

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

5.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของดีเฟล็คชันโศคจากท้องตลาด

ผลของการศึกษาขนาด น้ำหนัก ความหนาแน่น ส่วนประกอบทางเคมี เฟส และลักษณะของโครงสร้างจุลภาคมีดังต่อไปนี้

5.1.1 ขนาด น้ำหนัก และความหนาแน่น ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 11 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างที่สุ่มมาจากท้องตลาดขนาด A, B, C และ D มีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นขนาดของ E หรือความสูงของดีเฟล็คชันโศค ซึ่งจัดได้เป็น 2 ระดับ คือ ความสูงโดยประมาณ 36 มิลลิเมตร และ 47 มิลลิเมตร น้ำหนักขึ้นอยู่กับความสูง ถ้าความสูง 36 มิลลิเมตร มีน้ำหนักระหว่าง 177-211 กรัม และความสูง 47 มิลลิเมตร มีน้ำหนัก ระหว่าง 250-300 กรัม ค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 4.4-4.6 กรัม/ซ.ม.³

ตารางที่ 11 ขนาด น้ำหนัก และความหนาแน่นของ DY-1 ถึง DY-6

ชิ้นที่	ขนาด(ม.ม.)					น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ซ.ม. ³)
	A	B	C	D	E		
DY-1	92.0	87.5	48.0	62.0	46.5	300	4.56
DY-2	88.0	80.0	48.5	62.0	35.5	211	4.38
DY-3	87.5	83.0	47.5	60.0	47.5	249	4.42
DY-4	88.0	80.0	48.5	62.0	35.5	209	4.50
DY-5	88.0	82.5	48.0	61.0	47.5	255	4.58
DY-6	84.5	78.0	43.0	54.0	36.0	177	4.35

5.1.2 ส่วนประกอบทางเคมี ได้ส่งวิเคราะห์โดยใช้เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 เปอร์เซ็นต์ของธาตุต่างๆ ที่ประกอบใน DY-1 ถึง DY-6

หมายเลข	ส่วนประกอบทางเคมี									
	Fe	Zn	Mg	Mn	Cu	Ca	Si	K	Co	Al
DY-1	49.197	9.504	7.593	2.280	0.662	0.159	0.378	0.211	0.095	-
DY-2	46.088	9.045	7.515	4.446	0.010	0.184	1.433	0.217	0.119	0.100
DY-3	45.891	8.700	8.402	4.750	0.014	0.250	0.461	0.169	0.103	0.109
DY-4	47.495	9.703	7.146	0.223	2.946	0.122	1.648	0.148	0.04	0.106
DY-5	47.585	12.074	7.633	0.308	6.403	0.128	1.219	-	-	0.077
DY-6	46.835	9.934	6.882	4.037	0.271	0.287	0.795	-	-	0.227

