	
20																	
K																	
Ca																	
0.8																	
1.0																	
37																	
38																	
Ru																	
Sr																	
0.8																	
1.0																	
55																	
56																	
Cs																	
Ba																	
0.7																	
0.9																	
87																	
88																	
Fr																	
Ra																	
0.9																	
1.1																	
1.3																	
1.5																	
1.7																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	
1.3																	

รูปที่ 1.13 ตัวอย่างค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของธาตุตามตารางธาตุ

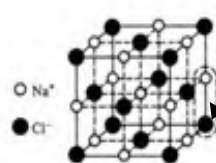
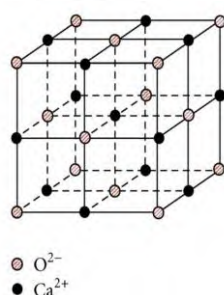
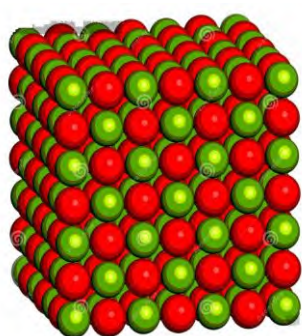
ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของอะตอมในการที่จะดึงดูดอิเล็กตรอนเข้าหาพันธะของอะตอมตัวเองทำให้เกิดพันธะเคมี (chemical bond) ระหว่างแคตไอออนและแอนไอออน จากตารางธาตุและข้อมูลประกอบแสดงการคำนวณค่าความแตกต่าง EN ของธาตุที่สร้างพันธะกัน ทำให้จำแนกชนิดพันธะได้ 3 ชนิด คือ

1. ค่า EN ต่างกันน้อยกว่า 0.4 จัดเป็นพันธะโควาเลนต์ชนิดไม่มีขั้ว (Non-polar covalent bond) เช่น ก๊าซคลอรีน (Cl_2), ก๊าซฟลูออรีน (F_2), ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นต้น
2. ค่า EN ต่างกันมากกว่า 0.4 แต่น้อยกว่า 1.7 จัดเป็นพันธะโควาเลนต์ชนิดมีขั้ว (Polar-covalent bond) เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดไฮโดรโบรไมด์ (HBr), คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) เป็นต้น
3. ค่า EN ต่างกันมากกว่าตั้งแต่ 1.7 จัดเป็นพันธะไอออนิก (Ionic bond) เช่น อะลูมินา (Al_2O_3), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น

จากรูป 1.2 สามารถคำนวณได้โดยการนำค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของธาตุแต่ละชนิดที่มีอยู่ในสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบนั้นๆ มาหักลบกัน ได้ค่าเท่าไรก็พิจารณาตามช่วงที่ปรากฏค่า นั้น ตัวอย่างเช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) คือ $3.0 - 1.0 = 2.0$ ดังนั้นโซเดียมคลอไรด์คือสารประกอบที่มีพันธะไอออนิก

2.3 การจำแนกตามสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังนี้คือ

2.3.1 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี MX เมื่อ M คือธาตุโลหะ และ X คือ ธาตุอโลหะ ตัวอย่างเช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซีเซียมคลอไรด์ (CsCl) แคลเซียมซัลไฟด์ (CaS) มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกตามการจัดแบบ Bravais Lattice ประกอบด้วย 2 ไอออนของ Cs^+ และ Cl^- ต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ และสำหรับโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ตามการจัดแบบ Bravais Lattice ประกอบด้วย 8 ไอออนต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ของ 4Na^+ และ 4Cl^-



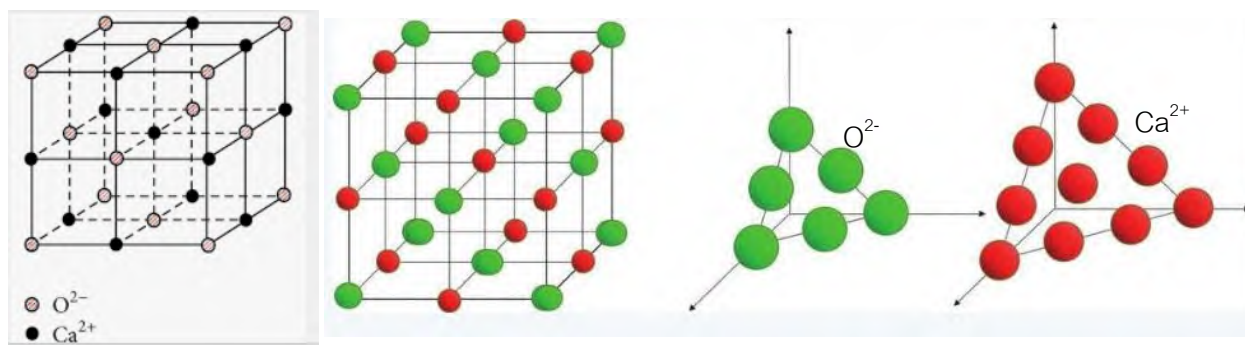
2 ไอออนต่อ lattice point

Bravais lattice: FCC

Structure: NaCl-type

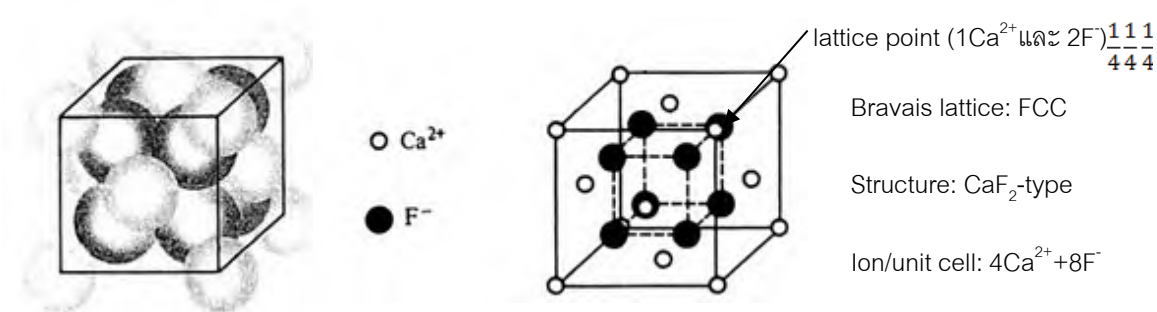
Ion/unit cell: $4\text{Na}^+ + 4\text{Cl}^-$

Typical ceramics: MgO , CaO , NiO



รูปที่ 1.15 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์

2.3.2 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี MX_2 เมื่อ M คือธาตุโลหะ และ X คือ ธาตุอโลหะ ตัวอย่างเช่น แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) โครงสร้างผลึกแบบ FCC ประกอบด้วย 12 ไอออนต่อยูนิตเซลล์ของ $4Ca^{2+}$ และ $8F^-$ สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีแบบ MX_2 ได้แก่ UO_2 , ThO_2 , TeO_2 , $CaCl_2$, $AgCl_2$ รวมทั้งซิลิกา SiO_2

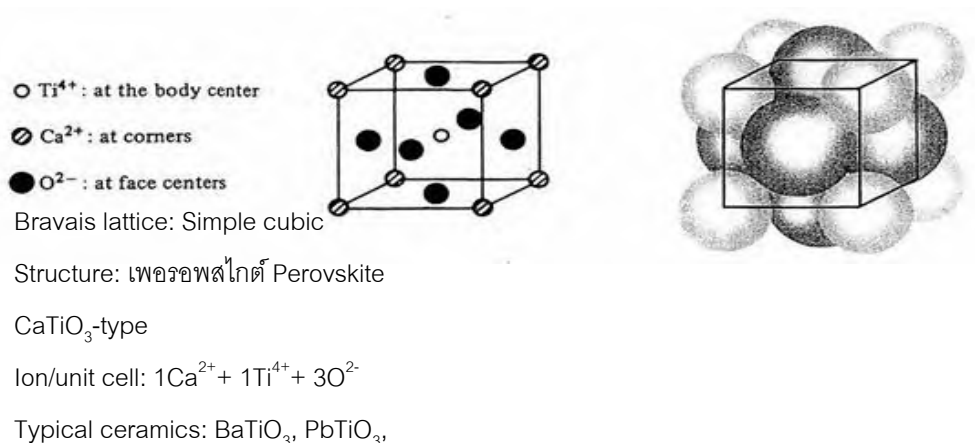


รูปที่ 1.16 โครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียมไดฟลูออไรด์ (CaF_2)

2.3.3 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี M_2X_3 เมื่อ M คือธาตุโลหะ และ X คือ ธาตุอโลหะ ตัวอย่างเช่น อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญอย่างมากในหลายอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น อิเล็กทรอนิกส์ กระดาษ คานวนความร้อน และวัสดุเซรามิกชีวภาพ เป็นสารประกอบเซรามิกที่มีหลายโครงสร้างผลึกตามระบบบราวเวียสแลตทิซ (Bravais lattice) เช่น คอรันดัม (Corundum) โดยอาจมีโครงสร้างผลึกแบบรวมโบฮีตรอล (Rhombohedral) หรือเฮกซะโกนอล (Hexagonal) โดยภายในโครงสร้างประกอบด้วย 30 ไอออนต่อยูนิตเซลล์ของ $12Al^{3+}$ และ $18O^{2-}$ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบเซรามิกอื่นที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับอะลูมินาอีกคือ โครมิกออกไซด์ (Cr_2O_3) โกลด์ไตรคลอไรด์ ($AuCl_3$) และเหล็กออกไซด์ ($\alpha-Fe_2O_3$)

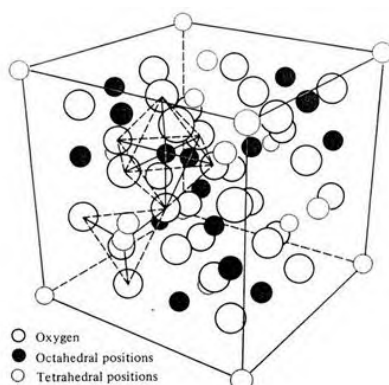
2.3.4 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $M'M''X_3$ เมื่อ M' และ M'' คือธาตุโลหะ และ X คือ ธาตุอโลหะ โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่สำคัญของสารประกอบเซรามิกที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่เรียกว่าเซรามิกอิเล็กทรอนิกส์ (Electro-ceramics) เช่น การนำไฟฟ้า การทำหน้าที่เป็นวัสดุตัวนำ (Conductor) การเป็นวัสดุไดอิเล็ก

เล็กทรอนิกส์ (Dielectric) เฟอโรอิเล็กทริก (Ferroelectric) และเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เนื่องจากมีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) และยังเป็นสูตรที่มีโครงสร้างผลึกได้หลายรูปแบบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตามอุณหภูมิได้แก่ FCC, BCC, Cubic ตัวอย่างเช่น แคลเซียมไททาเนต (CaTiO_3), แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3), เลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3), เลดไททาเนต (PbTiO_3) เป็นต้น สำหรับโครงสร้างของแคลเซียมไททาเนต ประกอบด้วยอะตอมแคลเซียม (Ca^{2+}) อยู่ที่มุม (Corner) ของยูนิตเซลล์ อะตอมไททานเนียม (Ti^{4+}) อยู่ตรงกลางของยูนิตเซลล์และอะตอมของออกซิเจน (O^{2-}) อยู่กึ่งกลางของยูนิตเซลล์



รูปที่ 1.17 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมไททาเนต Jame F.Schackelford, 3rd ed., 1992

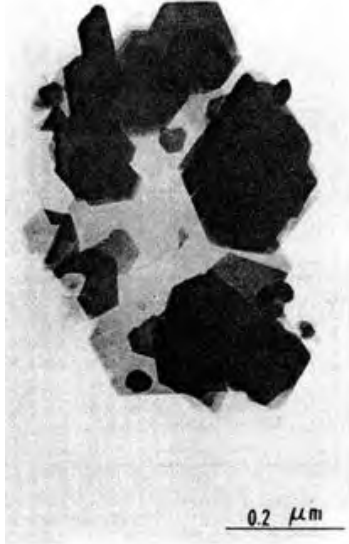
2.3.5 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $\text{M}'\text{M}''\text{X}_4$ เมื่อ M' และ M'' คือธาตุโลหะ และ X คือธาตุออกซิเจน เป็นสารประกอบเซรามิกที่สำคัญสำหรับการผลิตวัสดุแม่เหล็ก ได้แก่ เฟอโรแมกเนติก (Ferromagnetic) เฟอริแมกเนติก (Ferrimagnetic) เนื่องจากมีโครงสร้างแบบสปินเนล (Spinel) และโครงสร้างแบบอินเวอร์สสปินเนล (Invert spinel) ตัวอย่างเช่น แมกนีเซียมอะลูมินา (MgAl_2O_4) ประกอบด้วย 14 ไอออนต่อยูนิตเซลล์ของ 2 Mg^{2+} , 4 Al^{3+} และ 8 O^{2-} โดยที่โลหะชนิด M^{2+} อยู่ตำแหน่งเตตระฮีดรอล (Tetrahedral site) และ 2/3 ของโลหะชนิด M^{3+} อยู่ตำแหน่งออกตะฮีดรอล (Octahedral site) ตัวอย่างสารประกอบกลุ่มนี้น่าสนใจได้แก่ สารประกอบกลุ่มเฟอร์ไรต์ (Ferrite) FeNiFeO_4 , NiAl_2O_4 , ZnAl_2O_4 , ZnFe_2O_4 , FeMgFeO_4 , FeFe_2O_4 (Fe_3O_4 or Hematite)



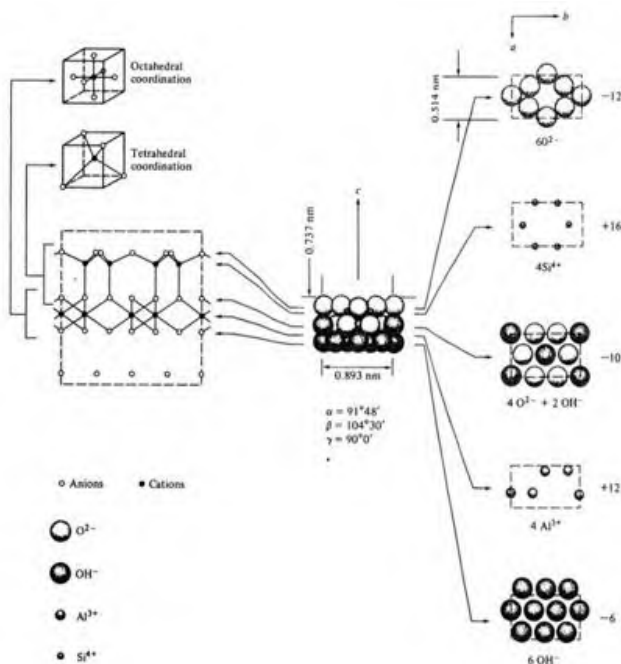
รูปที่ 1.18 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีโครงสร้างสปินเนล (Spinel) Jame F.Schackelford, 3rd ed., 1992

2.3.6 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีแบบเชิงซ้อนของดินขาว (Kaolinite) คือไฮดรอกซีอะลูมิเนียมซิลิเกต ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) หรือแร่ดินขาวที่มีโครงสร้างแบบแผ่นซิลิเกตดังรูป 1.19 และมีโครงสร้างผลึก

แบบไทรคลินิก (Triclinic) ตามระบบบราวเวียสแลตทิซ Bravais lattice ประกอบด้วยหนึ่งยูนิตเซลล์ที่มีโมเลกุลของดินขาว (Kaolinite) สองโมเลกุลเรียงตัวอยู่ในช่องออกตระฮีดรอลและช่องเตตระฮีดรอล



รูปที่ 1.19 โครงสร้างทางจุลภาคของแร่ดินขาวที่วิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (TEM) ที่มา Courtesy of I.A. Aksay

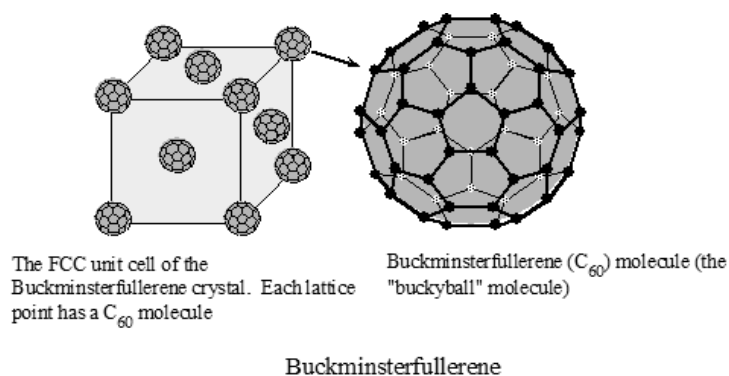


รูปที่ 1.20 โครงสร้างของดินขาว (Kaolinite) ที่มา F.H Norton, Elements of ceramics, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing, Co. Inc., Reading, Mass, 1974.

นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างเชิงซ้อนของแร่ดินอีกหลายชนิดที่มีอยู่ตามธรรมชาติและถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบของการทำผลิตภัณฑ์เซรามิก ตัวอย่างเช่น Dickite (แร่ดินเหนียว) มีองค์ประกอบคล้ายกับ Kaolinite, Nacrite (เป็นแร่ดินเหนียวอีกชนิดหนึ่ง), Halloysite (แร่ดินขาวที่เกิดปะปนอยู่กับ Kaolinite) รวมทั้งสินแร่ชนิดอื่นๆ เช่น แคสซิเทอไรต์ (เป็นแร่ที่มีดีบุกออกไซด์ SnO_2), แร่สตีบไนท์ (เป็นแร่ที่มีซิลไฟด์เป็นองค์ประกอบ Sb_2S_3),

แร่ไพไรต์ (เป็นแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ FeS_2 และอยู่ปะปนกับแร่เฮมาไทต์ Fe_2O_3), แร่กาลีน่า (PbS), แร่สฟาเลอไรต์ (ZnS), แมกเนไทต์ (Fe_3O_4), บอกไซต์ (Al_2O_3), อาร์เจนไทต์ (Ag_2S) เป็นต้น

2.3.7 สารประกอบเซรามิกที่เกิดจากธาตุเพียงชนิดเดียวคือคาร์บอนยึดเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ได้โครงสร้างของเพชร (Diamond) โดยที่แต่ละอะตอมของธาตุคาร์บอนจะวางอยู่ในตำแหน่งเตตระฮีดรอล และเป็นโครงสร้างที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบเซรามิกด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างคาร์บอนที่เป็นแอลโลโทรป (Allotrope) โดยมีคาร์บอนขนาดเล็กจำนวน 60 อะตอม ประกอบกันอยู่ในแต่ละมุมของแลตทิซเรียกว่าบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ (Buckminsterfullerene) หรือบัคกี้บอล (Buckyball) ดังรูป 1.21

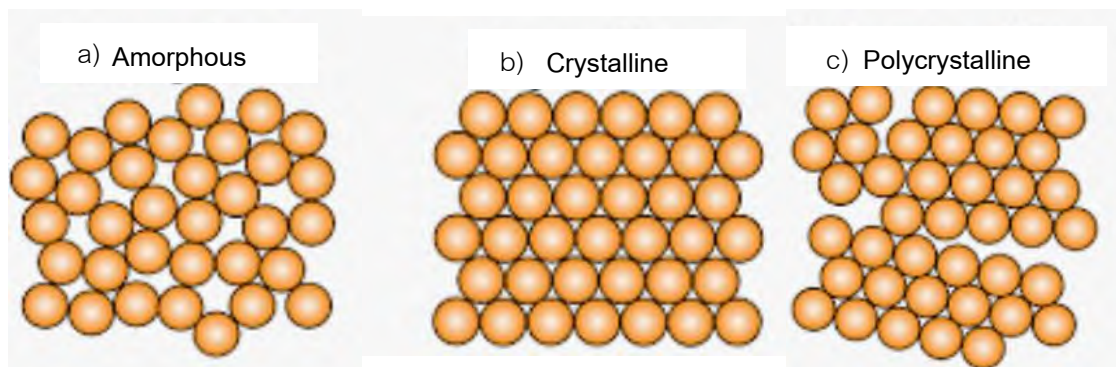


รูปที่ 1.21 โครงสร้างของบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ (Buckminsterfullerene) หรือบัคกี้บอล (Buckyball)

2.3.8 สารประกอบเซรามิกที่เกิดจากธาตุคาร์บอนเพียงชนิดเดียวยึดเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ได้โครงสร้างแกรไฟต์ (graphite) เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง อะตอมคาร์บอนจะจัดเรียงเป็นวงแหวนรูปหกเหลี่ยม (hexagonal ring) ซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยมีแรงยึดเกาะกันภายในชั้นที่แข็งแรงและยึดเกาะระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) แกรไฟต์มีโครงสร้างที่ถูกจัดให้เป็นวัสดุที่มีความเซรามิก (Ceramic like) มากกว่าความเป็นโลหะ (Metallic like) และมีแอลโลโทรป (Allotrope) ที่เรียกว่าคาร์บอนนาโนทิว (Carbon nanotube)