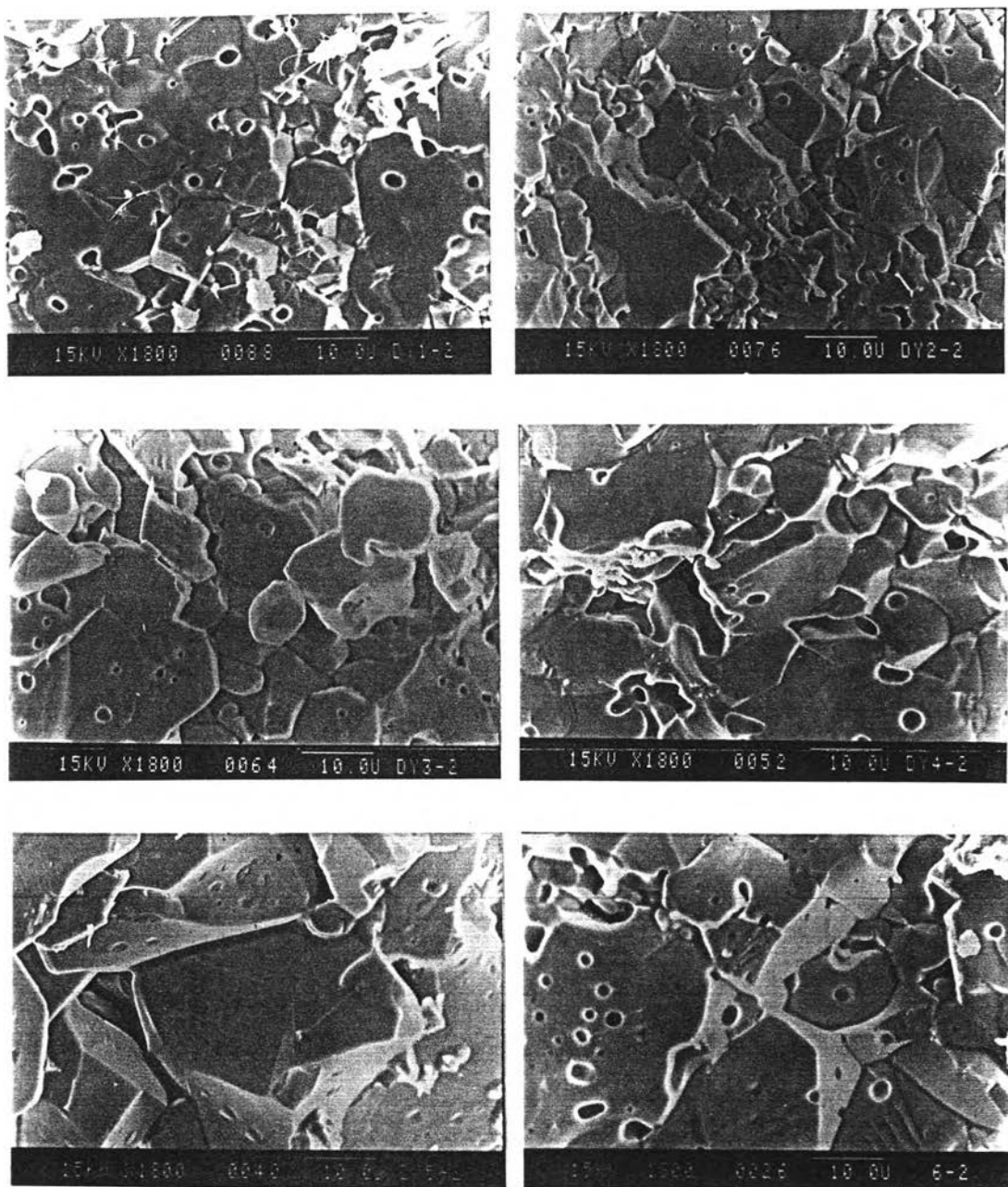
5.1.3 การวิเคราะห์เฟส ใช้เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟลกชัน ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ
แสดงผลในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 เฟสของ DY-1 ถึง DY-6

หมายเลข	เฟส
DY-1	ZMI *
DY-2	ZMI
DY-3	ZMI
DY-4	ZMI
DY-5	ZMI
DY-6	ZMI

* ZMI = Zinc Magnesium Iron oxide solid solutions
(แพทเทิร์นจากเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟลกชันเบอร์ DY-1ถึงDY-6 แสดงในภาคผนวกที่ 4)

5.1.4 โครงสร้างจุลภาค ใช้สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป ที่เกี่ยวข้องกับการหา ส่วนประกอบทางเคมี ของตัวอย่างหมายเลข DY-1 ถึง DY-6 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค แสดงในรูปที่ 26 และตารางที่ 14 แสดงขนาดของเกรน (grain size) กับขนาดโพรงอากาศ (pore size)



รูปที่ 26 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของ DY-1 ถึง DY-6 (ตำแหน่งเดียวกัน)