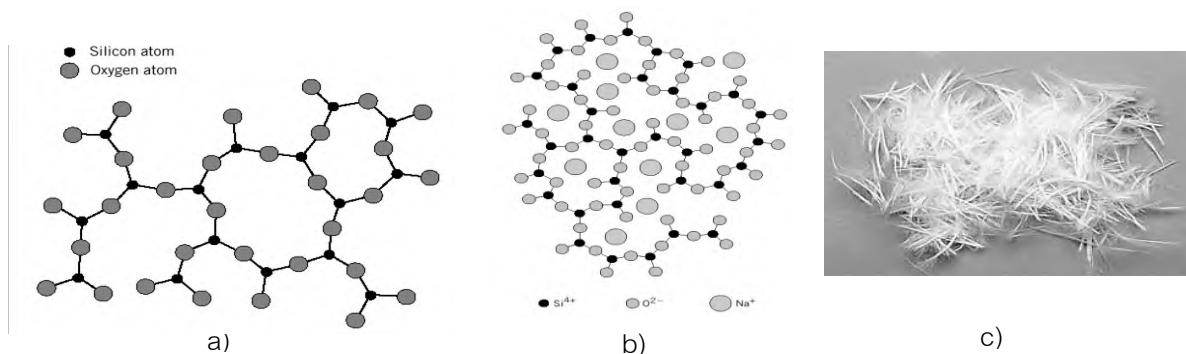
2.3.9 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรทางเคมีเหมือนกันแต่สูตรโครงสร้างผลึกแตกต่างกันคือซิงค์ซัลไฟด์ (Zns) ประกอบด้วย 2 โครงสร้างผลึกคือ ซิงค์เบลน (Zinc blende) มี 8 ไอออนต่อยูนิตเซลล์ ประกอบด้วย 4Zn^{2+} และ 4S^{2-} และ 2 ไอออนต่อ lattice point มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ตามระบบผลึกบราเวียสแลตทิซ Bravais lattice และอีกหนึ่งโครงสร้างคือ เวอร์ทไซต์ (Wurtzite) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ตามระบบผลึกบราเวียสแลตทิซ Bravais lattice โดยโครงสร้างประกอบด้วย 4 ไอออนต่อยูนิตเซลล์ของ 2Zn^{2+} และ 2S^{2-} สารประกอบเซรามิกอื่นที่มีโครงสร้างเช่นเดียวกันนี้คือ CdS และ ZnO นอกจากนี้ยังมีสารประกอบเซรามิกและวัสดุกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเช่นเดียวกับซิงค์เบลน คือ GaAs, AlP, InSb และสารประกอบที่เกิดจากธาตุหมู่ 3 (III) กับหมู่ 5 (V) ตามตารางธาตุ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบของ ZnSe, CdS, HgTe และสารประกอบที่เกิดจากธาตุในหมู่ 2 (II) กับหมู่ 6 (VI) ตามตารางธาตุ

2.4 การจัดแบ่งวัสดุเซรามิกตามลักษณะโครงสร้างผลึก แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้คือ ผลึก (Crystalline), อะมอร์ฟัส (Amorphous) และ หลายรูปผลึก (Polycrystalline)



รูปที่ 1.22 การจำแนกวัสดุตามโครงสร้างผลึก: a) อะมอร์ฟัส; b) โครงร่างผลึกเดี่ยว; c) โครงร่างหลายผลึก

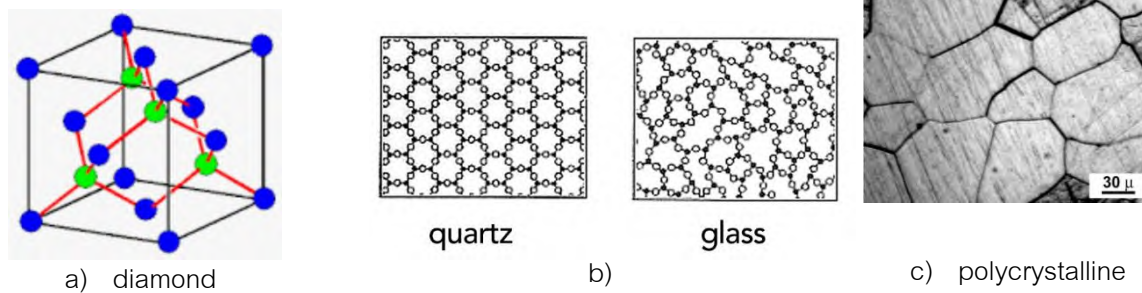
2.4.1 อะมอร์ฟัส หรือ ออสถุาน (Non-crystalline หรือ amorphous) คือโครงสร้างของวัสดุชนิดของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างไม่มีระเบียบและไม่มีรูปร่างโครงสร้างที่แน่นอนดังรูปที่ 1.23a ตัวอย่างเช่น แก้ว เคลือบเซรามิกและเคลือบแก้ว เซฟไฟร์ต ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โปร่งใส



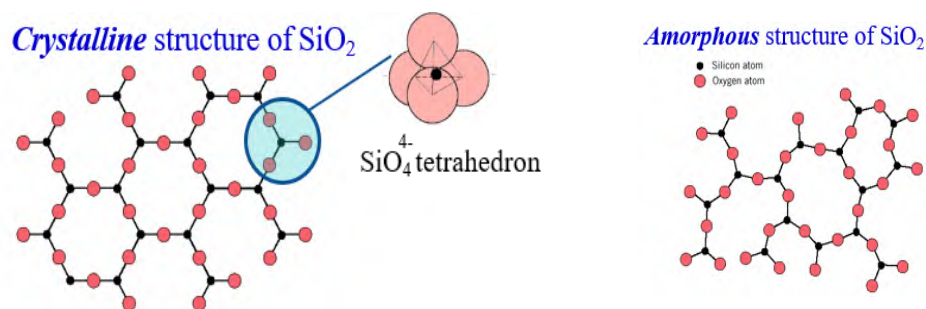
รูปที่ 1.23 โครงสร้างอะมอร์ฟัสหรือโครงสร้างอสถุาน (Amorphous) ของวัสดุนาโนเซรามิก: a) แก้วซิลิกา (SiO_2), b) กระจกซิลิกา, c) เส้นใยแก้ว

2.4.2 โครงร่างผลึกเดี่ยว (Crystalline) คือโครงสร้างของวัสดุชนิดของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นระเบียบ สมมาตร มีโครงสร้างแน่นอน ดังรูปที่ 1.24 b เช่น วัสดุเซมิคอนดักเตอร์ซิลิคอน เจอมาเนียม (GaAs , GaP , GaSb , Ge , InAs , InP , InSb , CdS , CdSe , CdTe , ZnS , ZnSe , and ZnTe , เพชร (Diamond), อัญมณี (gemstones) และผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการผลิต “Czochralski method” ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางแสง

2.4.3 โครงร่างหลายผลึกหรือผลึกรวม (Polycrystalline) คือโครงสร้างของวัสดุชนิดของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นระเบียบ สมมาตร แต่ประกอบด้วยผลึกเดี่ยวรวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก ดังรูป 1.24c ตัวอย่างเช่น อะลูมินา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โปร่งแสงและทึบแสง



รูปที่ 1.24 โครงสร้างผลึก: a) ผลึกเดี่ยวของเพชร, b) โครงสร้างผลึกของควอตซ์และอะมอร์ฟัสของแก้ว, c) โครงสร้างกลุ่มหรือโครงสร้างหลายผลึกของอะลูมินา



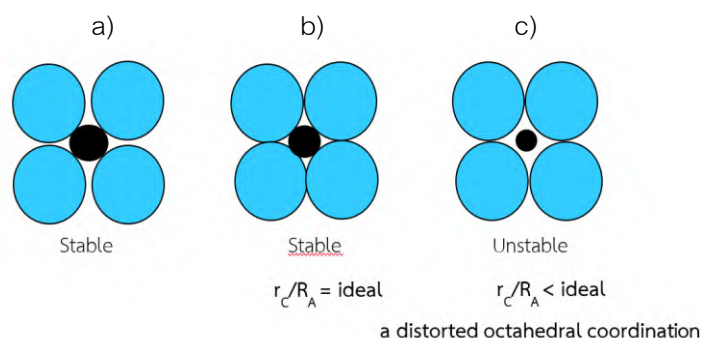
รูปที่ 1.25 โครงสร้างผลึกและอะมอร์ฟัสของซิลิกา

2.4 การจำแนกโครงสร้างเซรามิกตามระบบผลึกบราเวียสแลตทิซ โครงสร้างผลึกตามระบบผลึกแบบบราเวียสแลตทิซ (Bravais Lattice) ประกอบด้วย 7 ระบบผลึก (Crystal systems) 14 รูปแบบตามมาตรฐานยูนิตเซลล์ (Standard unit cells) แสดงดังตารางที่ 1.3 แต่ละระบบของโครงสร้างผลึกประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐาน 4 ชนิด ได้แก่ P = Primitive, I = Body-centered, F = Face-centered, C = Side-centered

ตารางที่ 1.3 โครงสร้างผลึกตามมาตรฐาน Bravais Lattice สำหรับวัสดุเซรามิกชนิดผลึก

ชนิดของผลึก (Types of Crystal)	แลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameter)	รูปแบบผลึก
คิวบิก (Cubic)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I, F
เตตระโกนอล (Tetragonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I
ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I, F, C
เฮกซะโกนอล (Hexagonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	P
โมโนคลินิก (Monoclinic)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 120^\circ$	P, C
ไตรคลินิก (Triclinic)	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	P
ไตรโกนอล (Trigonal)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	P

โดยทั่วไปโครงสร้างของวัสดุเซรามิกมีความซับซ้อนเนื่องจากประกอบด้วยแคตไอออนและแอนไอออน ทำให้โครงสร้างเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนด้วยพันธะไอออนิกและพันธะโควาเลนต์ สูตรสารประกอบที่เกิดขึ้นและมีความเสถียร สามารถเกิดขึ้นได้จริงในธรรมชาติ จะมีผลรวมของประจุวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับศูนย์ โดยการรวมกันระหว่างประจุบวกแคตไอออนและแอนไอออนอาจเกิดได้หลายแบบ แต่โครงสร้างที่มีความเสถียรและมีการเกิดโครงสร้างที่สามารถทำนายได้เช่นกัน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.26 การยึดเกาะของอะตอมที่เสถียรและไม่เสถียรในโครงสร้างสารประกอบเซรามิก

จากรูปที่ 1.26 สองรูปแรก a และ b จะเป็นโครงสร้างวัสดุเซรามิกที่มีความเสถียร เนื่องจากอะตอมของแคตไอออนและแอนไอออนมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะที่ดี แข็งแรง แต่รูปที่ 1.26c เป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียร โอกาสเสียรูปร่างโครงสร้างได้ง่าย เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างอะตอมแคตไอออนและแอนไอออนน้อยมาก มีช่องว่างระหว่างอะตอมสูง การทำนายโครงสร้างวัสดุเซรามิกจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ช่วยให้นักด้านวิศวกรรมวัสดุสามารถระบุคุณลักษณะ โครงสร้าง และสมบัติที่อาจมีได้ของสารประกอบนั้นๆ โดยการทำนายโครงสร้างจากจำนวนอะตอมล้อมรอบอะตอมกลาง มีชื่อเรียกว่าเลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number, CN) ทำให้สามารถระบุคุณลักษณะสารประกอบเซรามิกได้ในเบื้องต้น รวมทั้งช่วยอธิบายความแข็งแรงของโครงสร้าง คุณลักษณะสมบัติด้านต่างๆ ได้เพิ่มเติม เช่น สมบัติทางกล (ความแข็ง hardness, ความแข็งแรง strength, ความเหนียว ductility, ความเปราะ brittleness, มอดุลัส Modulus of Elasticity, การรับแรงดัดโค้ง bending) สมบัติทางแสง (ความโปร่งใส transparent, ความโปร่งแสง translucent, ความทึบแสง opaque, ดัชนีหักเห refractive index, โพลาไรซ์ polarization) สมบัติทางไฟฟ้า (การนำไฟฟ้า electrical conductivity, การต้านทานไฟฟ้าหรือฉนวนไฟฟ้า electrical resistance or insulator, การเก็บประจุ charge storage) สมบัติทางแม่เหล็ก (การนำแม่เหล็ก magnetic magnetization, ความว่องไวของการเป็นวัสดุแม่เหล็ก magnetic susceptibility, การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก magnetic induction) วิธีการทำนายโครงสร้างและเลขโคออร์ดิเนชันของวัสดุเซรามิกคือการคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีแคตไอออนหรือรัศมีประจุบวกต่อรัศมีแอนไอออนหรือรัศมีของประจุลบดังแสดง สมการที่ 1.3

$$r_C/R_A = \text{ideal} \quad (1.3)$$

กำหนดให้ r_C คือ รัศมีแคตไอออน และ R_A คือรัศมีแอนไอออน ค่าอัตราส่วนที่ได้ สามารถเปรียบเทียบค่าที่ปรากฏในตารางที่ 1.4 ทำให้สามารถระบุโครงสร้างวัสดุเซรามิกได้ในเบื้องต้น แต่ข้อควรระวังคือ ไม่ต้องใช้ค่าเลขอะตอม

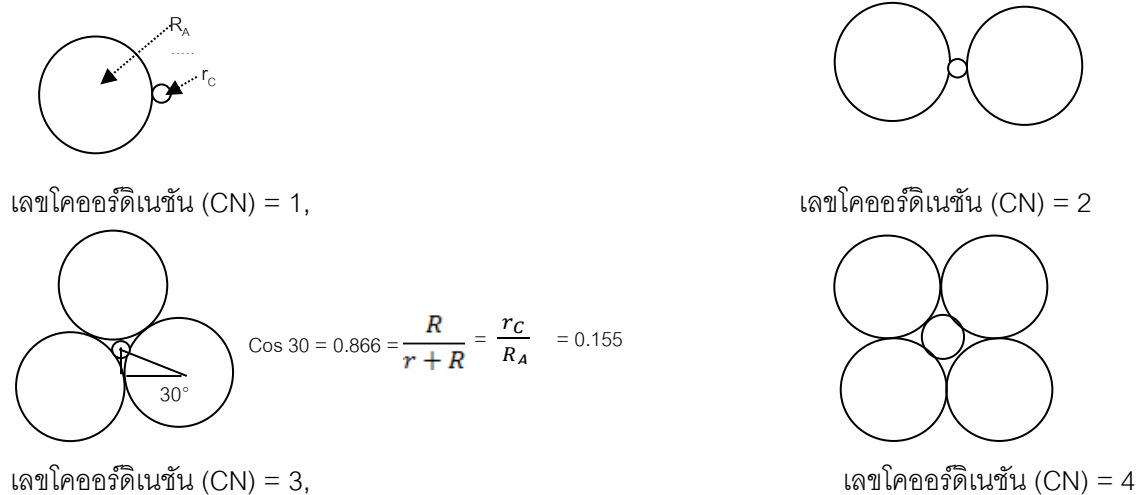
(Stoichiometry) เพื่อการคำนวณค่าแต่อย่างใด และค่ารัศมีที่ปรากฏในตารางตัวอย่าง จะมีทั้งค่ารัศมีอะตอมและค่ารัศมีไอออน ให้เลือกใช้ค่ารัศมีไอออน (Ionic radius) สำหรับการแทนค่าในการคำนวณ และหากค่าที่คำนวณได้ไม่สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนรัศมีตามทฤษฎี ก็หมายความว่าวัสดุเซรามิกดังกล่าว มีโครงสร้างสารประกอบที่ไม่เสถียรที่โครงสร้างเกิดความเสียหายได้โดยง่าย เนื่องจากหลายสาเหตุที่ไม่เหมาะสมดังนี้ เช่น ขนาดอนุภาค อุณหภูมิ ความดัน ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความบริสุทธิ์ของสารที่ใช้เป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ตลอดจนวิธีการเตรียมหรือกระบวนการสังเคราะห์วัสดุเซรามิกดังกล่าว อาจไม่มีความเหมาะสม ทำให้การเกิดโครงสร้างไม่สมบูรณ์ ทำให้โครงสร้างเกิดความผิดพลาดไปจากโครงสร้างตามทฤษฎีที่อาจเรียกว่า Distortion ดังสมการที่ 1.4

$$r_c / R_A < \text{ideal} \quad (1.4)$$

ตารางที่ 1.4 ตัวอย่างรัศมีไอออนของธาตุบางชนิด

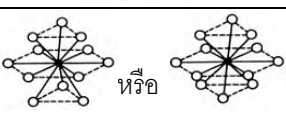
Element	Symbol	Atomic Number	Atomic Weight (amu)	Density of Solid, 20°C (g/cm ³)	Crystal Structure, 20°C	Atomic Radius (nm)	Ionic Radius (nm)	Most Common Valence	Melting Point (°C)
Aluminum	Al	13	26.98	2.71	FCC	0.143	0.053	3+	660.4
Argon	Ar	18	39.95	—	—	—	—	Inert	-189.2
Barium	Ba	56	137.33	3.5	BCC	0.217	0.136	2+	725
Beryllium	Be	4	9.012	1.85	HCP	0.114	0.035	2+	1278
Boron	B	5	10.81	2.34	Rhomb.	—	0.023	3+	2300
Bromine	Br	35	79.90	—	—	—	0.196	1-	-7.2
Cadmium	Cd	48	112.41	8.65	HCP	0.149	0.095	2+	321
Calcium	Ca	20	40.08	1.55	FCC	0.197	0.100	2+	839
Carbon	C	6	12.011	2.25	Hex.	0.071	~0.016	4+	sublimes at 3367 K
Cesium	Cs	55	132.91	1.87	BCC	0.265	0.170	1+	28.4
Chlorine	Cl	17	35.45	—	—	—	0.181	1-	-101
Chromium	Cr	24	52.00	-7.19	BCC	0.125	0.063	3+	1875
Cobalt	Co	27	58.93	8.9	HCP	0.125	0.072	2+	1495
Copper	Cu	29	63.55	8.94	FCC	0.128	0.096	1+	1085
Fluorine	F	9	19.00	—	—	—	0.133	1-	-220
Gallium	Ga	31	69.72	5.90	Ortho.	0.122	0.062	3+	29.8
Germanium	Ge	32	72.64	5.32	Dia.	0.122	0.053	4+	937
Gold	Au	79	196.97	19.32	FCC	0.144	0.137	1+	1064
Helium	He	2	4.003	—	—	—	—	Inert	-272 at 26 atm
Hydrogen	H	1	1.008	—	—	—	0.154	1+	-259
Iodine	I	53	126.91	4.93	Ortho.	0.136	0.220	1-	114
Iron	Fe	26	55.85	7.87	BCC	0.124	0.077	2+	1538
Lead	Pb	82	207.2	11.35	FCC	0.175	0.120	2+	327

ดังนั้นเพื่อความถูกต้องและเหมาะสมในการทำนายโครงสร้างและเลขโคออร์ดิเนชันของวัสดุเซรามิกที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวด้วยพันธะไอออนระหว่างรัศมีแคตไอออนหรือรัศมีของประจุบวกต่อรัศมีแอนไอออนหรือรัศมีของประจุลบ จึงกำหนดได้เป็นช่วง ดังแสดงในตารางที่ 1.5 การทำนายรูปร่างและเลขโคออร์ดิเนชันของวัสดุเซรามิก ตัวอย่างการทำนายการเกิดโครงสร้างจากอัตราส่วนระหว่างรัศมีแคตไอออนต่อรัศมีแอนไอออน ดังนี้

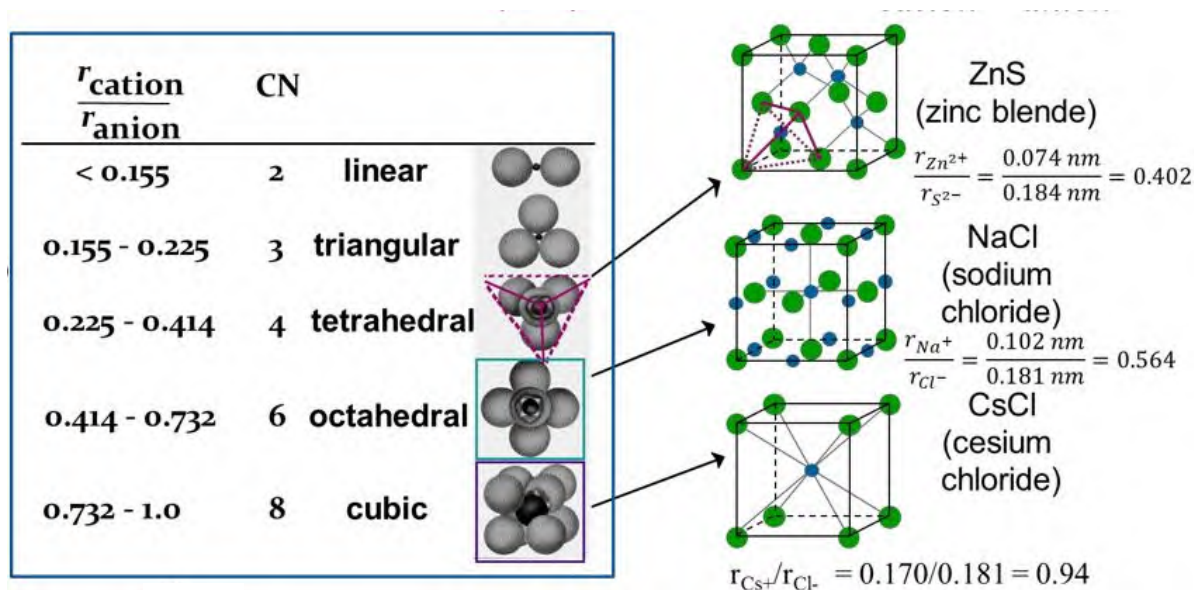


รูปที่ 1.27 การทำนายรูปร่างและเลขโคออร์ดิเนชันของสารประกอบเซรามิก

ตารางที่ 1.5 การทำนายรูปร่างและเลขโคออร์ดิเนชันของเซรามิก

เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number)	อัตราส่วนรัศมีแคตไอออนต่อรัศมีแอนไอออน (r/R)	รูปร่างโคออร์ดิเนชัน (Coordination geometry)	รูปร่าง
2	$0 < \frac{r}{R} < 0.155$		เส้นตรง
3	$0.155 \leq \frac{r}{R} < 0.225$		สามเหลี่ยม
4	$0.225 \leq \frac{r}{R} < 0.414$		เตตระฮีดรอล
6	$0.414 \leq \frac{r}{R} < 0.732$		ออกตะฮีดรอล
8	$0.732 \leq \frac{r}{R} < 1.000$		คิวบิก
12	1.000	 หรือ	ปรีสมิต

ตัวอย่างแสดงการทำนายโครงสร้างวัสดุเซรามิก ดังแสดงในรูปที่ 1.28



รูปที่ 1.28 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าอัตราส่วนรัศมีเพื่อการระบุโครงสร้างผลึกของวัสดุเซรามิก

การคำนวณหาความหนาแน่นของโครงสร้างวัสดุผลึกเซรามิก สามารถคำนวณได้จากสมการเดียวกันกับการหาความหนาแน่นของวัสดุโลหะ ดังสมการต่อไปนี้

การคำนวณหาความหนาแน่นต่อหน่วยเซลล์ (Density of unit cell)

สูตรการคำนวณหาความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่น, } \rho = \frac{\text{มวล(Mass)}}{\text{ปริมาตร(Volume)}} = \frac{\text{Mass of atoms in unit cell}}{\text{Volume of an unit cell}} = \frac{(n/N_A)}{V_C} \times A \quad (1.5)$$

n คือ จำนวนอะตอมต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ (number of atoms per unit cell), A คือ น้ำหนักอะตอม (atomic weight, g/mol), V_C คือ ปริมาตรต่อหน่วยเซลล์ (volume per unit cell, $\text{cm}^3/\text{unit cell}$), N_A คือ เลขอาโวกาโดร (Avogadro's number 6.023×10^{23} atoms/mol)

สำหรับการคำนวณหาประสิทธิภาพการจัดเรียงตัวของประจุในโครงสร้างหน่วยเซลล์สำหรับวัสดุเซรามิก (IPF) จะแตกต่างจากการคำนวณในสูตรการจัดเรียงตัวของอะตอมโลหะ (APF) เนื่องจากองค์ประกอบและโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันระหว่างสองกลุ่มวัสดุ

การคำนวณหาการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างของหน่วยเซลล์ Atomic Packing Factor (APF)

$$APF = \frac{\text{ปริมาตรของอะตอมต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ (Volume of atoms in an unit cell)}}{\text{ปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ (Volume of an unit cell)}} \quad (1.6)$$

แต่การคำนวณหาการจัดเรียงตัวของไอออนภายในโครงสร้างต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบเซรามิก เรียกว่า Ionic Packing Factor (IPF) ดังสมการ 1.7

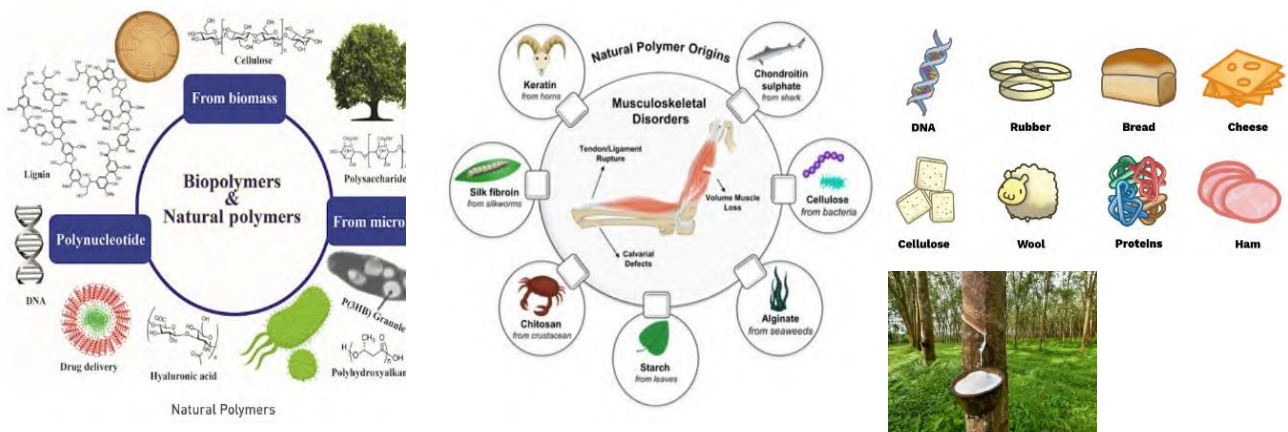
$$IPF = \frac{\text{ปริมาตรไอออนต่อหน่วยเซลล์ (Volume of ions per unit cell)}}{\text{ปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ (V_{unit cell})}} \quad (1.7)$$

3. วัสดุพอลิเมอร์ (polymeric materials) สามารถจำแนกได้หลายวิธีเช่นเดียวกับวัสดุเซรามิก เช่น การจำแนกตามแหล่งวัตถุดิบพอลิเมอร์, ตามลักษณะโครงสร้างผลึก, ตามลักษณะการจัดเรียงมอนอเมอร์ในโครงสร้างโมเลกุลและการจัดแบ่งตามการจัดเรียงรูปร่างของสายโซ่โมเลกุล โดยมอนอเมอร์มีการยึดเกาะกันด้วยพันธะหลักชนิดโคเวเลนต์ (Covalent bond)

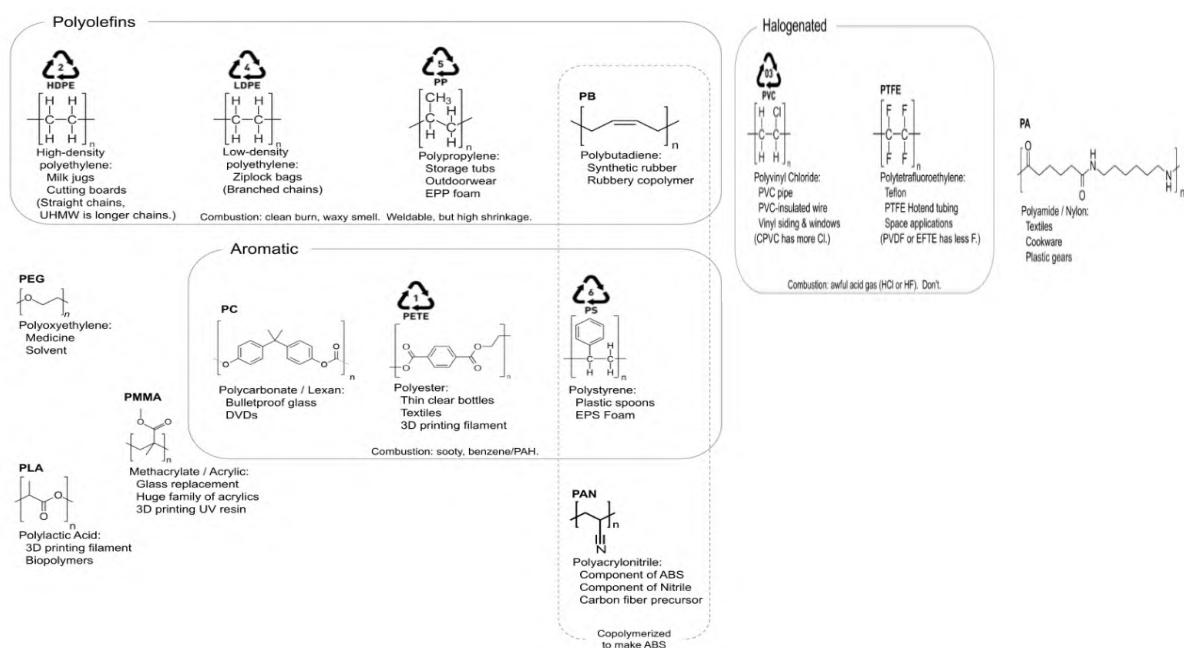
3.1 การจำแนกตามแหล่งวัตถุดิบพอลิเมอร์ประกอบด้วย

3.1.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีตามธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส, ดีเอ็นเอ, โปรตีน, ฝ้าย, หนังสือ, ปอ, ป่าน, เส้นใยพืช, ยางธรรมชาติ, แป้ง เป็นต้น

3.1.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (Condensation polymerization) และปฏิกิริยาการเติม (Addition polymerization) ได้แก่ พลาสติก, ยางสังเคราะห์, ไนลอน, เมลามีน เป็นต้น



รูปที่ 1.29 แหล่งที่มาของพอลิเมอร์ตามธรรมชาติ Fan, J. et al.

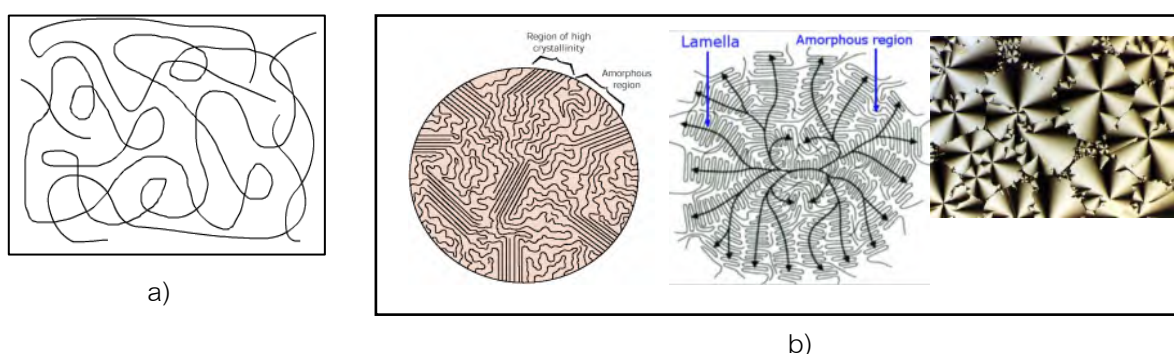


รูปที่ 1.30 ตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม

3.2 การจัดแบ่งพอลิเมอร์ตามลักษณะโครงสร้างผลึก แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

3.2.1 พอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous polymer) คือวัสดุพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลไม่เป็นระเบียบ ไม่สม่ำเสมอ มีความหนาแน่นต่ำ โปร่งใส จุดหลอมเหลวสูง หดตัวน้อย ดังรูป

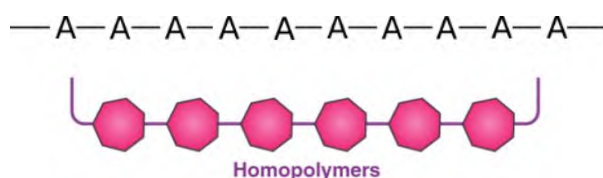
3.2.1 พอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) คือวัสดุพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลทั้งแบบผลึก (Crystalline part) ที่เรียกการจัดเรียงโครงสร้างแบบนี้ว่าลามลลา (Lamella) และโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous matrix) อยู่ด้วยกัน ทำให้ได้โครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์ที่เรียกว่า Spherulite หรือ พอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline) ส่งผลให้วัสดุพอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทนความร้อนหรือรับแรงทางกลสูงขึ้น ด้านทานการซึมผ่านโมเลกุลขนาดเล็กหรือตัวทำละลายได้ดีกว่าพอลิเมอร์อสัณฐาน ความหนาแน่นสูงกว่า แต่จะมีสมบัติทางแสงลดลง อาจมีลักษณะโปร่งแสงหรือทึบแสง



รูปที่ 1.31 การจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์: a) พอลิเมอร์อสัณฐาน และ b) พอลิเมอร์กึ่งผลึก (semicrystalline)

3.3 การแบ่งชนิดวัสดุพอลิเมอร์ตามลักษณะการจัดเรียงมอนอเมอร์ในโครงสร้างโมเลกุล ประกอบ ด้วยโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) และ โคพอลิเมอร์ (Copolymer)

3.3.1 โฮโมพอลิเมอร์คือวัสดุพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กที่เรียกว่ามอนอเมอร์ (Monomer) ชนิดเดียวกันจำนวนมากเกาะกันทั้งโครงสร้าง เช่น พอลิเอทิลีน (มอนอเมอร์คือเอทิลีน), พอลิไวนิลคลอไรด์ (มอนอเมอร์คือไวนิลคลอไรด์), พอลิโพรพิลีน (มอนอเมอร์คือ โพรพิลีน), แบง ไกลโคเจน โดยมอนอเมอร์ของแบงคือ กลูโคส, ยางธรรมชาติก็จะมีไอโซพรีน เป็นมอนอเมอร์

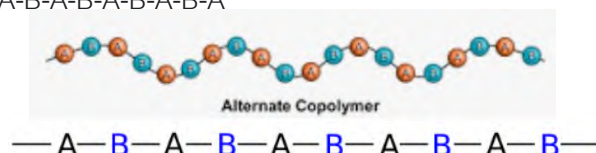


รูปที่ 1.32 โครงสร้างของวัสดุโฮโมพอลิเมอร์

3.3.2 โคพอลิเมอร์ คือวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์มอนอเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปผ่านกระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Copolymerization) รวมกันอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ตัวอย่างเช่น โพรตีน

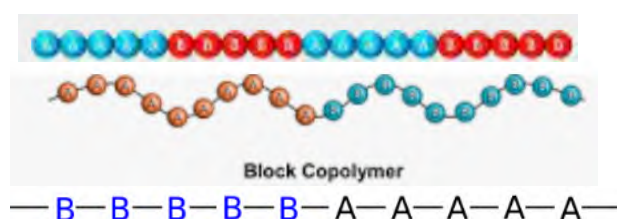
ประกอบด้วยมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน, ในลอนจะมีมอนอเมอร์ของกรดอะดิปิกและเฮกซะเอทิลีนไดอะมีน, พอลิยูรีเทนประกอบด้วยมอนอเมอร์สองชนิดคือ 1,2-เอทิลีนไดไฮโซไซยาเนตและ 1,2-เอทิลีนไกลคอล การจัดแบ่งโคพอลิเมอร์แบ่งได้เป็น 4 ชนิดดังนี้คือ

3.3.2.1 Alternating copolymer คือ โคพอลิเมอร์ที่มีหน่วยย่อยเรียงสลับกันตลอดความยาวของสายโมเลกุล เช่น -A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A



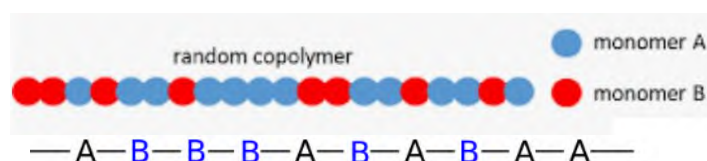
รูปที่ 1.33 โครงสร้างของวัสดุโคพอลิเมอร์ชนิด alternating copolymer

3.3.2.2 Block copolymer คือ โคพอลิเมอร์ประกอบด้วยหน่วยย่อยของกลุ่มมอนอเมอร์ต่างชนิดกันเรียงตัวกันอยู่เป็นกลุ่มๆ แล้วมีการเรียงสลับแบบกลุ่มตลอดความยาวของสายโมเลกุล เช่น กลุ่มของมอนอเมอร์ A และ B เรียงสลับกันเป็นกลุ่ม A-A-B-B-B-A-A-A



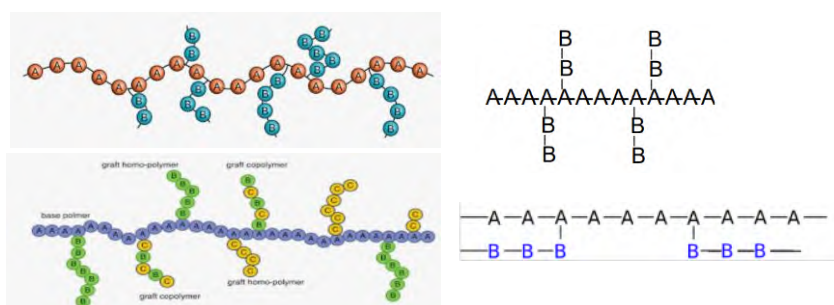
รูปที่ 1.34 โครงสร้างของวัสดุโคพอลิเมอร์ชนิด block copolymer

3.3.2.3 Random copolymer คือวัสดุโคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างมอนอเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปจัดเรียงตัวสลับกันอย่างอิสระอยู่ในโครงสร้าง A-A-A-B-A-B-A-A-B-B



รูปที่ 1.35 โครงสร้างของวัสดุโคพอลิเมอร์ชนิด random copolymer

3.3.2.4 Graft copolymer คือวัสดุโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยสองส่วนสำคัญคือส่วนที่เป็นสายโซ่หลักและส่วนที่เป็นสายโซ่กิ่ง โดยสายโซ่หลักจะประกอบด้วยมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียวและสายโซ่กิ่งจะเป็นมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่แตกต่างจากมอนอเมอร์ของสายโซ่หลักที่เชื่อมต่อกันอยู่กับสายโซ่หลักของโครงสร้าง ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงสายโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันมากได้ ส่งผลให้โครงสร้างโคพอลิเมอร์ชนิดนี้มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ มีความเหนียวน้อย โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)



รูปที่ 1.36 โครงสร้างของวัสดุโคพอลิเมอร์ชนิด graft copolymer

3.4 การจัดแบ่งวัสดุพอลิเมอร์ตามการจัดเรียงรูปร่างของโครงสร้างโมเลกุล แบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้คือ

3.4.1 พอลิเมอร์แบบเส้น (Linear polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่จากการมอนอเมอร์เรียงโครงสร้างต่อกันเป็นสายยาว มีการจัดเรียงตัวที่ชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่น มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะแข็งและเหนียวกว่าโครงสร้างแบบอื่น แต่เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้โครงสร้างอ่อนตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ สามารถผ่านกระบวนการรีไซเคิลได้ด้วยความร้อน ตัวอย่างเช่น

พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเรียงตัวกันชิดมาก แข็งแรง มีลักษณะขุ่นและเหนียว เช่น พอลิเอทิลีน (PE)

พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์อยู่ห่างกัน ทำให้โครงสร้างมีความโปร่งใสมากขึ้น เช่น

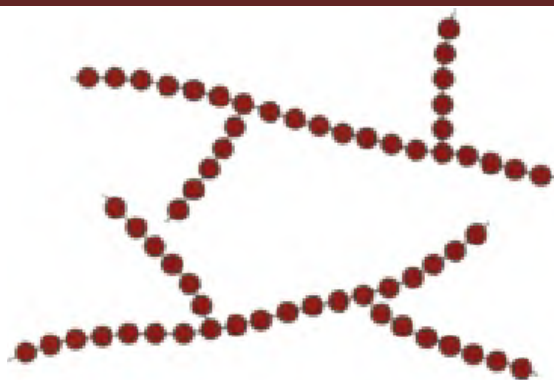
พอลิสไตรีน (PS)

พอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบของวงแหวนอะโรมาติกอยู่ในสายโซ่โมเลกุล จึงทำให้โครงสร้างเกิดการเรียงตัวแบบผลึกลามেলা (Lamella) ได้ยาก จึงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความใสมากกว่าผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์แบบเส้นชนิดอื่น เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต (PET)



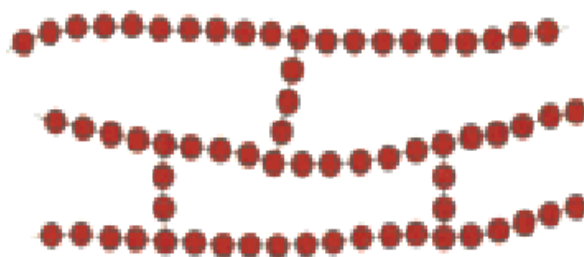
รูปที่ 1.37 รูปร่างการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์แบบเส้น

3.4.2 พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched polymer) คือพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างของมอนอเมอร์เรียงตัวเชื่อมติดกันแล้วมีการแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งสายโซ่สั้นและสายโซ่ยาว ณ จุดที่เชื่อมต่อของมอนอเมอร์ที่แตกกิ่งจากพอลิเมอร์สายโซ่หลักจะไม่สามารถเรียงตัวชิดกันได้ ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวต่ำ ความหนาแน่นต่ำ มีความเหนียวน้อย ยืดหยุ่นน้อย และสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อถูกความร้อน เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถรีไซเคิลได้ด้วยความร้อน



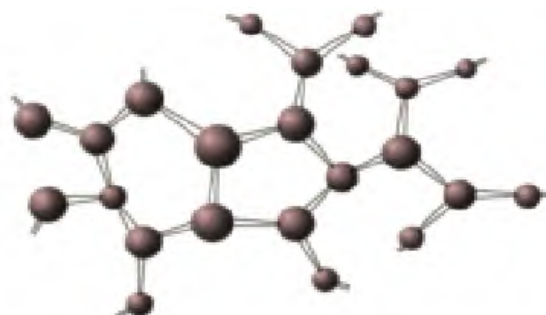
รูปที่ 1.38 รูปร่างการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์แบบกิ่ง