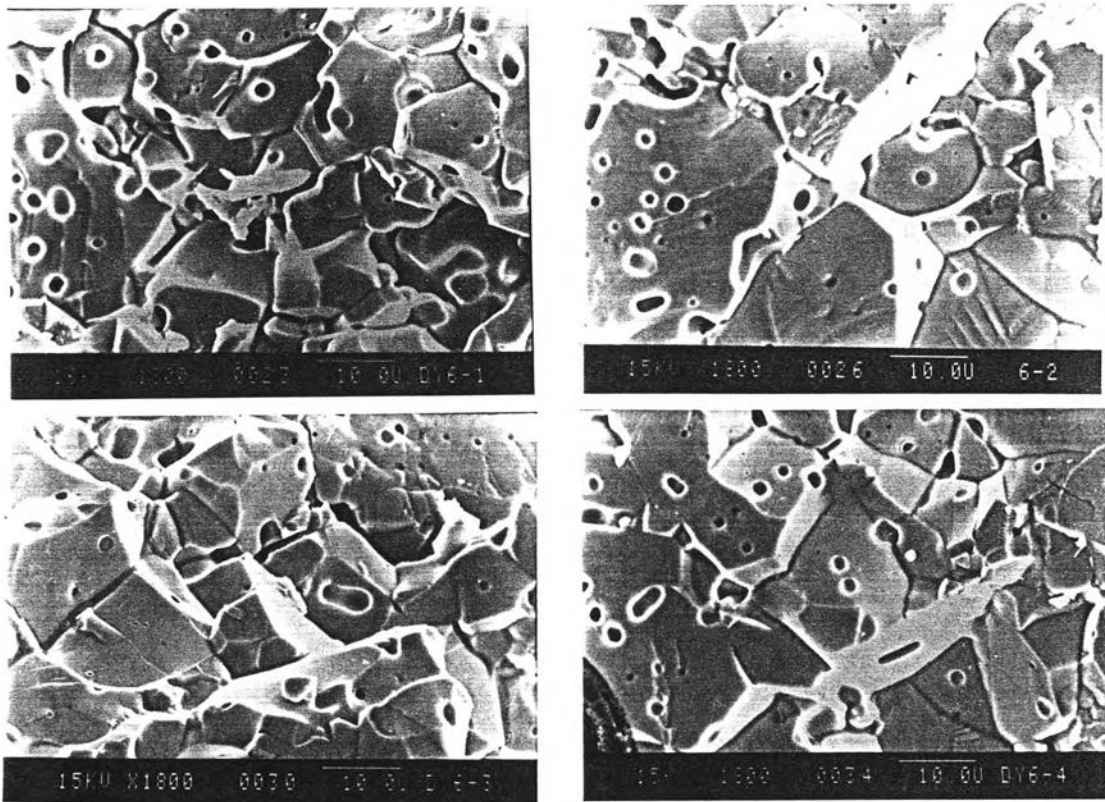
ตารางที่ 14 ขนาดเกรนและขนาดโพรงอากาศของ DY-1 ถึง DY-6

หมายเลข	ขนาดเกรน(ไมครอน)	ขนาดโพรงอากาศ(ไมครอน)
DY-1	10-40 Eg [*]	<5 Ip [*]
DY-2	2-30 Eg(crack)	2-3 Ip
DY-3	2-40 Eg	2-3 Ip
DY-4	5-40 Eg	<5 Ip
DY-5	10-100 Eg	2-10 Ip
DY-6	10-50 Eg	2-10 Ip

Eg^{*} = Exaggerated grains.

Ip^{*} = Intergranular & Intragranular pores.

การเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคในชิ้นงานเดียวกัน ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน แสดงในรูปที่ 27 และตารางที่ 15 แสดงขนาดของเกรนกับขนาดโพรงอากาศของ DY-6-1 ถึง DY-6-4 ขนาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 27 โครงสร้างทางจุลภาคของ DY-6 ที่ตำแหน่ง 1 ถึง 4 ตารางที่ 15 ขนาดเกรนและขนาดโพรงอากาศของ DY-6-1 ถึง DY-6-4

หมายเลข	ขนาดเกรน(ไมครอน)	ขนาดโพรงอากาศ(ไมครอน)
DY-1-1	3-50 Eg [*]	<5 Ip [*]
DY-6-2	10-50 Eg	2-10 Ip
DY-6-3	3-80 Eg	<10 Ip
DY-6-4	3-100 Eg	2-10 Ip

Eg^{*} = Exaggerated grains.

Ip^{*} = Intergranular & Intragranular pores.

ประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลของดีเฟกต์ในโซล แสดงอยู่ในตารางที่ 16
(รวมตารางที่ 11 ถึง 15)

ตารางที่ 16 ลักษณะเฉพาะของดีเฟกต์ในโซลจากห้องทดลอง

หมายเลข	ขนาด(ม.ม.)				น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น บิลด์ (กรัม/ซ.ม. ³)	ความขรุขระ (μ)	ส่วนประกอบทางเคมี									พื้นที่ (ไมครอน)	ขนาดเกรน (ไมครอน)			
	♠A	♠B	♠C	♠D				E	Fe	Zn	Hg	Mn	Cu	Ca	Si	K			Co	Al	
DY-1	92.0	87.5	48.0	62.0	46.5	300	4.6	0.5	49.197	9.504	7.593	2.280	0.662	0.159	0.376	0.211	0.095	-	ZMI	10-40Eg	<5Ip
DY-2	88.0	80.0	48.5	62.0	35.5	212	4.4	5.9	46.086	9.045	7.151	4.446	0.010	0.184	1.433	0.217	0.119	0.100	ZMI	2-30Eg	2-3Ip
DY-3	87.5	83.0	47.5	60.0	47.5	250	4.4	5.0	45.891	8.700	8.402	4.750	0.014	0.250	0.461	0.169	0.103	0.109	ZMI	2-40Eg	2-3Ip
DY-4	88.0	80.0	48.5	62.0	35.5	209	4.5	4.2	47.495	9.703	7.146	0.223	2.946	0.122	1.646	0.146	0.040	0.106	ZMI	5-40Eg	<5Ip
DY-5	88.0	82.5	48.0	61.0	47.5	255	4.5	2.3	47.585	12.074	7.633	0.308	6.403	0.128	1.219	-	-	0.077	ZMI	10-100Eg	2-10Ip
DY-6	84.5	78.0	43.0	54.0	36.0	177	4.4	6.1	46.835	9.934	6.882	4.037	0.271	0.287	0.795	-	-	0.227	ZMI	10-50Eg	2-10Ip

* ZMI = Zinc Magnesium Iron Oxide Solid Solutions

** Eg = Exaggerated grains

*** Ip = Intergranular & Intragranular pores

5.1.5 การคำนวณหาสูตรทดลอง จากผลสรุปที่กล่าวมาแล้วแสดงให้ทราบว่า ดิเฟล็กซ์ไฮดรอกไซด์โครงสร้างแบบสปินเนล (spinel) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตร AB_2O_4 โดย A คือธาตุที่มีวาเลนซ์ 2 B คือธาตุที่มีวาเลนซ์ 3 เช่น $MnFe_2O_4$

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ A = Zn^{+2} , Mg^{+2} และ B = Fe^{+3} , Mn^{+3} สำหรับธาตุอื่นๆ ที่พบจากการวิเคราะห์ได้แก่ Cu, Ca, Si, Al, K และ Co นั้นคงเป็นส่วนที่เรียกว่า สารเติมพิเศษ (additives) ใช้ปรับคุณสมบัติบางอย่างของส่วนประกอบหลัก จะเห็นได้จากการทดลองเปลี่ยนส่วนประกอบให้อยู่ในรูปออกไซด์และปรับอยู่ในรูปสปินเนลได้ดังตารางที่ 17 และตารางที่ 18

ตารางที่ 17 ส่วนประกอบทางเคมีของดิเฟล็กซ์ไฮดรอกไซด์ในรูปออกไซด์

หมายเลข	ส่วนประกอบทางเคมี (x)									
	Fe_2O_3	ZnO	MgO	MnO	CuO	CaO	SiO_2	K_2O	CoO	Al_2O_3
DY-1	82.49	6.94	7.38	1.73	0.49	0.13	0.47	0.30	0.07	-
DY-2	79.86	6.84	7.19	3.47	0.01	0.15	1.86	0.32	0.09	0.23
DY-3	79.82	6.59	8.47	3.72	0.01	0.21	0.60	0.25	0.08	0.25
DY-4	80.73	7.18	7.05	0.17	2.19	0.10	2.10	0.21	0.03	0.24
DY-5	77.64	8.58	7.22	0.23	4.57	0.10	1.49	-	-	0.17
DY-6	80.58	7.44	6.87	3.13	0.20	0.24	1.02	-	-	0.52

ตารางที่ 18 ส่วนประกอบทางเคมีที่ปรับให้อยู่ในรูปของสปีเนล (AB_2O_4) เมื่อ $A = 1$ โมล