3.4.3 พอลิเมอร์เชื่อมขวาง (Crosslinked polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่มีรูปร่างโครงสร้างแบบการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ มีความยืดหยุ่นสูง ทนความร้อนสูงขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถรีไซเคิลพอลิเมอร์เชื่อมขวางได้โดยง่ายตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ของยาง เนื่องจากการเติมสารช่วยการเชื่อมขวางของโครงสร้าง เช่นกำมะถัน



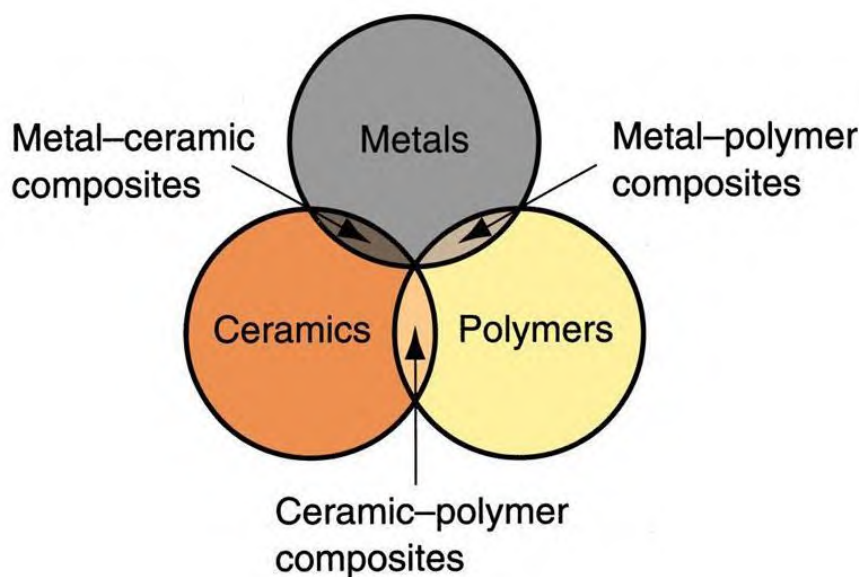
รูปที่ 1.39 รูปร่างการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง

3.4.4 พอลิเมอร์แบบร่างแห (Network polymer) เกิดจากมีการเชื่อมต่อของโครงสร้างมอนอเมอร์เข้าด้วยกันแบบสามมิติ ส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความโดดเด่นด้านความแข็งแรง ทนทาน ความแข็งสูง ทนความร้อนและไม่ยืดหยุ่นตัว ไม่สามารถรีไซเคิลได้ด้วยความร้อน ตัวอย่างเช่น เมลามีน สำหรับทำภาชนะบรรจุอาหาร



รูปที่ 1.40 รูปร่างการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์แบบร่างแห

4. **วัสดุคอมพอสิต (composite materials)** คือวัสดุที่เกิดจากการผสมผสานวัสดุมากกว่า 1 ชนิดขึ้นไป เพื่อวัตถุประสงค์ของความต้องการปรับปรุงคุณลักษณะ สมบัติ และคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นกว่าวัสดุเดิม และเป็นการลดข้อด้อยบางประการของวัสดุเดิม รวมทั้งเพื่อเพิ่มคุณค่าของผลิตภัณฑ์ใหม่ให้โดดเด่นกว่าเดิม ดังรูปที่ 1.41 เช่น การผสมรวมกันระหว่างวัสดุโลหะและเซรามิก, การผสมรวมกันระหว่างโลหะและพอลิเมอร์, การผสมรวมกันระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิกหรือการผสมรวมกันมากกว่าสองกลุ่มวัสดุขึ้นไปก็ได้เช่นกัน โดยวัสดุคอมพอสิตสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้คือ



รูปที่ 1.41 การรวมกลุ่มวัสดุหลักเพื่อการผลิตวัสดุคอมพอสิต

4.1 **วัสดุโลหะคอมพอสิต (Metal matrix composite materials, MMCs)** ตัวอย่างเช่นการเคลือบผิวโลหะด้วยเซรามิกที่เรียกว่า อีนาเมล (enamel) เพื่อเพิ่มความทนทาน เพิ่มอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น ทนการสึกกร่อน ทนความร้อนสูงขึ้น เพื่อเพิ่มความสวยงามหรือการใช้ผงเพชรเคลือบผิวใบตัดเพื่อการใช้งานด้านวัสดุเครื่องมือ (Cutting tools) ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น หรือการใช้ผงเซรามิกชนิดอะลูมินา Al_2O_3 หรือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ SiC ยึดติดลงบนผิววัสดุรองรับ (Substrate) เช่น กระดาษหรือผ้า เพื่อการผลิตกระดาษทราย, ผ้าทราย และแผ่นตัด

4.2 **วัสดุเซรามิกคอมพอสิต (Ceramic matrix composite materials, CMCs)** ตัวอย่างเช่นการผลิตคอนกรีตจากส่วนผสมหลายชนิดเช่น หิน ทราย น้ำ รวมกับซีเมนต์, การเคลือบผิวผลิตภัณฑ์เซรามิกด้วยเคลือบสี เคลือบเงา หรือเคลือบทึบ เพื่อเพิ่มความสวยงาม ความทนทานต่อการใช้งาน การทำความสะอาดผิว ผลิตภัณฑ์เซรามิกทำได้สะดวก ง่ายและสะอาดมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่เคลือบ หรือการใช้เซรามิกเคลือบลงบนชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อเพิ่มความทนความร้อน เช่น หัวเทียนรถยนต์ จานเบรค

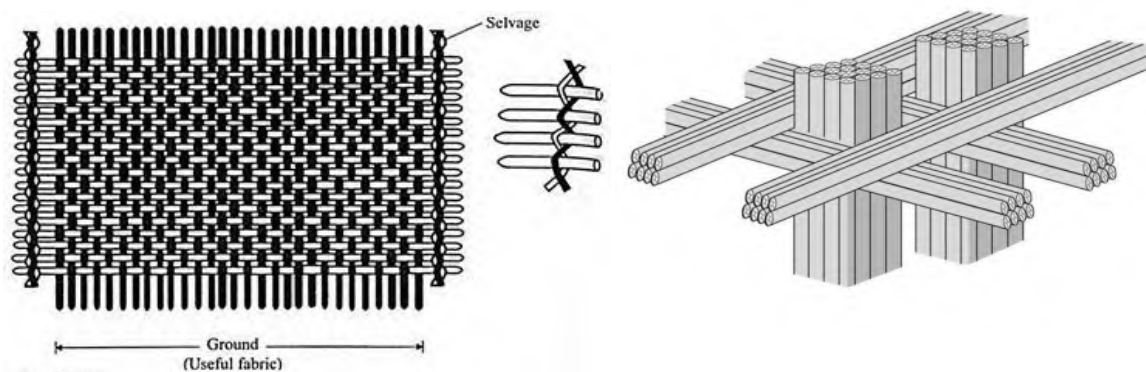
4.3 **วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer matrix composite materials, PMCs)** ตัวอย่างเช่น การเติมซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO_2), ทัลคัม (Talcum), แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$), ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ลงในยางหรือน้ำยางเพื่อเพิ่มสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรง ค่ายังมอดุลัส สำหรับการปรับปรุงสมบัติการทนความ

ร้อนเช่น ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของยาง เพิ่มสมบัติความทนทานต่อการเสียรูปทางความร้อน (Thermal shock resistance) หรือตัวอย่างการเคลือบแก้วลงบนผลิตภัณฑ์สียรถยนต์เพื่อเพิ่มความแข็ง ทำให้สียรถยนต์สดและสวยงาม ป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนบนพื้นผิวของสี เพิ่มอายุการใช้งาน ลดการผุกร่อนหรือการสึกกร่อนให้กับผลิตภัณฑ์ และการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนผิวเลนส์แว่นตาเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความทนทานต่อการเกิดรอยขีดข่วน เป็นต้น

เฟสองค์ประกอบของวัสดุคอมพอสิตแบ่งเป็น 2 ชนิดเฟสหลัก เรียกว่าเฟสพื้น (Matrix phase) และเฟสตัวเติม (Dispersed phase) โดยทั้งสองเฟสเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญและมีหน้าที่แตกต่างกันดังนี้

เฟสพื้น หรือเฟสหลัก (Matrix phase) คือเฟสต่อเนื่องของโครงสร้างวัสดุซึ่งอาจเป็นวัสดุโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์มีหน้าที่หลักของการช่วยรับและกระจายแรงภายนอกที่กระทำต่อชิ้นงาน เพื่อให้โครงสร้างวัสดุปลอดภัยจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำภายนอกดังกล่าว

เฟสกระจายหรือเฟสเสริมแรง (Dispersed phase หรือ reinforcement phase) คือ เฟสของโครงสร้างวัสดุที่ถูกเติมเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเฟสหลักให้ดีขึ้นหรือสมบูรณ์ขึ้น เช่น ความสามารถรับแรงทางกล การทนทานต่อความร้อนหรือการนำความร้อน การดูดซับและการกระจายพลังงาน หรือสมบัติอื่นๆ ให้ดีขึ้น โดยทั่วไปการเลือกใช้เฟสเสริมแรงหรือเฟสตัวเติมนี้ จะถูกพิจารณาตามรูปร่าง ลักษณะ และวิธีการ เช่น อาจมีรูปร่างเป็นผงอนุภาคนาโนเล็ก-ใหญ่ (Small-large Particle size) หรือเป็นเส้นใยสั้น-ยาว (Short-long fiber) หรือการถักทอเส้นใยเป็นผืน (2D-3D weaving of fibers) การเคลือบผิว (Coating or laminate) หรือการเสริมส่วนของชั้นโครงสร้าง (Sandwich panel)

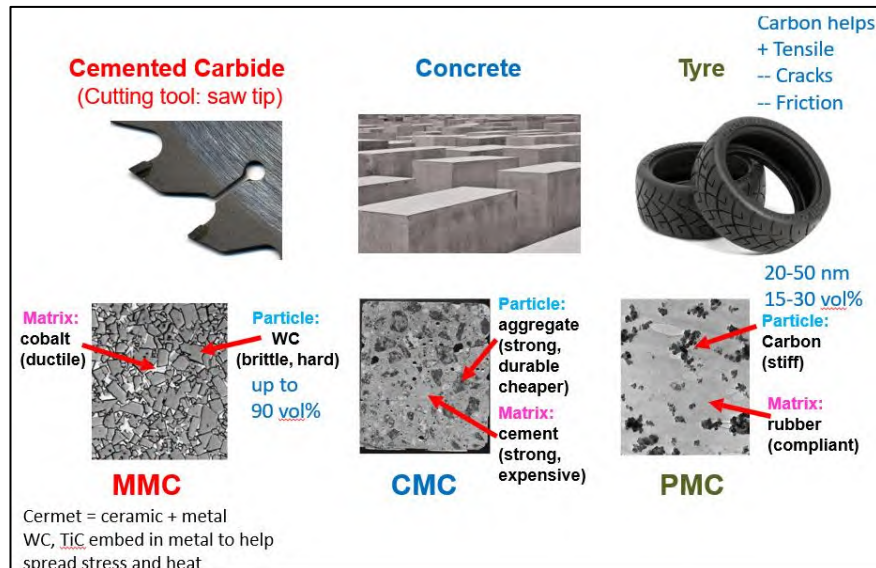


รูปที่ 1.42 การถักทอของเส้นใยแบบ 3 มิติ (3D) Schwartz, M., 2006

ดังนั้นก่อนการเลือกใช้ทั้งเฟสหลักและเฟสเสริมแรง ควรทราบคุณลักษณะและสมบัติพื้นฐานของวัสดุทั้งสองเฟสก่อนว่ามีข้อโดดเด่นและข้อด้อยใดบ้าง เพื่อการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพให้วัสดุมีประสิทธิภาพมากขึ้น ขณะเดียวกันก็เป็นการลดข้อเสียต่างๆ ที่มีอยู่เดิมให้น้อยลง รวมทั้งส่งผลดีต่อผลิตภัณฑ์คอมพอสิตที่ได้มากขึ้น ตัวอย่างของการผลิตวัสดุคอมพอสิตที่ต้องการปรับปรุงสมบัติทั้งทางกล ทางความร้อน และทางกายภาพให้ดีขึ้น

1. MMC เพื่อเพิ่มการรับแรงทางกลของวัสดุ (yield strength, σ_y), ลดการเสียรูปทางความร้อน (creep resistance), ทำให้วัสดุทนทานต่อการใช้งานมากขึ้น, สึกกร่อนยากขึ้น

2. CMC เพื่อเพิ่มการรับแรงทางกลที่เรียกว่า ความเหนียวแตกหัก (Fracture toughness, K_{IC}) ให้เพิ่มขึ้น
3. PMC เพื่อเพิ่มค่านึงมอดุลัส (Young's modulus, E), เพิ่มค่าการรับแรงทางกล (Tensile strength, TS), ลดการเสียรูปเนื่องจากความร้อน (Creep resistance)



รูปที่ 1.43 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์คอมโพสิตชนิด MMC, CMC และ PMC

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่พบเห็นทั่วไปคือคอนกรีต ประกอบด้วย ทราย หิน ปูนซีเมนต์ น้ำ สำหรับการผลิตสิ่งปลูกสร้าง อาคาร โดยหินและทรายที่มีในสูตรผลิตภัณฑ์คอนกรีตคือเฟสเสริมแรงหรือ Dispersed phase เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับงานโครงสร้างอาคารและสิ่งปลูกสร้าง ในขณะที่ซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นเฟสหลัก (Matrix phase) ซึ่งผลิตจากกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงในกระบวนการทางเซรามิก เพื่อให้ได้คลิงเกอร์ (Clinker) สำหรับใช้ในการก่อสร้าง โดยกระบวนการผลิต clinker มาจากวัตถุดิบหลักสำคัญประกอบด้วย แร่ดิน (ประกอบด้วย ซิลิกา SiO_2 และอะลูมินา Al_2O_3) ผสมรวมกับไลม์สโตน (Limestone หรือ สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ CaO) แร่เหล็ก (Fe_2O_3) ผ่านกระบวนการเผาด้วยเตาหมุนความร้อน (Rotary kiln) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1400 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ clinker 3 เกรด คือ

1. Tri-calcium silicate, Alite
2. Di-calcium silicate, Belite
3. Tri-calcium aluminate, Celite

เมื่อได้ clinker จากกระบวนการผลิตแล้ว จะมีการเพิ่มเติมยิปซัมหรือแคลเซียมซัลเฟต เพื่อหน่วง (retarding) การแข็งตัวของซีเมนต์เมื่อถูกความชื้น เนื่องจากโครงสร้างของ clinker ที่มีแคลเซียมออกไซด์จะไวต่อความชื้นในอากาศ ดังนั้นการเติมยิปซัมหรือแคลเซียมซัลเฟตจะป้องกันไม่ให้ปูนปอร์ตแลนด์ (Portland cement) แข็งตัวเร็วเกินไป นอกจากนี้การสร้างถนนยางมะตอย (Asphalt mix) คือวัสดุคอมโพสิตชนิด PMC ที่ประกอบด้วยบิทูเมนซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีลักษณะเป็นน้ำมันความหนืดสูง สีดำ ของกลุ่มพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ถูกใช้เป็นเฟสหลัก (Matrix phase)

และหिनกรวดทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรง (Dispersed phase) ให้กับโครงสร้างถนน โดยสัดส่วนการใช้เฟสหลักและเฟสตัวเติมสามารถคำนวณได้จากสูตรการผลิตวัสดุคอมพอสิตที่ใช้เฟสเสริมแรงชนิดอนุภาค ดังสมการ 1.8 และ 1.9

ค่าสูงสุดของผลิตภัณฑคอมพอสิต

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad (1.8)$$

ค่าต่ำสุดของผลิตภัณฑคอมพอสิต

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (1.9)$$

กำหนดให้ E คือค่ายังมอดุลัส, (u) คือค่าสูงสุด (upper bound), (l) คือค่าต่ำสุด (lower bound), V_m คือ volume fraction of matrix, V_p คือ volume fraction of dispersed phase, E_m คือค่ายังมอดุลัสของ matrix phase และ E_p คือค่ายังมอดุลัสของ dispersed phase

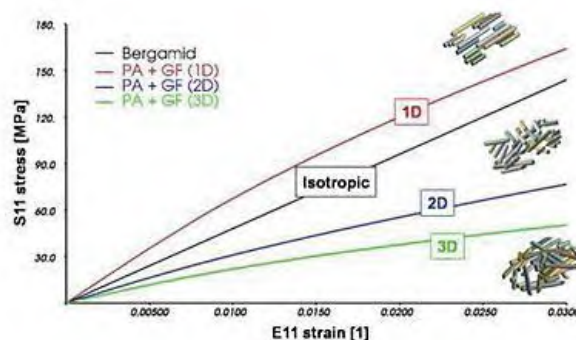
สำหรับการเลือกผลิตวัสดุคอมพอสิตด้วยการใช้เส้นใยช่วยเสริมแรงหรือปรับปรุงคุณภาพจะมีสูตรการคำนวณค่าของผลิตภัณฑคอมพอสิตที่ได้ ดังสมการ 1.10

$$E_c = E_m V_m + K E_f V_f \quad (1.10)$$

กำหนดให้ TS คือค่าการรับแรงดึง (Tensile strength), m คือ matrix phase, V_m คือ volume fraction of matrix, V_f คือ volume fraction of fiber, k คือค่าคงที่สำหรับการคูณ ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงของเส้นใยดังนี้

efficiency factor:

- aligned 1D: $K = 1$ (anisotropic)
- random 2D: $K = 3/8$ (2D isotropy)
- random 3D: $K = 1/5$ (3D isotropy)



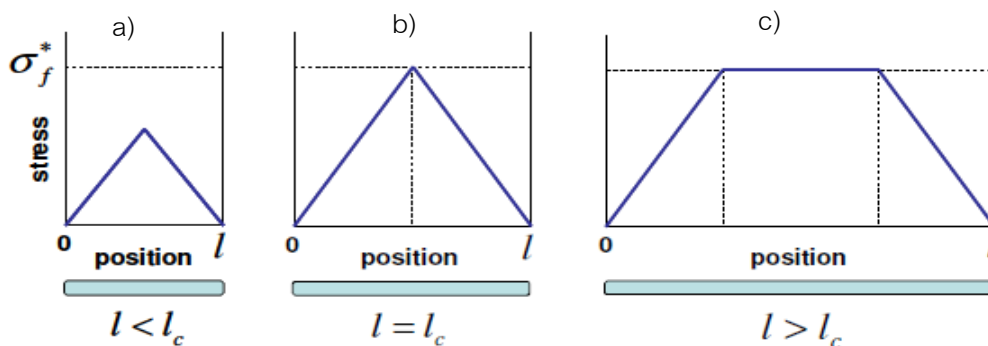
รูปที่ 1.44 ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยต่อประสิทธิภาพการรับแรงทางกลของวัสดุคอมพอสิต

ดังนั้นทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย ส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑคอมพอสิตที่ได้แตกต่างกัน ดังรูปที่ 1.44 การจัดเรียงเส้นใยในทิศทางแบบ 1D ส่งผลดีต่อการรับแรงทางกลได้สูงสุดมากกว่า 2D และ 3D ตามลำดับ จึงจำเป็นต้องคำนวณค่าความยาววิกฤติที่เหมาะสมของเส้นใยว่าควรเลือกใช้เส้นใยขนาดกว้างยาวอย่างไรเพื่อการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑที่ต้องการ โดยคำนวณได้จากสมการ 1.11

$$\text{Critical Fiber Length: } L_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (1.11)$$

dispersed phases strength in tension
dispersed phases diameter
shear strength of dispersed phases -matrix interface

โดยขนาดความยาวที่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการรับและกระจายแรงดังรูป 1.45 คือ หากเลือกใช้ความยาวน้อยกว่าความยาววิกฤติ คุณภาพการรับและกระจายแรงมีค่าน้อย ดังรูป 1.44a, แต่ถ้าเลือกใช้ความยาวเส้นใยเท่ากับค่าความยาววิกฤติจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับแรงสูงขึ้น แต่ถ้าต้องการคุณภาพการเสริมแรงที่ดีที่สุดและการใช้งานได้นานมากที่สุด ควรเลือกใช้ค่าความยาวเส้นใยมากกว่าความยาววิกฤติดังรูป 1.44c

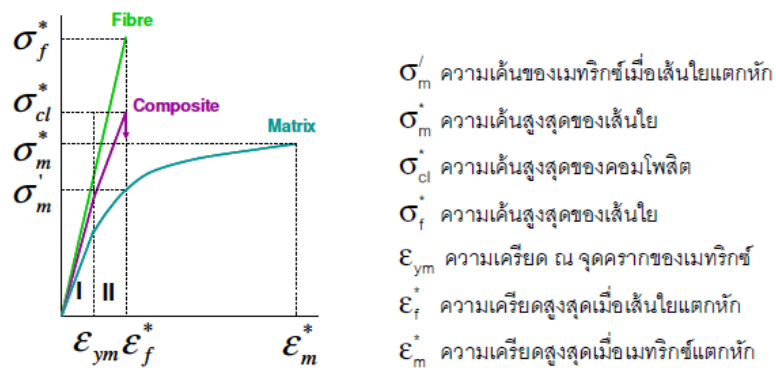


รูปที่ 1.45 การเลือกใช้ความยาวเส้นใยเทียบกับความยาววิกฤติ Callister, W.D., 2007

นอกจากทิศทางของการจัดวางเส้นใยจะมีผลต่อคุณภาพวัสดุคอมพอสิตแล้ว ชนิดของเส้นใยที่เลือกใช้ก็ส่งผลต่อคุณภาพวัสดุคอมพอสิตเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 1.46