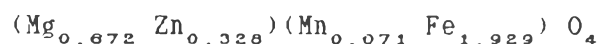
หมายเลข	ส่วนประกอบหลัก (โมล)				สารเติมพิเศษ (โมล)					
	A		B		Al_2O_3	SiO_2	CaO	K_2O	CuO	CoO
	MgO	ZnO	Mn_2O_3	Fe_2O_3						
DY-1	0.68	0.32	0.044	1.920	-	0.029	0.008	0.011	0.022	0.003
DY-2	0.68	0.32	0.094	1.910	0.009	0.117	0.010	0.012	-	0.004
DY-3	0.72	0.28	0.091	1.720	0.008	0.034	0.012	0.008	-	0.003
DY-4	0.67	0.33	0.004	1.920	0.008	0.132	0.006	0.008	0.104	0.001
DY-5	0.63	0.37	0.005	1.710	0.005	0.086	0.005	-	0.202	-
DY-6	0.65	0.35	0.084	1.930	0.019	0.064	0.016	-	0.009	-

จากตารางที่ 18 จะเห็นว่า A:B ของตัวอย่างต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกับ 1:2 ดังนี้

หมายเลข	A : B
DY-1	1 : 1.964
DY-2	1 : 2.004
DY-3	1 : 1.811
DY-4	1 : 1.924
DY-5	1 : 1.715
DY-6	1 : 2.014

ดังนั้นจึงตั้งส่วนผสมในการศึกษาทดลองซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของ A และกำหนดค่า B ให้เท่ากับ 2 ซึ่งเป็นสูตรสปีเนล

สูตรทดลอง



กำหนดให้สารเติมพิเศษ (additives) เป็น SiO_2 0.278 % และ CaO 0.278 % โดยน้ำหนัก เพราะพบว่าสารทั้งสองชนิดนี้ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อเฟอร์ไรต์ (A.B.D. Van Der Meer and N.P. Slijkerman, processing of the international conference, Sep.-Oct.1980, Japan)

เมื่อกำหนดสูตรส่วนประกอบทางเคมี ให้มีสัดส่วน ตามโครงสร้างผลึกแบบสปิเนล ตามที่กล่าวมาแล้ว แล้วคำนวณเป็นส่วนผสมของสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ส่วนผสมทางเคมีของเฟอร์ไรต์ที่ใช้ศึกษาขั้นรูป

ส่วนผสมเคมี (%)					
ส่วนผสม	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	ZnO	Mn_3O_4	Fe_2O_3	รวม
D.Y.	10.20	6.9	2.80	80.0	100

5.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวประสานและแรงอัดต่อการขึ้นรูปเฟอร์ไรต์

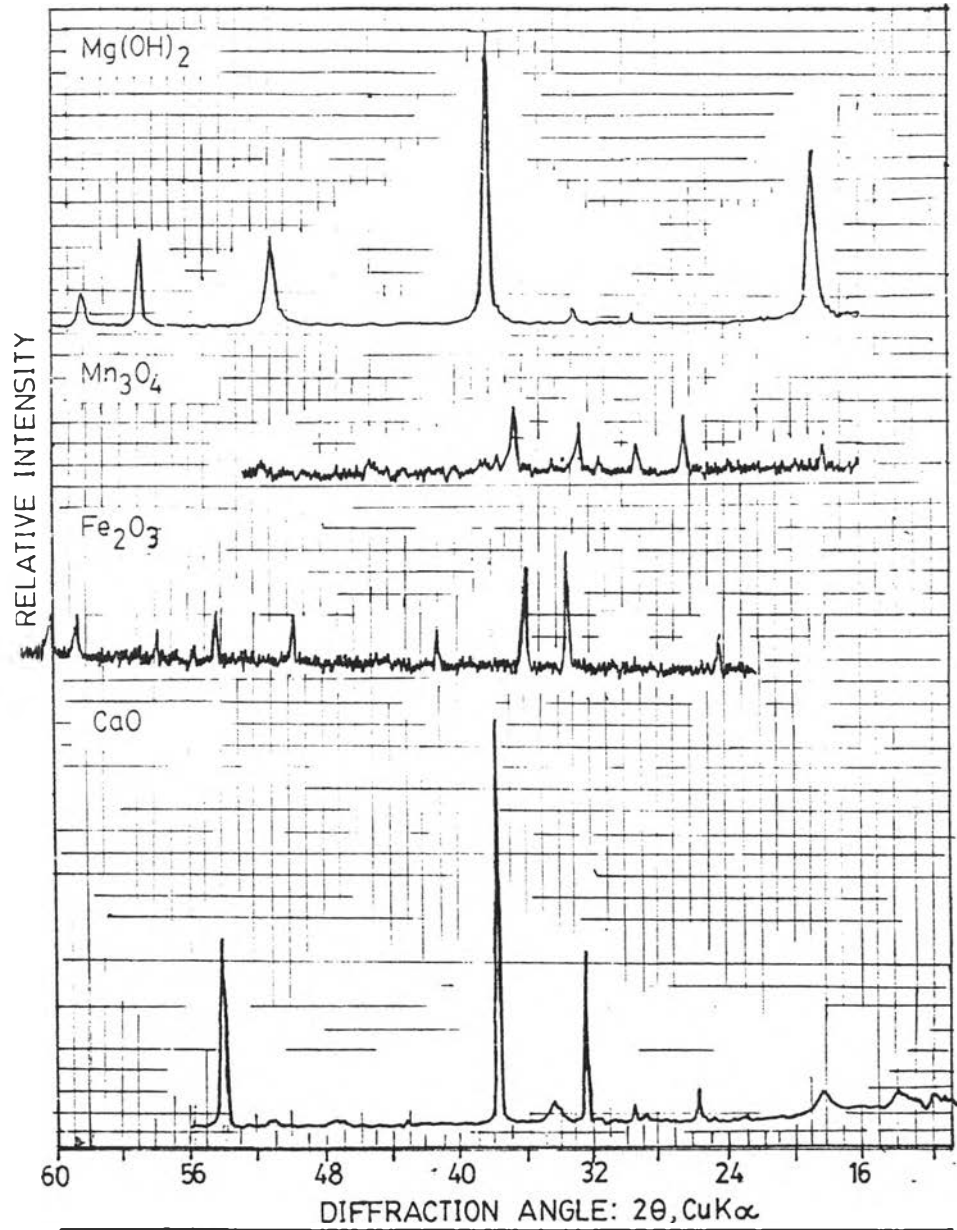
5.2.1 วัตถุดิบและลักษณะเฉพาะ

ผลจากการตรวจเฟสของวัตถุดิบต่างๆ ด้วยเอ็กซเรย์ดิฟแฟลกชัน แสดงไว้ในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 เฟสและโครงสร้างของสารตั้งต้น

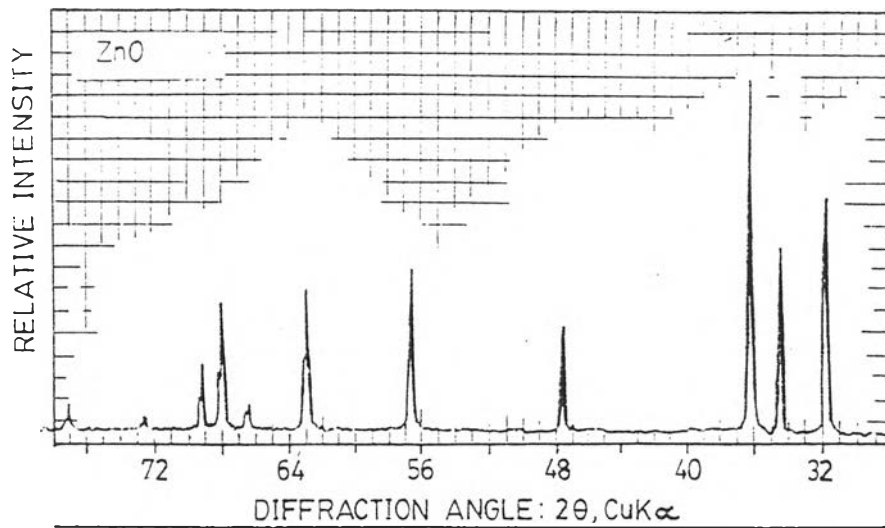
สารเคมี	เฟส	โครงสร้าง
Mg(OH) ₂	magnesium hydroxide	hexagonal (Trigonal)
ZnO	Zinc Oxide	hexagonal
Mn ₃ O ₄	manganese oxide	tetragonal
Fe ₂ O ₃	ferric oxide	hexagonal
CaO	calcium oxide	cubic
SiO ₂	Silicon oxide	hexagonal

ภาพจากการตรวจเฟสด้วยเอ็กซเรย์ดิฟแฟลกชันของสารตั้งต้น แสดงในรูปที่ 28 และ 29 การตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยทรานสมิทชันอิเล็กตรอนไมโครสโคป และสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป พบว่า Mg(OH)₂, ZnO, Mn₃O₄, Fe₂O₃ และ CaO มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และ SiO₂ มีขนาดประมาณ 5 ไมครอน ดังรูปที่ 30