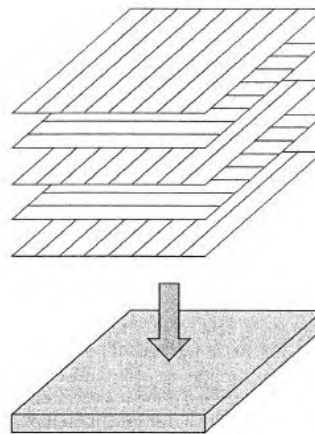
ตารางที่ 1.6 ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยส่งผลต่อการรับและกระจายแรงที่ต่างกัน

การจัดเรียงตัวเส้นใย	ทิศทางความเค้น	ประสิทธิภาพการเสริมแรง (K)
เส้นใยขนานกันทุกเส้น (1D)	ขนานกับเส้นใย	1
	ตั้งฉากกับเส้นใย	0
เส้นใยกระจายตัวในทิศทาง 2D	ทุกทิศทางระนาบ 2D	3/8
เส้นใยกระจายตัวในทิศทาง 3D	ทุกทิศทางระนาบ 3D	1/5

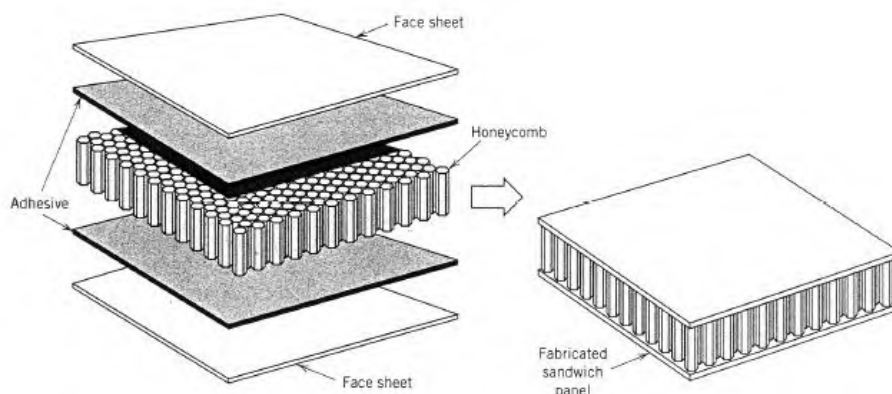


รูปที่ 1.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย เฟสพื้น และวัสดุเมทริกซ์ในคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใย Callister, W.D., 2007

การผลิตวัสดุคอมโพสิตโครงสร้าง (Structural composite) มี 2 ลักษณะคือ การเคลือบทับ (Laminate) และแบบเสริมชั้นแซนด์วิช (Sandwich panels)



รูปที่ 1.47 วัสดุคอมโพสิตแบบเคลือบทับหรือลามิเนต Callister, W.D., 2007

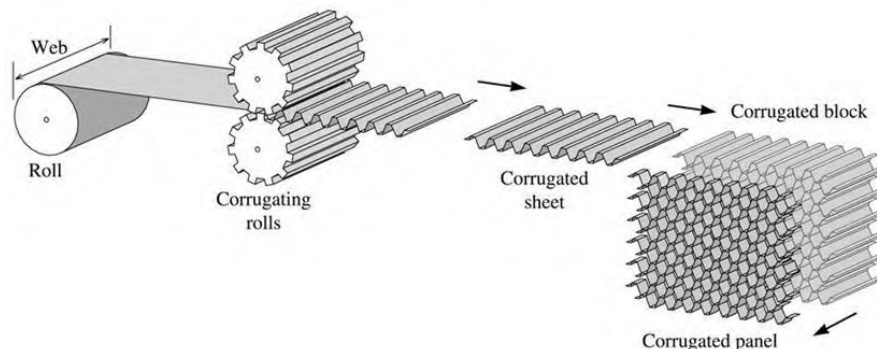


รูปที่ 1.48 วัสดุคอมโพสิตชนิดแผ่นประกอบแบบแซนด์วิช Callister, W.D., 2007

ข้อดีของการเลือกใช้เฟสตัวเติมชนิดโครงสร้างคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักเบา รูปทรงสูง ยึดหยุ่นตัว ความแข็งแรงสูง ทนอุณหภูมิสูง ทนความร้อน ทนน้ำมัน และทนการกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตชนิดโครงสร้าง

สามารถถูกออกแบบให้มีรูปร่าง รูปทรง เหมาะกับตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งและใช้งานเช่นการทำเป็นทรงเหลี่ยม ทรงกลม ม้วนโค้ง แบบรอยหยักที่เรียกว่าคอรูเกต (Corrugated core) หรือรูปแบบอื่น ๆ ได้ง่าย

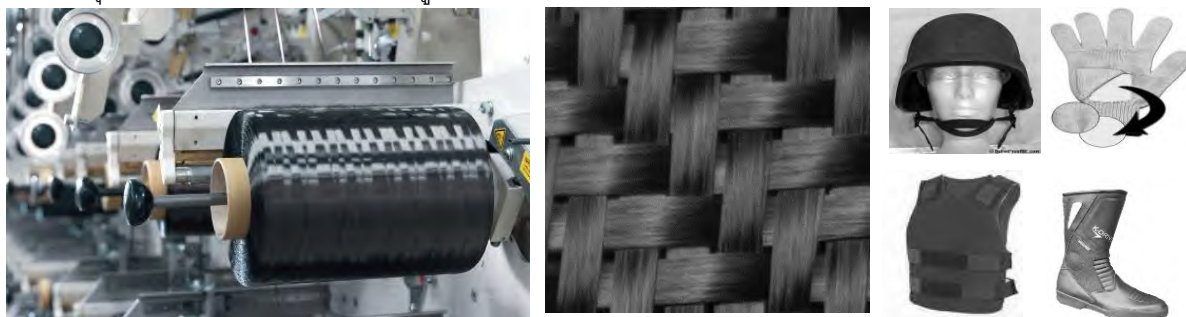
กระบวนการผลิตวัสดุคอมพอสิตชนิดโครงสร้างมีหลายวิธี เช่น การอัดรีด (Extrusion) การขึ้นรูปโดยการกดอัดด้วยแบบพิมพ์ (Compression molding) การม้วนรีด (Rolling) หรืออาจใช้วิธีการเชื่อม การบัดกรี เพื่อช่วยให้การยึดเกาะระหว่างผิวรอยต่อของเฟสพื้นและเฟสตัวเติมแข็งแรง



รูปที่ 1.49 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมพอสิตแบบรังผึ้งคอรูเกต (Corrugated honeycomb core) Engineering

Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Materials Park, OH, 1987.

ข้อดีของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตคือ มีการใช้งานแพร่หลาย เนื่องจากราคาไม่แพง ขึ้นรูปง่ายที่อุณหภูมิห้อง พอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเฟสพื้นมากที่สุดคือพอลิเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์แต่ยังมีพอลิเมอร์ประเภทอื่นๆ อีกตัวอย่างเช่น อีพอกซีซึ่งมีราคาสูงกว่าพอลิเอสเตอร์หรือไวนิลเอสเตอร์ แต่มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าและสามารถทนความชื้นได้สูงกว่าหรือพอลิไอมิดเรซิน (Polyimide resin) ซึ่งทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป จึงถูกใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง 230°C สำหรับพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyether etherketone, PEEK) พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (Polyphenylene sulphide, PPS) พอลิอีเทอร์ไอมิด (Polyetherimide, PEI) มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานด้านยานอวกาศ รวมทั้งการใช้เส้นใยเคฟล่า (Kevlar) ที่สามารถรับแรงทางกลสูงมากสำหรับการผลิตวัสดุคอมพอสิตจำพวก ถุงมือ หมวก เสื้อผ้า รองเท้า ดังรูป 1.50



รูปที่ 1.50 การประยุกต์ใช้งานของผลิตภัณฑ์คอมพอสิตเคฟล่าเพื่อผลิต หมวก ถุงมือ รองเท้าและเสื้อ Saito, S., 1988

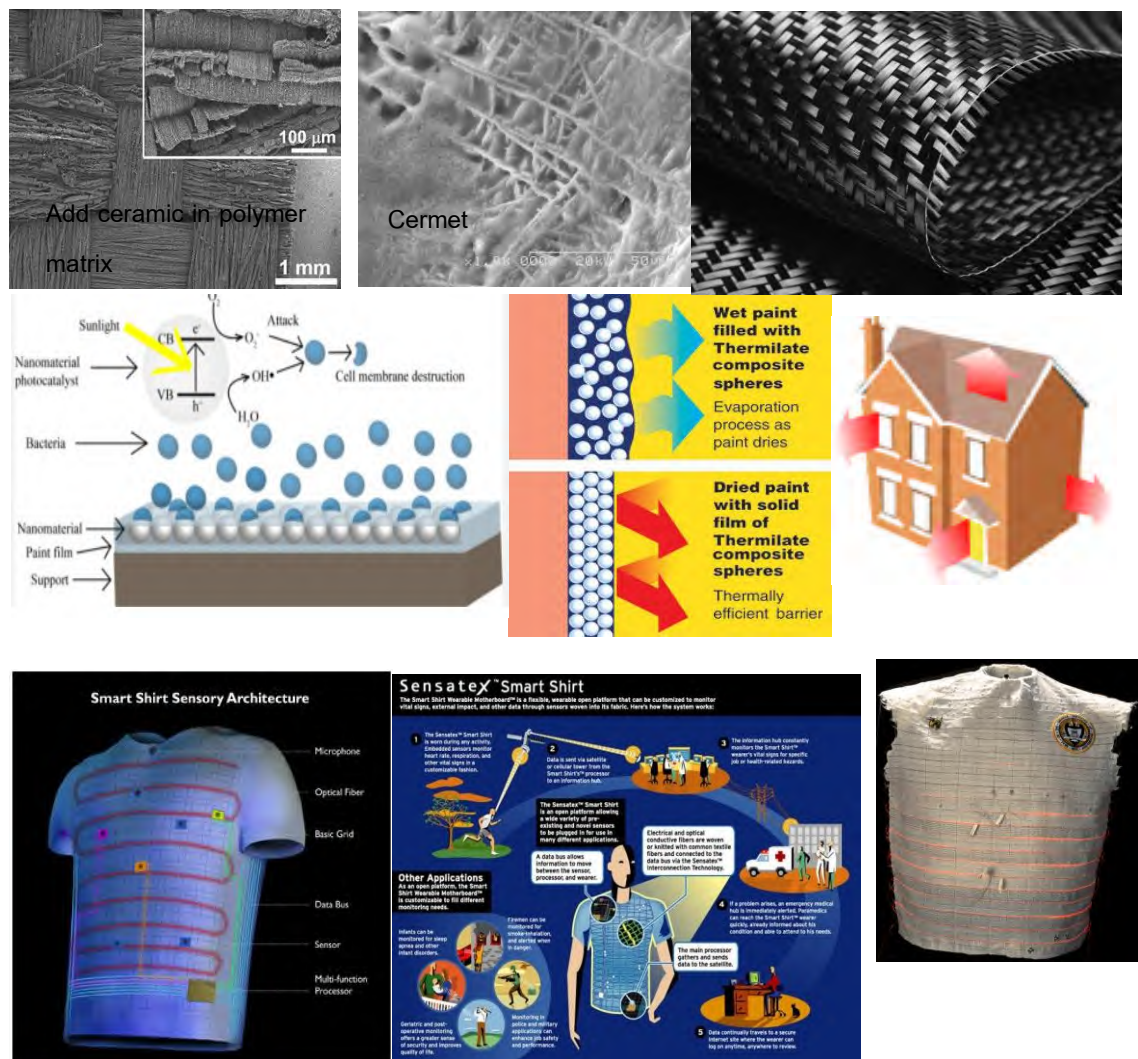
โดยทั่วไปแล้ว วัสดุเซรามิกหรือนาโนเซรามิกสามารถทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ที่อุณหภูมิสูงแต่มีข้อด้อยคือมีค่าความทนทานต่อการแตกหักต่ำเมื่อเทียบกับโลหะ ดังนั้นวัสดุเซรามิกจึงถูกปรับปรุงสมบัติให้มี

ความเหนียวและรับแรงได้ดีขึ้น จึงนำมาทำเป็น NCMCs ซึ่งการเสริมแรงสามารถทำได้โดยการเติมเฟสตัวเติมชนิดอนุภาค เส้นใยสั้นหรือวิสเกอร์ หรือเส้นใยยาวหรือไฟเบอร์

Cermet หรือ ceramic-metal composite คือ MMCs ที่มีเฟสพื้นเป็นโลหะน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและเสริมแรงด้วยอนุภาคเซรามิกจำพวกออกไซด์ โบไรด์ คาร์ไบด์ หรืออะลูมินา ส่วนโลหะที่ทำหน้าที่เป็นเฟสพื้นอาจเป็นนิกเกิล โมลิบดีนัม หรือโคบอลต์ ตัวอย่าง Cermet เช่น เฟสพื้นชนิดโคบอลต์หรือนิกเกิลเสริมแรงด้วยอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ หรือไทเทเนียมคาร์ไบด์ (อาจเติมได้มากถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) วัสดุที่ได้จะมีความแข็งแรงมาก (รองจากเพชร) และสามารถทนความร้อนได้ดีตัวอย่างการใช้งานของ Cermet ได้แก่ ใช้ในกระบวนการผลิตตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีวัสดุคาร์บอน-คาร์บอนคอมโพสิต (Carbon-carbon composite) เป็นวัสดุคาร์บอนคอมโพสิตแบบใหม่และมีราคาแพง แต่มีสมบัติที่น่าสนใจ เนื่องจากมีความอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงสูงที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีความต้านทานการยืดตัว (Creep) ความทนทานต่อการแตกหัก สภาพการนำความร้อนสูง และมีสมบัติการขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถนำไปใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องยนต์หลายอย่างเช่น ทรายนต์ จรวด และเครื่องบิน ใช้เป็นวัสดุเพิ่มความเสียดทานประเภท เบรก คลัช ให้กับเครื่องบิน อากาศยานและทรายนต์สมรรถนะสูง หรือทำแบบพิมพ์อัดร้อน (Hot Isostatic Pressing) Hot pressing เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานของวัสดุคาร์บอนคอมโพสิตมีหลายอย่าง เช่น อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องจักร อุตสาหกรรมสิ่งทอได้แก่ เสื้อผ้าหรือเส้นใยทนความร้อน อุตสาหกรรมสีทาอาคารที่สามารถทนแสงแดด สะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ต เลือกันกระสุน ผนวความร้อนสำหรับเครื่องบินและอากาศยาน ทรายนต์กันกระสุน กระจกกันกระสุน หมวกนิรภัยรับแรงกระแทก รวมทั้งการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์และทันตกรรมเช่นรากฟันเทียม ฟันปลอม ดังแสดงในตารางที่ 1.7

ตารางที่ 1.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวัสดุคาร์บอนคอมโพสิต

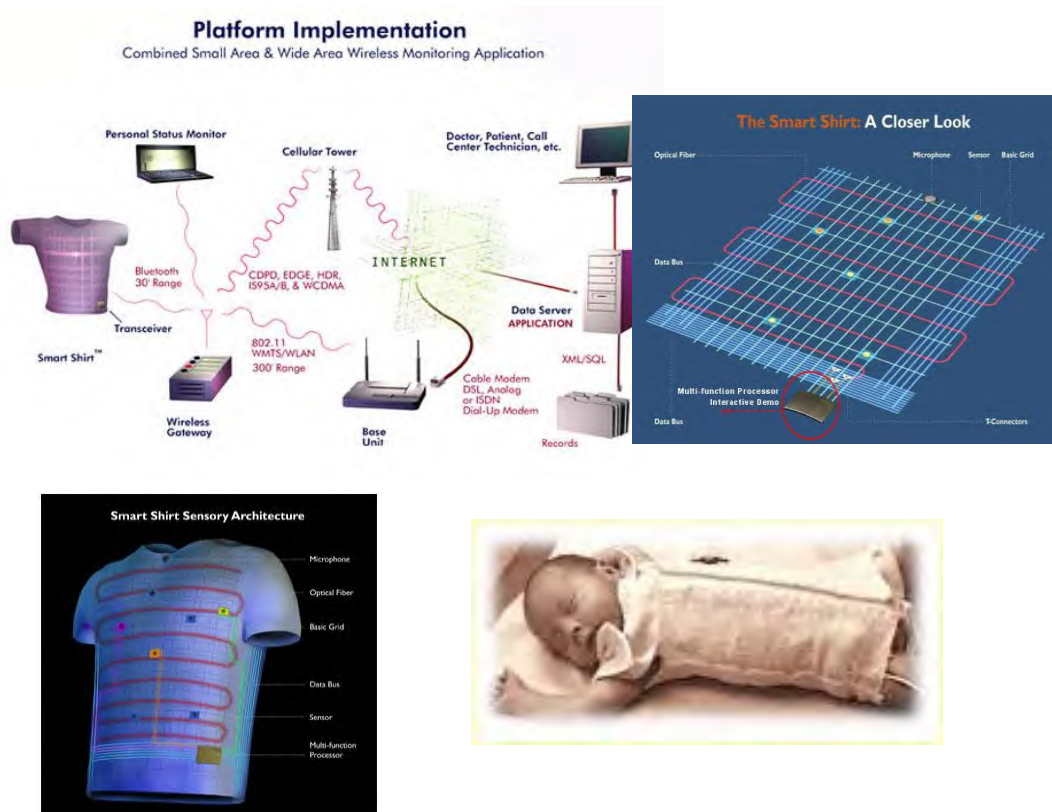
ระบบ	ประโยชน์
Cu-CdO	ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical contact materials)
Al-ZrO ₂	ชิ้นส่วนในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (Possible use in nuclear reactors)
Be-BeO	ชิ้นส่วนอากาศยานและเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (Aerospace and nuclear reactors)
Co-ThO ₂ , Y ₂ O ₃	วัสดุแม่เหล็กที่สามารถต้านทานการยืดตัว (Possible creep-resistant magnetic materials)
Ni-20% Cr-ThO ₂	ส่วนประกอบของใบพัดในเครื่องยนต์ (Turbine engine components)
Pb-PbO	ขั้วแบตเตอรี่ (Battery grids)
Pt-ThO ₂	ขดลวดไฟฟ้า (Filaments), ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ (electrical components)
W-ThO ₂	ขดลวดไฟฟ้า (Filaments), ขดลวดความร้อนหรือฮีตเตอร์ (Heaters)



รูปที่ 1.51 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิต เช่น เสื้ออัจฉริยะและสีทาอาคาร Dresselhaus, M.S., et al., 1988

จากรูป 1.51 แสดงตัวอย่างวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตเซรามิกสำหรับการผลิตเป็นฉนวนความร้อนของเครื่องบิน รถยนต์ วัสดุกั้นกระสุนหรือรับแรงกระแทกของรถยนต์ วัสดुकอมพอสิตเซรามิกในล้อยางรถยนต์ วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตของพื้นปอลอม ฐานรองพื้น คอพื้น วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อกหรือวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตสำหรับเรือเพื่อให้น้ำหนักเบา นอกจากนี้ยังอาจใช้วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตในการผลิตเสื้อทหารกันกระสุนที่เรียกว่าเสื้อเซรามิต (Cermet) หรือการผลิตเสื้อทนความร้อนสำหรับการใช้การดับเพลิง เสื้ออัจฉริยะสำหรับการติดตามดูแลผู้ป่วยอย่างใกล้ชิด และการผลิตวัสดुकอมพอสิตเซรามิกสำหรับอุตสาหกรรมสีทาอาคารให้ทนความร้อน-แสงแดด สีทาอาคารขีดข่วน และเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น

นอกจากนี้วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตยังสามารถผลิตเสื้ออัจฉริยะ (Smart shirt) สำหรับการติดตามผลการรักษาและดูแลผู้ป่วย เด็ก ทารก โดยการติดเซนเซอร์ไว้ภายในเสื้อหรือการผลิตเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิ ความร้อน อัตราการแพร่ก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซอื่น ๆ เป็นต้น



รูปที่ 1.52 ผลิตภัณฑ์วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตสำหรับการผลิตเสื้ออัจฉริยะสำหรับเด็กและผู้ป่วย Kasap, S.O., 2002

ประโยชน์การใช้งานของวัสดุเซรามิกคอมพอสิต (CMC) มีดังต่อไปนี้

- ใช้ในการผลิตโครงสร้างยานพาหนะประเภทต่าง ๆ เช่น รถยนต์ขนาดเล็ก รถบรรทุก
- ใช้ในการผลิตสัญญาณไฟจราจรอัจฉริยะสำหรับการจราจรบนถนน
- ใช้ผลิตสีอุตสาหกรรม
- ใช้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ได้แก่ เบรก คลัช แหวนรอง ชิ้นส่วนภายในห้องเครื่องยนต์ เป็นต้น
- ผลิตภัณฑ์ควบคุมอุณหภูมิ เช่น เครื่องปรับอากาศ ระบบฮีทเตอร์
- ผลิตภัณฑ์ปฏิกริยาในอุตสาหกรรม
- ผลิตภัณฑ์โครงสร้างและชิ้นส่วนเครื่องบินและอากาศยาน
- ผลิตภัณฑ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- ผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์เตาปฏิกรณ์ปรมาณูเช่น ฉนวนหุ้มเตาปฏิกรณ์ปรมาณู
- ผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ทางการแพทย์
- ผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์สำหรับวัสดุเครื่องมือ (Cutting tools)
- ผลิตชิ้นส่วนสำหรับระบบการสื่อสาร โทรคมนาคม เวดาร์

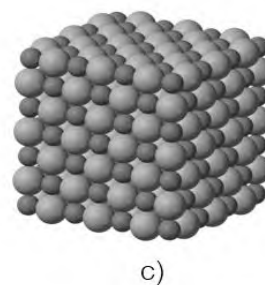
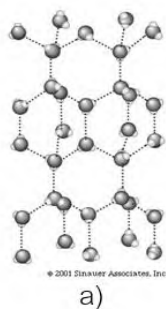
ข้อดีของการเลือกใช้วัสดุเซรามิกคอมพอสิต (CMC) มีดังต่อไปนี้คือ ความแข็งแรงสูง การยึดเกาะแน่น ความเหนียวสูง ประสิทธิภาพการใช้งานสูง ลดต้นทุนการผลิต รับแรงกระแทกดี ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความ

ร้อนต่ำ (Low heat transfer coefficient) ทนการกัดกร่อน น้ำหนักเบา มีความสวยงาม การออกแบบใช้งานมีหลายรูปแบบโดยคำนึงถึงความต้องการใช้งาน โดยทั่วไปพันธะหลัก (Primary bond) ของเซรามิกคือพันธะไอออนิกแต่มีเซรามิกบางชนิดที่มีพันธะหลักคือพันธะโควาเลนต์ เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ซิลิคอนไนไตรด์ (Si₃N₄) โบรอนคาร์ไบด์ (B₄C) ซิลิกา (SiO₂) คาร์บอนและเส้นใยแก้วที่สามารถผลิตวัสดุคอมพอสิตได้เช่นเดียวกันสรุปได้ว่าข้อดีของผลิตภัณฑ์เซรามิกคอมพอสิต (CMC) มีดังนี้คือ

1. พันธะยึดเหนี่ยวสารประกอบเซรามิกชนิดพันธะไอออนิกและพันธะโควาเลนต์มีความแข็งแรงสูง
 2. จุดหลอมเหลวสูง
 3. ต้านทานการกัดกร่อนที่ดี
 4. มีความเสถียรทางเคมีและคงสภาพโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง โดยไม่เกิดการเสียรูป
 5. การรับแรงกดสูง
 6. เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง
 7. ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงและการรับแรงดึงยึดต่ำ
 8. การรับแรงทางกลสูงขึ้น ลดปัญหาเรื่องความเสียหาย (Failure) เมื่อเติมเฟสตัวเติมหรือสารเสริมแรง
 9. สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ ลดปัญหาการแตกร้าวหรือช่วยยืดอายุการใช้งาน
- ผลิตภัณฑ์ให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น

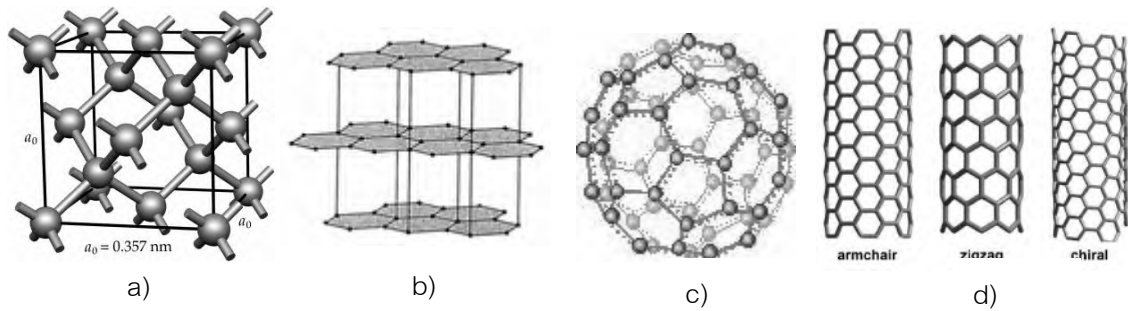
นอกจากนี้ยังมีกลุ่มวัสดุที่กล่าวได้ว่ามีโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกัน แต่เป็นโครงสร้างผลึก โครงสร้างแบบร่างแห และโครงสร้างของกลุ่มวัสดุทั้งตัวนำ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4. **โครงสร้างผลึกโมเลกุล** เช่น น้ำแข็ง น้ำตาล เกลือ จัดเป็นวัสดุของแข็งผลึกเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีความแข็งแรงและทำให้โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ

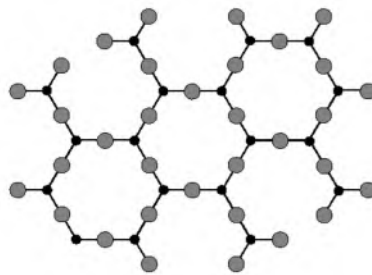


รูปที่ 1.53 โครงสร้างผลึกของโมเลกุล: a) น้ำแข็ง, b) น้ำตาล, c) เกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

5. **โครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห (Network)** ของวัสดุนาโนเซรามิกชนิดคาร์บอนที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวด้วยพันธะโควาเลนต์ เช่น เพชร แกรไฟต์ และโครงสร้างแอลโลโทรป (Allotrope) ของคาร์บอนที่เรียกว่า บัคกี้บอล (Buckyball) หรือบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์เร็น (Buckminster fullerene) และท่อนาโนคาร์บอนดังรูป 1.47 และวัสดุเซรามิกชนิดซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) หรือ ควอตซ์ (Quartz) ดังรูป 1.54

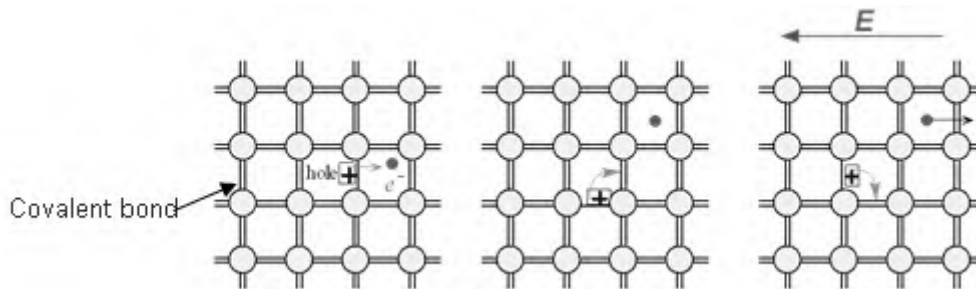


รูปที่ 1.54 โครงสร้างแบบโครงร่างแห (Network) ของ a) เพชร, b) แกรไฟต์, c) บัคกี้บอล, และ d) ท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 1.55 โครงสร้างผลึกของควอตซ์หรือซิลิกา (SiO_2)

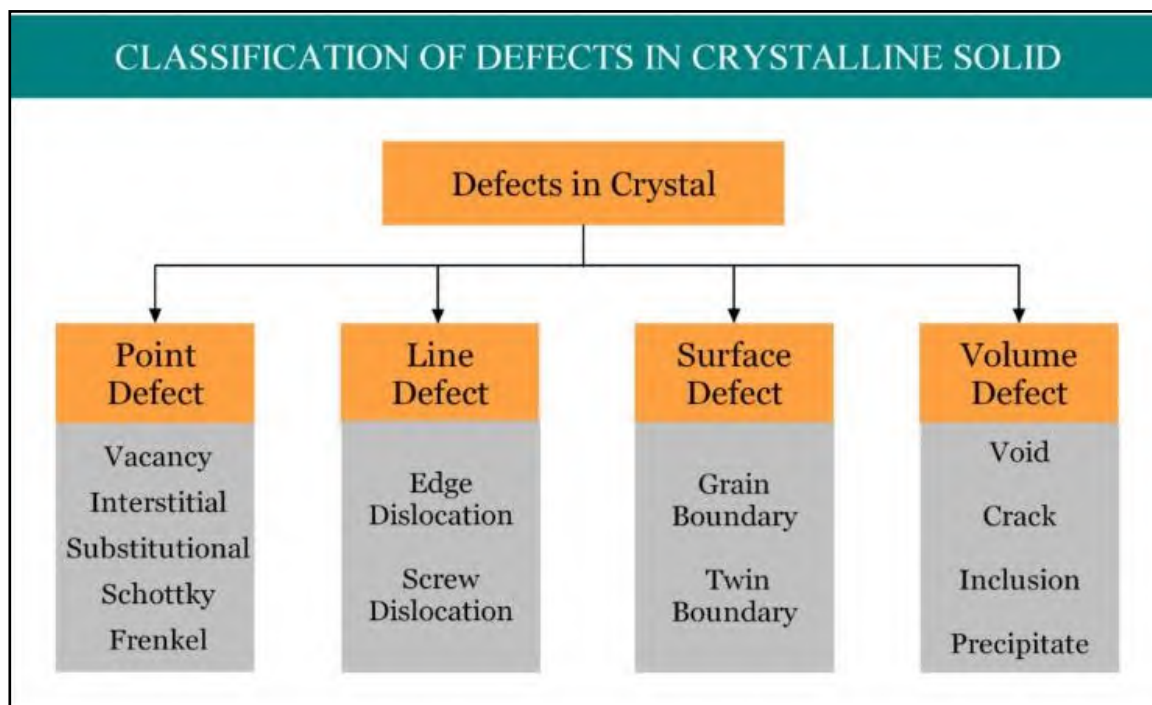
7. โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวด้วยพันธะโควาเลนต์และมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่เป็นระเบียบ ได้แก่ ซิลิคอน (Si) เจอมาเนียม (Ge) ดังรูป 1.56



รูปที่ 1.56 โครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิคอน (Si): a) ซิลิคอนในสถานะที่มีอุณหภูมิสูง, b) อิเล็กตรอนและโฮลเกิดการเคลื่อนที่, c) ซิลิคอนในสถานะที่มีการให้สนามไฟฟ้า

จากโครงสร้างทางวิศวกรรมวัสดุที่กล่าวในเบื้องต้น ควรเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีโครงสร้างด้านวัสดุ อย่างไรก็ตามโครงสร้างของวัสดุที่พบในธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้น ก็อาจมีความไม่สอดคล้องกับทฤษฎีเนื่องจากมีหลายปัจจัยมาเกี่ยวข้อง เช่น แหล่งที่มาของวัตถุดิบ องค์ประกอบทางเคมี สภาพแวดล้อมทางกายภาพและทางเคมี ความชื้น การเกิดปฏิกิริยา การปนเปื้อน ได้ส่งผลต่อโครงสร้างที่เปลี่ยนไป ไม่เป็นไปตามทฤษฎีด้านวิศวกรรมวัสดุทำให้อุณหภูมิ สมบัติ พลังงานการทำงานของวัสดุเปลี่ยนไปเนื่องจากโครงสร้างที่เปลี่ยนไป ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างที่เกิดขึ้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรศึกษาว่ามีข้อบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้าง

แบบใดบ้างที่เป็นปัจจัยทำให้คุณลักษณะของวัสดุ คุณภาพและสมบัติของผลิตภัณฑ์ต่างไปจากเดิม เพื่อการพัฒนาและปรับปรุงการเตรียมวัตถุดิบ ปรับปรุงกระบวนการผลิต แต่ก็ยังพบว่าข้อบกพร่องบางอย่างไม่ได้เป็นข้อเสียหรือข้อด้อยที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายแต่อย่างใด เนื่องจากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ เกิดนวัตกรรมด้านวิศวกรรมวัสดุได้เช่นเดียวกัน รวมทั้งเป็นการเพิ่มทางเลือกของการผลิตวัสดุใหม่ๆ ที่มีคุณภาพสูงมากขึ้น ดังนั้นทั้งวัสดุผลึก วัสดุอะมอร์ฟัส วัสดุกึ่งผลึกและวัสดุหลายผลึก มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องได้หลายชนิดจากหลายปัจจัยดังต่อไปนี้



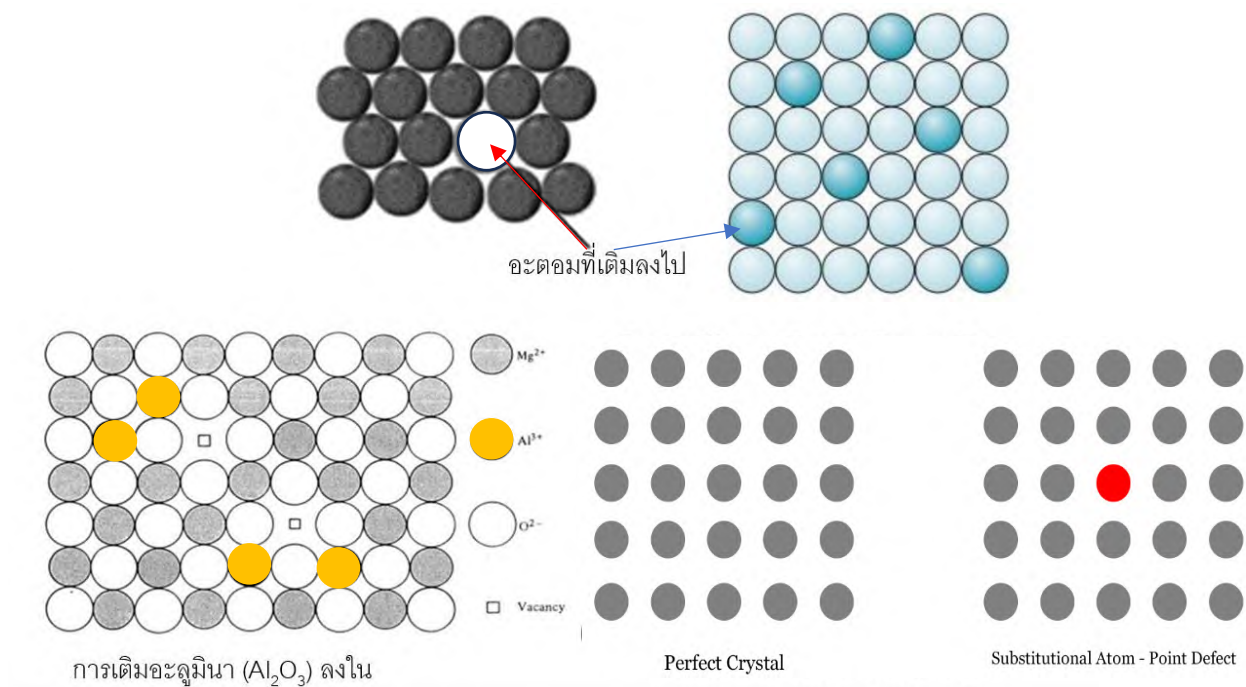
Classification of crystalline defects.

รูปที่ 1.57 ข้อบกพร่องแบบต่างๆ ของวัสดุผลึก

ความบกพร่องของโครงสร้าง (Structure Imperfection)

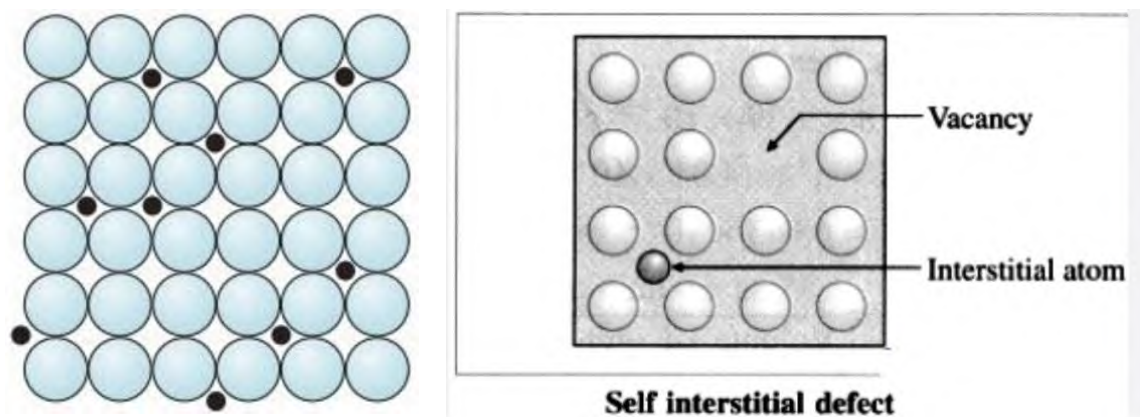
1. โซลิดโซลูชันและความบกพร่องทางเคมี (The solid solution-chemical imperfection) คือความบกพร่องแบบการเติม แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

1.1 ความบกพร่องแบบเติม Substitutional solid solution คือ การมีอะตอมชนิดอื่นปะปนอยู่ในโครงสร้างโดยที่ขนาดอะตอมที่เพิ่มเติมลงไปมีขนาดเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอะตอมเดิมของโครงสร้างหลัก

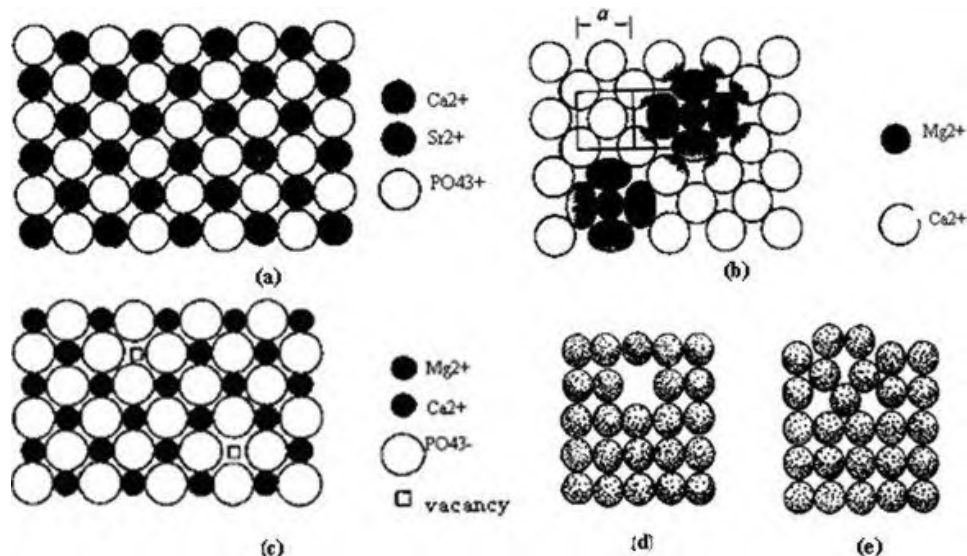


รูปที่ 1.58 การเติมอะตอมอื่นที่มีขนาดใกล้เคียงกันลงในตำแหน่งอะตอมหลัก

1.2 ความบกพร่องแบบเติมลงในตำแหน่งช่องว่างระหว่างอะตอมหลัก Interstitial solid solution คือ อะตอมที่มีขนาดเล็กกว่าอะตอมหลักแทรกอยู่ภายในโครงสร้าง ณ ตำแหน่งที่เรียกว่า ช่องว่าง (Void) ของอะตอมหลัก



รูปที่ 1.59 อะตอมที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกอยู่ในช่องว่างของอะตอมหลัก

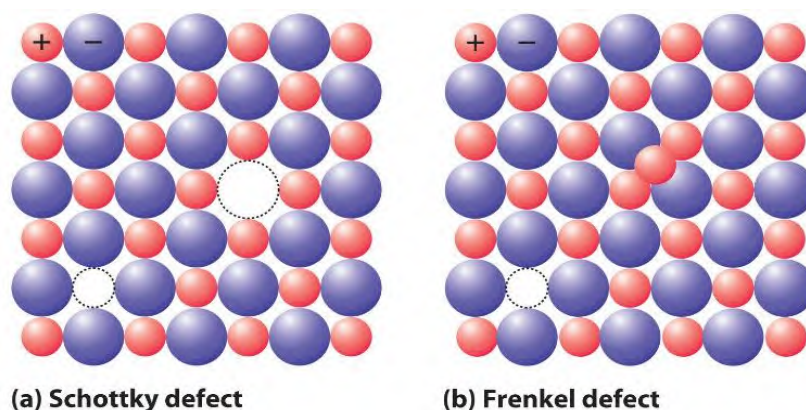


รูปที่ 1.60 ข้อบกพร่องของโครงสร้างสารประกอบแคลเซียม: a) ความบกพร่องแบบการเติม (Substitutional solid solution), b) ความบกพร่องแบบการเติมอะตอมลงในช่องว่างระหว่างอะตอมหลัก (Interstitial solid solution), c) ความบกพร่องของตำแหน่ง (Point defect), d) microdiffusion vacancy mechanism, e) interstitial mechanism
W. Song, M. Tian, F.Chen, Y.Tian, 2009: 430-8

2. ความบกพร่องของตำแหน่ง (Point defect) แบ่งได้เป็น 2 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างวัสดุเซรามิกประกอบด้วยแคตไอออน (ประจุบวก) และแอนไอออน (ประจุลบ)

2.1 ความบกพร่องแบบเฟรนเคิล Frenkel disorder คือการที่มีหนึ่งไอออนเคลื่อนที่ออกไปจากตำแหน่งเดิมไปอยู่ยังตำแหน่งที่เป็นช่องว่างขนาดเล็ก (Interstitial) ระหว่างไอออนหรืออะตอม แล้วทำให้ตำแหน่งเดิมที่ไอออนนั้นหลุดออกมากลายเป็นที่ว่าง (Vacancy)

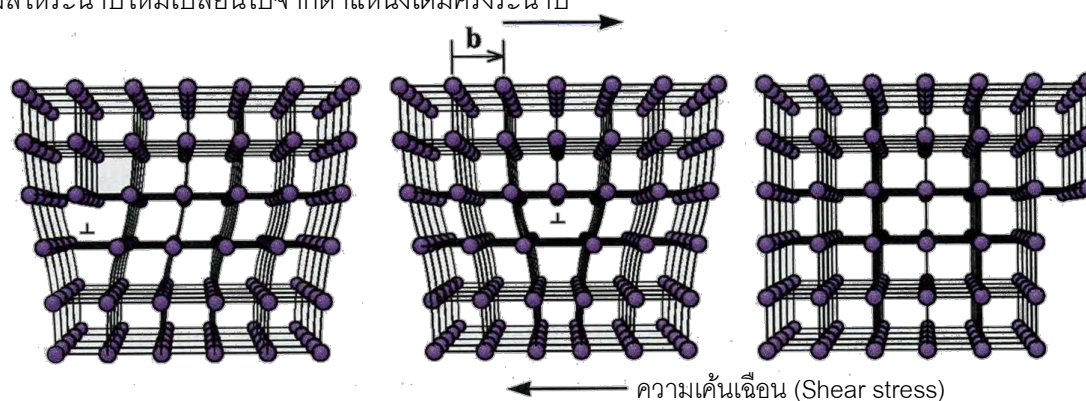
2.2 ความบกพร่องแบบชอตกี Schottky disorder คือการหลุดของไอออน 2 ชนิด (แคตไอออนและแอนไอออน) ออกจากตำแหน่งเดิมทำให้ตำแหน่งที่ทั้งสองไอออนหลุดออกไปกลายเป็นที่ว่าง (Vacancy)



รูปที่ 1.61 ความบกพร่องของตำแหน่ง (Point defect)

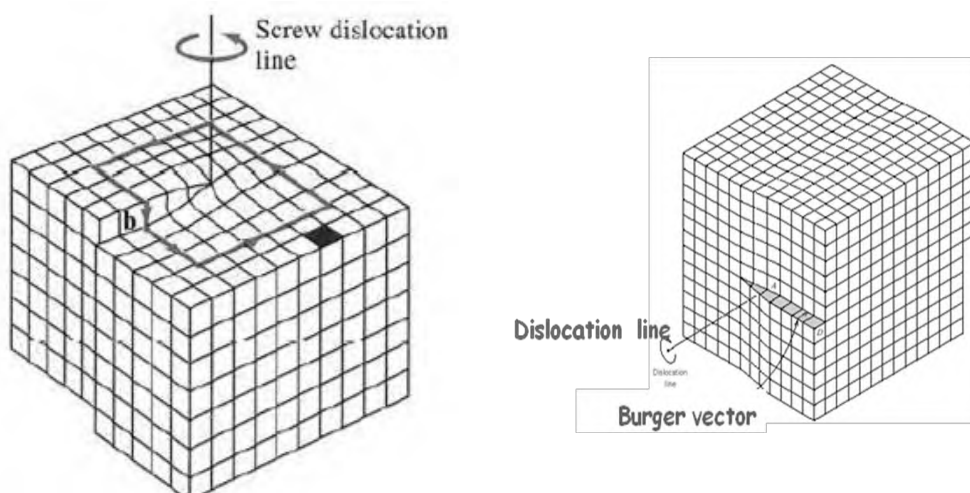
3. ความบกพร่องแบบดิสโลเคชันหรือแบบเส้น (Dislocation or Line defect) แบ่งเป็น 3 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวได้รับความเค้น (Stress) หรือแรงกระทำจากภายนอกทำให้ระนาบภายในโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม

3.1 ดิสโลเคชันแบบเอ็ดจ์ (Edge dislocation) เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างได้รับความกระทำจากภายนอกทำให้ทิศทางของระนาบเกิดการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับเบอร์เกอร์เวกเตอร์ (Burgur vector, b) ซึ่งเป็นเวกเตอร์อ้างอิงส่งผลให้ระนาบใหม่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมครึ่งระนาบ



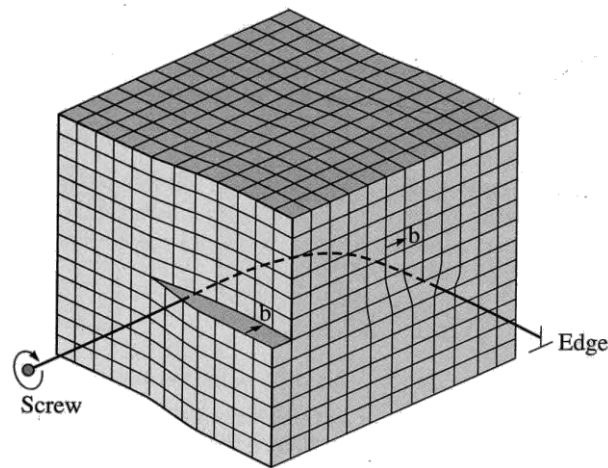
รูปที่ 1.62 ดิสโลเคชันแบบเอ็ดจ์ (Edge dislocation) Ashby, 1996

3.2 ดิสโลเคชันแบบสกรู (Screw dislocation) เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างได้รับความกระทำจากภายนอกทำให้ทิศทางของระนาบเคลื่อนที่ขนานกับเบอร์เกอร์เวกเตอร์ (Burgur vector, b) ส่งผลให้ระนาบใหม่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมครึ่งระนาบ



รูปที่ 1.63 ดิสโลเคชันแบบสกรู (Screw dislocation) Courtney, T.H., 2000

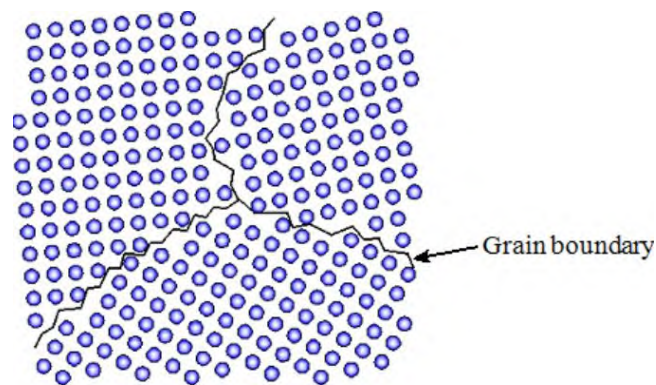
3.3 ดิสโลเคชันแบบผสม (Mixed dislocation) เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างได้รับความกระทำจากภายนอกแล้วทำให้ทิศของระนาบเคลื่อนที่สองทิศทางคือทิศทางตั้งฉากและขนานกับเบอร์เกอร์เวกเตอร์ (Burgur vector, b) ส่งผลให้ระนาบใหม่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมที่เรียกว่าดิสโลเคชันแบบผสมเนื่องจากเกิดทั้งดิสโลเคชันแบบสกรูและแบบเอ็ดจ์



รูปที่ 1.64 ดิสโลเคชันแบบผสม (Mixed dislocation) Courtney, T.H., 2000

4. ความบกพร่องบริเวณผิวหน้า (Interfacial defects or Planar defects) แบ่งได้เป็น 4 ชนิด

4.1 บริเวณขอบเกรนหรือรอยต่อของเกรน (Grain boundary) เกิดขึ้นในกรณีที่มีโครงสร้างหลายผลึก (Polycrystalline) ทำให้บริเวณตำแหน่งที่เป็นรอยต่อของเกรนหรือขอบของเกรนเกิดความแตกต่างซึ่งจัดเป็นข้อบกพร่องอย่างหนึ่งเนื่องจากตรงรอยต่อของเกรนไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 1.65 ความบกพร่องเนื่องจากรอยต่อของเกรน Read, W.T. Jr., 1953

4.2 ความบกพร่องของอะตอมบริเวณพื้นผิวด้านนอก(External surface) ข้อบกพร่องลักษณะนี้เกิดเนื่องจากอะตอมบริเวณพื้นผิวที่บริเวณด้านนอกเกิดปฏิกิริยากับอากาศโดยรอบได้แก่ ก๊าซออกซิเจน (O_2), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ก๊าซไนโตรเจน (N_2) หรือ ก๊าซชนิดอื่น ๆ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้โครงสร้างของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ เกิดการรวมตัวกับโมเลกุลน้ำ ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กกับอากาศและความชื้นทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)



รูปที่ 1.66 ความบกพร่องเนื่องจากการสัมผัสบริเวณผิวด้านนอก

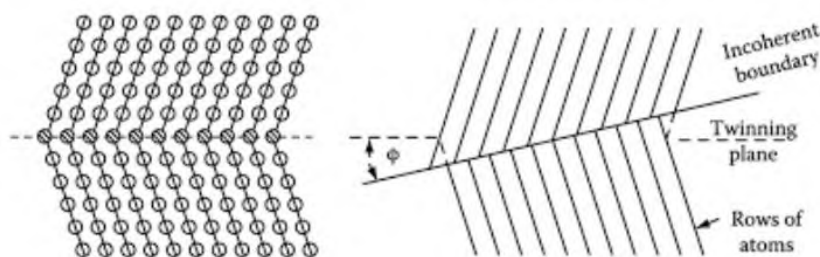
4.3 ความแตกต่างของเฟส (Phase boundary) เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสได้ง่าย ทำให้เกิดข้อบกพร่องภายในโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น น้ำแข็งคือโครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห (Network) ประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนและอะตอมของออกซิเจน และเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีปัจจัยภายนอกเกี่ยวข้องได้แก่ อุณหภูมิและความดัน ทำให้โครงข่ายของโมเลกุลน้ำแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นของเหลวและก๊าซโดยที่โครงสร้างของเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นยังคงประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจน แต่ทว่าความยาวพันธะ ความแข็งแรงของโครงสร้าง ค่าไดโพลโมเมนต์และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเฟสใหม่มีความแตกต่างจากเฟสเดิมเนื่องจากมีสถานะเปลี่ยนไป จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สมบัติของเฟสทั้งสาม (ของแข็ง ของเหลวและก๊าซ) แตกต่างกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าข้อบกพร่องดังกล่าวเนื่องมาจากความแตกต่างของเฟส ทำให้สมบัติของเฟสใหม่แตกต่างไปจากเฟสเดิม เกิดขึ้นได้ง่ายกับวัสดุที่มีโครงสร้างเปลี่ยนได้ง่ายเนื่องจากความร้อน ตัวอย่างเช่น แนนพาลีน (ลูกเหม็น), พิมเสน, การระบู่



รูปที่ 1.67 ความบกพร่องเนื่องจากความแตกต่างเฟส

4.4 ความบกพร่องเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเกรนเป็นแบบทวินหรือแฟลต (Twin boundary defect) ข้อบกพร่องแบบนี้มีสองลักษณะคือบริเวณขอบเกรนมีการซ้อนทับกันแต่ไม่สนิทที่เรียกว่า Twin plane

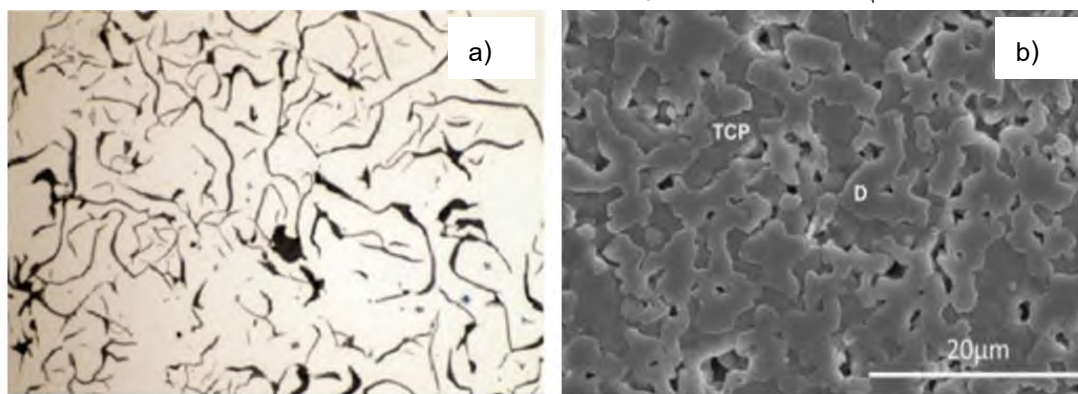
หรือ Coherent boundary และอีกกรณีหนึ่งคือรอยต่อของสองเกรนทำมุมกัน (θ) ทำให้รอยต่อของเกรนเหลื่อมกันที่เรียกว่า Incoherent boundary



รูปที่ 1.68 ความบกพร่องเนื่องจากการเรียงตัวของเกรนแบบแฝด

5. ความบกพร่องแบบอื่นๆ เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ได้แก่ ความร้อน รอยแตก รอยร้าว รูพรุน รวมทั้งความบกพร่องที่เกิดจากโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัสหรือแบบอสัณฐาน (Amorphous or Noncrystalline) ดังนี้

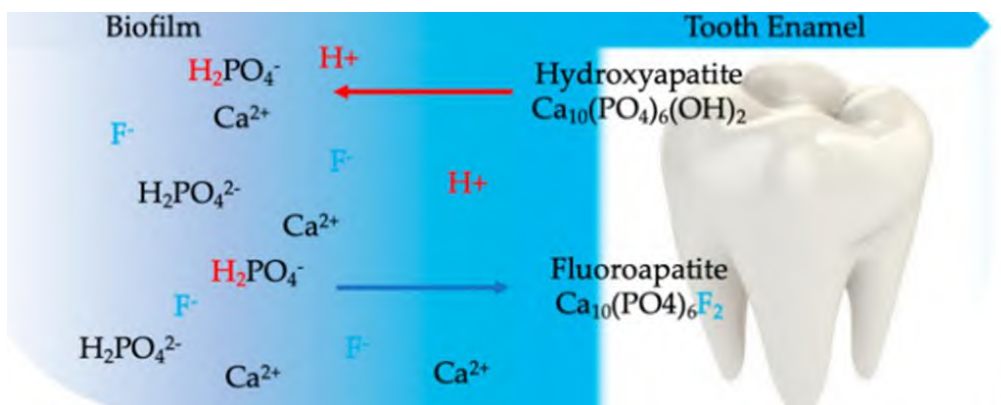
5.1 ความบกพร่องของชิ้นงาน (Bulk or volume defect) ข้อบกพร่องแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก รอยแตก ร้าวหรือรูพรุนของชิ้นงานซึ่งอาจมาจากหลายสาเหตุ ตัวอย่างเช่น จากแรงทางกลภายนอกและภายในโครงสร้าง หรือมาจากขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามที่กำหนด ส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย สมบัติของผลิตภัณฑ์อาจเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง การต้านทานหรือการนำความร้อน การต้านทานหรือการนำไฟฟ้าส่งผลต่อความทนทานของผลิตภัณฑ์ต่อการใช้งานหรืออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอาจเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของวัสดุ



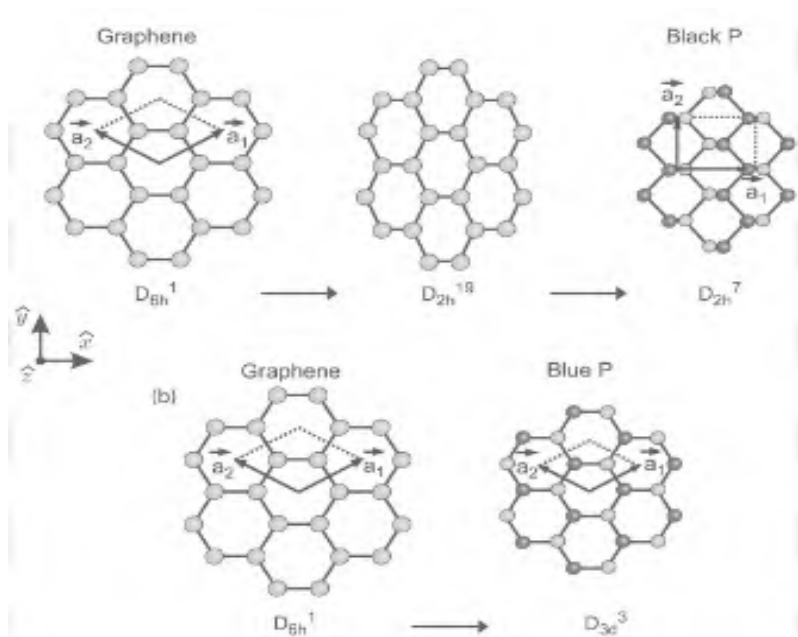
รูปที่ 1.69 ความบกพร่องของชิ้นงานทั่วทั้งผลิตภัณฑ์หรือทั้งปริมาตร (Bulk or volume defect): a) volume defect; b) volume defect of hydroxyapatite or calcium phosphate ที่มา M.V. Swain and R.J.H. Hannink 1984.

5.2 ความบกพร่องเนื่องจากการสั่นสะเทือนของอะตอม (Atomic vibration) ข้อบกพร่องแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมหรือโครงสร้างได้รับการกระทำจากภายนอกได้แก่ ความร้อน (Thermal) ความเค้น (Stress) พลังงานในรูปของคลื่นแสง คลื่นเสียง ที่ทำให้อะตอมภายในโครงสร้างเกิดการสั่นสะเทือนแล้วมีการส่งถ่ายพลังงานหรือความเค้นเพื่อปรับตัวเองเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังนั้นจะเกิดผลต่อเนื่องไปยังเลททิซของโครงสร้าง

โดยส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมด ทำให้การจัดเรียงตัวเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิมส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป จากรูป 1.70 แสดงการหลุดของชั้นฟิล์มที่เคลือบผิวฟันเกิดการผุกร่อนส่งผลต่อการแตกตัวโครงสร้างแคลเซียมและอนุมูลของไฮโดรเจนฟอสเฟต การพัฒนาผลิตภัณฑ์ยาสีฟันที่มีการเติมฟลูออโรอะพาไทต์ (fluoroapatite) สามารถช่วยเคลือบผิวฟัน ลดปัญหาฟันผุ



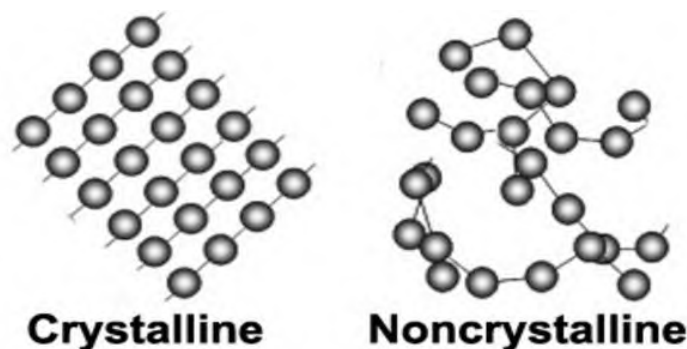
รูปที่ 1.70 ข้อบกพร่องของชั้นเคลือบผิวฟันและการเคลือบผิวฟันด้วยยาสีฟันผสมฟลูออโรอะพาไทต์ โดยหลักการสั่นสะเทือนของอะตอม (Atomic vibration) L. Fiorillo et al. Biomimetic 2020.



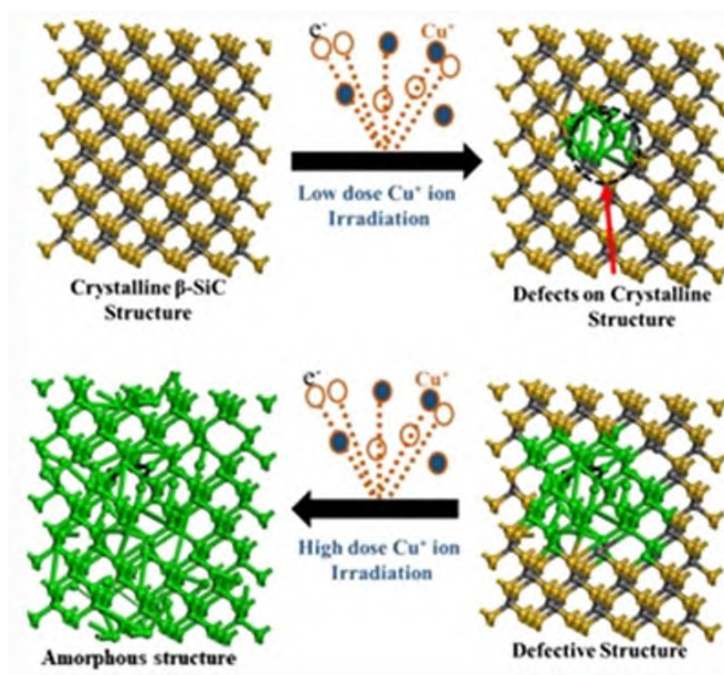
รูปที่ 1.71 ข้อบกพร่องของการสั่นสะเทือนโครงสร้างกราฟีน (Atomic vibration) L. Fiorillo et al. Biomimetic 2020.

จากรูปที่ 1.71 แสดงข้อบกพร่องของโครงสร้างกราฟีน เนื่องจากได้รับพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน คลื่นไฟฟ้าแม่เหล็ก ส่งผลให้โครงสร้างอะตอมมีการสั่นสะเทือน ทำให้โครงสร้างมีการหดตัวหรือขยายตัว

5.3 ความบกพร่องเนื่องจากความไม่มีรูปผลึก (Noncrystalline solid) ข้อบกพร่องเช่นนี้ ทำให้โครงสร้างขาดความสม่ำเสมอทั้งด้านรูปแบบและสมบัติที่ควรเป็นทั้ง 3 มิติ (Three dimension imperfection) ตัวอย่างเช่น วัสดุนาโนเซรามิกชนิดซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึก 2 แบบ คือโครงสร้างผลึก (Crystalline) และโครงสร้างอะมอร์ฟัสหรือไม่มีรูปผลึก (Noncrystalline) ทำให้วัสดุเซรามิกมีสมบัติแตกต่างกันเช่น สมบัติทางแสง ความแข็งแรง การทนความร้อน ตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา ดังรูปที่ 1.65



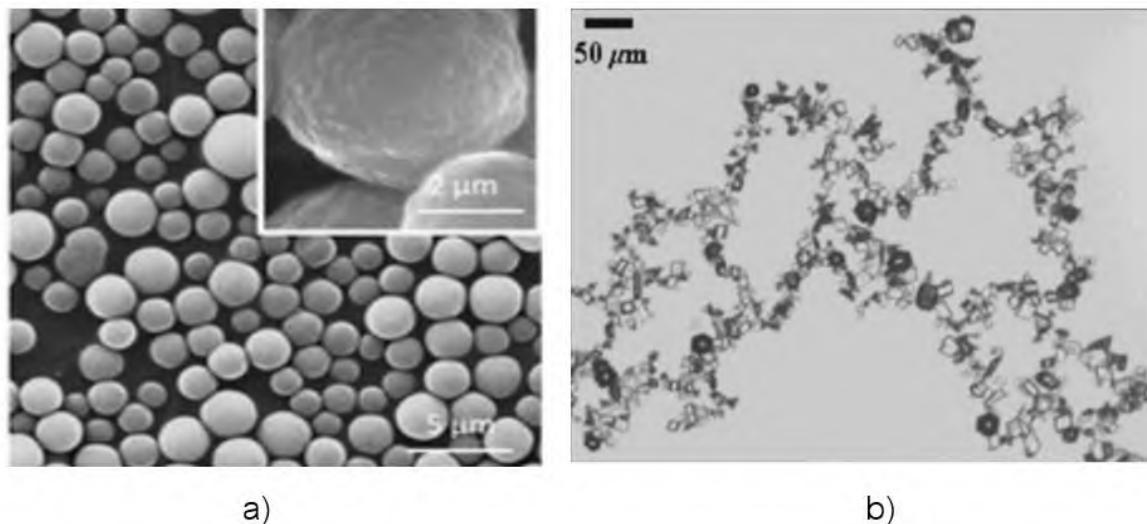
รูปที่ 1.72 ความบกพร่องของโครงสร้างเนื่องจากรูปแบบโครงสร้างระหว่างโครงสร้างที่ไม่มีรูปผลึก (Noncrystalline) กับโครงสร้างที่มีรูปผลึก (Crystalline) ของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต W.H. Zachariasen



รูปที่ 1.73 ความบกพร่องของโครงสร้างผลึก SiC nanowires (Khan, M.R. et al.)

จากรูปที่ 1.73 คือโครงสร้างของ SiC nanowires ที่โครงสร้างเกิดความเสียหายได้รับพลังงานจากรังสีกระตุ้นเพียงเล็กน้อย โครงสร้างผลึกจะถูกทำลายแต่หากโครงสร้างดังกล่าว ได้รับรังสีสูงมาก โครงสร้างจะเสียหายจนเปลี่ยนเป็น amorphous

5.4 ความบกพร่องแบบแฟร็กทอล (Fractals) เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมี เช่นกระบวนการโซล-เจล (Sol-gel) การตกตะกอน (Precipitation) การเคลือบผิวแบบต่าง ๆ เช่น CVD, PVD, Plasma spray, Electroplating เป็นต้น ทำให้โครงสร้างมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแฟร็กทอล ความบกพร่องในลักษณะนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับวัสดุในทั้งแบบไม่มีรูปผลึกหรือมีรูปผลึก



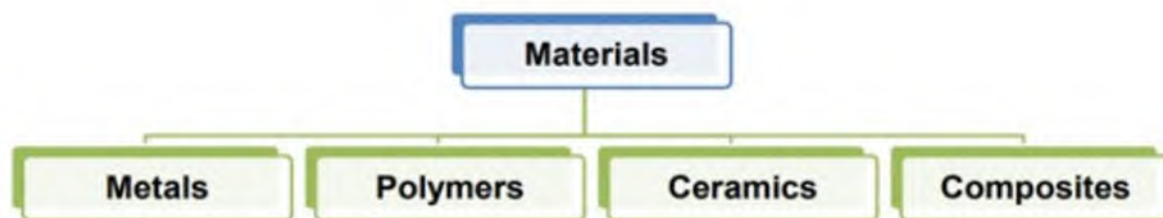
รูปที่ 1.74 ความบกพร่องแบบแฟร็กทัลของสารประกอบเคลือบคาร์บอน: a) อนุภาคเคลือบคาร์บอน; b) โครงสร้างแบบแฟร็กทัลของสารประกอบเคลือบคาร์บอน J.F. Shackelford 1985

นอกจากนี้ ความบกพร่องของโครงสร้าง (Structural imperfection) ที่เกิดขึ้นภายในหนึ่งผลิตภัณฑ์ อาจเกิดความบกพร่องของโครงสร้างได้หลายอย่างปะปนกัน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น พบข้อบกพร่องเชิงเส้นร่วมกับข้อบกพร่องชนิดพื้นผิวภายนอก (external surface) รวมทั้งอาจมีข้อบกพร่องรูปแบบอื่น ๆ ปรากฏบนชิ้นงานหรือทั่วทั้งปริมาตร (Bulk or volume defect) และอาจมีความบกพร่องเกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอก (External surface) ของชิ้นงานได้เช่นกัน

บทที่ 2

กระบวนการผลิตด้านวิศวกรรมวัสดุ (Material Engineering Production Process)

วิศวกรรมวัสดุ (Materials engineering) คืองานในสาขาที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับวัสดุ ผ่านกระบวนการออกแบบไปสู่กระบวนการผลิต ด้วยเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แต่ละวัสดุ การออกสูตรการผลิตวัสดุแต่ละชนิดอย่างเหมาะสมตามหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องด้านวิศวกรรมวัสดุอย่างมีระบบด้วยการใช้เทคนิคเชิงวิเคราะห์ การตรวจสอบคุณภาพและการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ตามมาตรฐานทางอุตสาหกรรม รวมทั้งการพัฒนาออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตแบบใหม่เพื่อมุ่งเน้นการลดขั้นตอนระยะเวลาของกระบวนการผลิต ลดปริมาณของเสีย ลดการใช้พลังงาน เพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น และการมุ่งเน้นเพื่อให้เกิดนวัตกรรมใหม่ทั้งด้านผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยีใหม่ที่เหมาะสมกับงานด้านวิศวกรรมวัสดุต่ออุตสาหกรรมในยุคปัจจุบัน ตามหลักการด้านวิศวกรรมวัสดุได้จัดแบ่งวัสดุเป็น 5 กลุ่มประกอบด้วย กลุ่มโลหะ (Metal), กลุ่มเซรามิก (Ceramic), กลุ่มพอลิเมอร์ (Polymer), กลุ่มเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) และกลุ่มวัสดุผสมหรือวัสดุประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite) กระบวนการผลิตแต่ละกลุ่มวัสดุอาจมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างทั้งชนิด ประเภท โครงสร้าง คุณลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี ที่แตกต่างกัน แต่ก็มีข้อยกเว้นบางประการที่พบว่ากลุ่มวัสดุที่แตกต่างกัน ยังสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตของอีกกลุ่มวัสดุหนึ่งได้ในบางกรณี แต่อาจจำเป็นต้องเพิ่มเติมสารตัวเติมหรือสารสำคัญของกลุ่มวัสดุนั้นเพื่อให้กระบวนการผลิตหรือขึ้นรูปนั้นทำได้

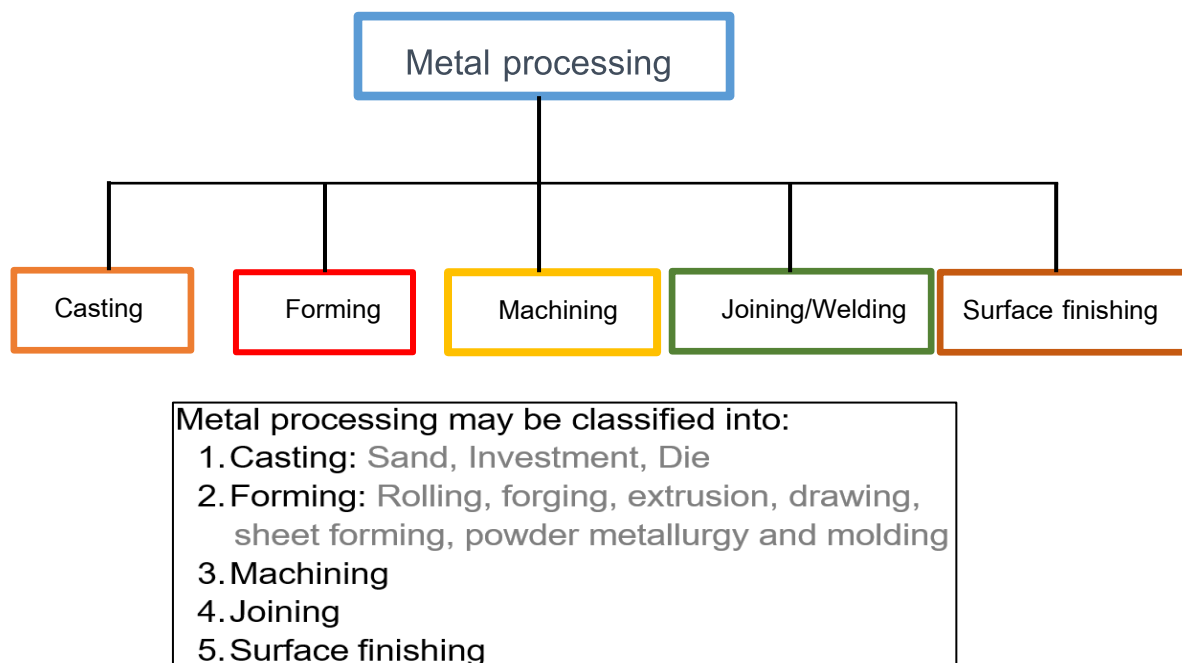


รูปที่ 2.1 การจัดกลุ่มวัสดุตามหลักการด้านวิศวกรรมวัสดุ

จากรูปที่ 2.1 จัดแบ่งกลุ่มวัสดุตามงานวิศวกรรมวัสดุโดยกระบวนการผลิตด้านโลหะ (Metal processing) แบ่งกระบวนการผลิตหลักได้เป็น 1. การหล่อ (Casting), 2. การแปรรูป (Forming), 3. การตกแต่งชิ้นงาน (Machining), 4. การเชื่อม (Joining หรือ welding) และ 5. การปรับแต่งผิวผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 2.2 ดังมีรายละเอียดกระบวนการผลิตดังนี้

กระบวนการผลิตด้านโลหะ (Metal processing)

1. การหล่อขึ้นรูป (Casting) เป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โลหะด้วยกระบวนการหลอมเหลววัตถุดิบ แล้วขึ้นรูปด้วยแบบพิมพ์เพื่อให้ได้รูปร่างหรือรูปทรงของชิ้นงานถูกต้องตามขนาดแบบพิมพ์ แล้วปล่อยให้เย็นตัว เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เซตตัว คงรูปร่างผลิตภัณฑ์

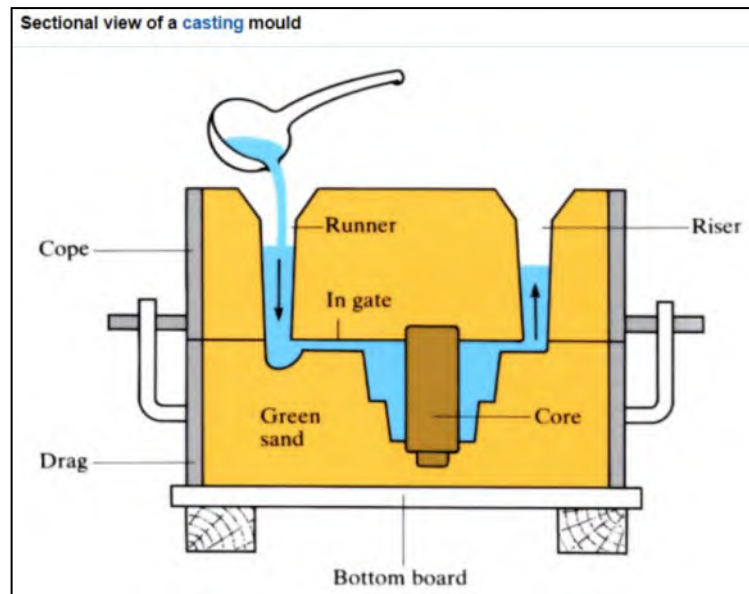


รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตด้านวิศวกรรมโลหะตามหลักการด้านวิศวกรรมวัสดุ

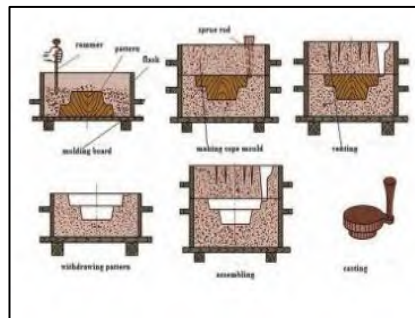
กระบวนการหล่อโลหะ (Casting)

กระบวนการหล่อโลหะ (Casting) แบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ Sand casting, Investment casting และ Die casting โดยปัจจุบันมีการพัฒนาใช้เครื่องจักรแบบพิมพ์ 3 มิติ ช่วยกระบวนการออกแบบพิมพ์ในกระบวนการผลิต

1.การหล่อแบบทราย (Sand casting) เป็นหนึ่งในประเภทการหล่อที่นิยมใช้ขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุโลหะ เป็นวิธีการที่เรียบง่าย มีการใช้งานมาเป็นเวลานานหลายศตวรรษ การหล่อด้วยทรายได้ปริมาณการผลิตที่ไม่มาก แต่ช่วยลดต้นทุนการสร้างผลิตภัณฑ์สามารถผลิตชิ้นงานตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ต่อการหล่อหนึ่งครั้งเป็นการหล่อที่ใช้ทรายทำหน้าที่เป็นแบบพิมพ์โดยคุณภาพการหล่อแบบทรายขึ้นอยู่กับชนิดของทรายที่ใช้ทำแบบพิมพ์ มีข้อดีคือเป็นกระบวนการผลิตที่สามารถผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ ใช้หล่อโลหะได้เกือบทุกชนิด สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามขนาดรูปร่างแบบพิมพ์ แต่มีข้อควรระวังคือบริเวณผิวชิ้นงานอาจไม่เรียบ หยาบ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการตกแต่ง (Machining) ชิ้นงานให้เรียบร้อย สวยงาม แต่ก็เป็นที่ประหยัดเนื่องจากแบบพิมพ์ทำจากทราย ทนความร้อนสูง โดยการเพิ่มสารจับตัวของเม็ดทรายที่ทำหน้าที่คล้ายกาวคือโซเดียมซิลิเกตหรือดินเหนียวก็ใช้งานได้



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของกระบวนการหล่อวัสดุโลหะชนิดหล่อแบบทราย (sand casting)



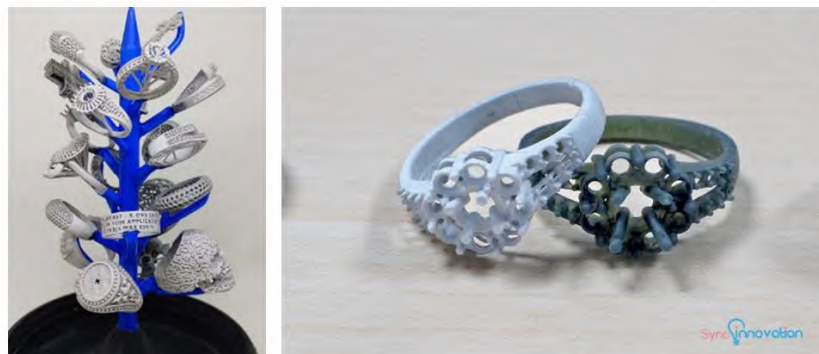
รูปที่ 2.4 กระบวนการหล่อแบบทรายสำหรับการผลิตโลหะ

2.การหล่อไส้ขี้ผึ้ง (Investment casting หรือ Lost wax) เป็นกระบวนการหล่อโลหะอีกแบบที่ต้องอาศัยแบบพิมพ์จากวัสดุที่สามารถหลอมเหลวได้ด้วยความร้อนโดยง่ายเช่น ขี้ผึ้ง ไขวัว น้ำมันดิน และพอกทับด้วยปูนทนความร้อนหรือปูนพลาสติกหรือยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ซิลิกา, อะลูมิเนียมซิลิกา, เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ที่บริเวณผิวด้านนอกของแบบพิมพ์ขี้ผึ้ง มีลักษณะทนความร้อนและทนแรงดันได้สูง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีเทคโนโลยีเพื่อการสร้างต้นแบบ (pattern) ด้วยวิธี CNC 3D printing ทำให้มีความสะดวก รวดเร็ว และทำให้ได้รูปแบบของต้นแบบที่มีความสม่ำเสมอ เหมาะกับการผลิตชิ้นงานวัสดุโลหะจำนวนมาก เช่น เครื่องประดับ ชิ้นส่วนวัสดุทดแทนทางการแพทย์ ทันตกรรม ชิ้นส่วนอุตสาหกรรมรูปทรงซับซ้อน ได้แก่ ใบพัดระบายความร้อน หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรชิ้นงานขนาดเล็กมีข้อดีหลายประการ เช่น คุณภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานดี เรียบเนียน สวยงาม ใช้เวลาตกแต่งเพียงเล็กน้อย ได้ขนาดชิ้นงานที่มีความถูกต้อง, เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการผลิตชิ้นงานรูปร่างซับซ้อนและขึ้นรูปโลหะได้หลายชนิด แต่มีข้อจำกัดของขนาดชิ้นงานที่ต้องการผลิตคือไม่เหมาะกับการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่เกินไปได้ และมีราคาการผลิตสูงกว่าการหล่อแบบทรายเนื่องจากจำเป็นต้องทำต้นแบบ Pattern และแบบพิมพ์เซรามิกใหม่ทุกครั้งที่เกิดชิ้นงาน หลักการคือขณะทำการเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบพิมพ์ ความร้อนจะทำให้

แบบพิมพ์ที่ผึ้งหลอมละลาย แล้วถูกแทนที่ด้วยโลหะหลอมเหลวนั้น โดยโลหะหลอมเหลวจะถูกปล่อยให้เซตตัวแข็งอยู่ในแบบพิมพ์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานมีรูปร่าง-รูปทรงตามแบบพิมพ์



รูปที่ 2.5 กระบวนการหล่อได้ซึ่งสำหรับการผลิตโลหะ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์โลหะจากกระบวนการหล่อแบบอินเวสเมนต์ (investment casting metal)

3.การหล่อฉีดผ่านดายน์ (Die casting) คือกระบวนการที่โลหะหลอมเหลวถูกอัดฉีดเข้าไปในแบบพิมพ์ด้วยแรงดันสูง เหมาะสำหรับโลหะที่นอกกลุ่มเหล็ก (nonferrous) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม สังกะสี ตะกั่ว โลหะผสมด้วยดีบุกและตะกั่ว แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การหล่อฉีดผ่านดายน์ร้อน (Hot-chamber die casting) และการหล่อฉีดผ่านดายน์แบบเย็น (Cold-chamber die casting) การหล่อผ่านดายน์ร้อนเป็นกระบวนการหล่อฉีดที่ใช้กันมากที่สุด ความสำเร็จของชิ้นงานมีความสวยงาม ได้ขนาดตามแบบพิมพ์ เป็นกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ ได้กำลังการผลิตสูง ราคาเครื่องหล่อฉีดผ่านดายน์ค่อนข้างสูง การหล่อฉีดผ่านดายน์เป็นการทำให้โลหะหลอมเหลวภายใต้แรงดันสูงเข้าไปในโพรงของแม่พิมพ์ โดยการกลึงแบบ