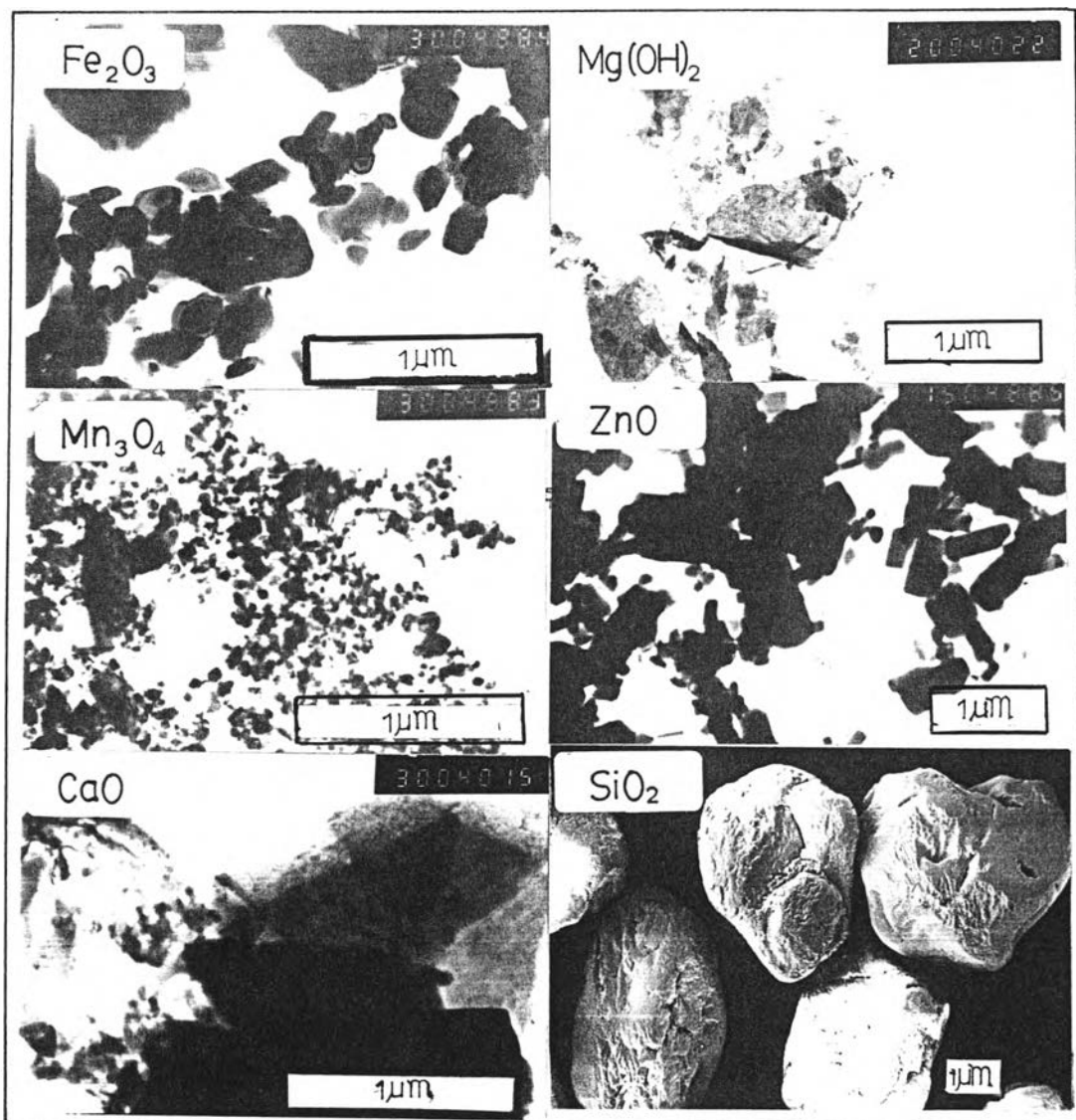


รูปที่ 28 แพทเทิร์นจากเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟลกชันของสาร

(Mg(OH)_2 , Mn_3O_4 , Fe_2O_3 , CaO)



รูปที่ 29 แพทเทิร์นจากเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟลกชันของสาร (ZnO)



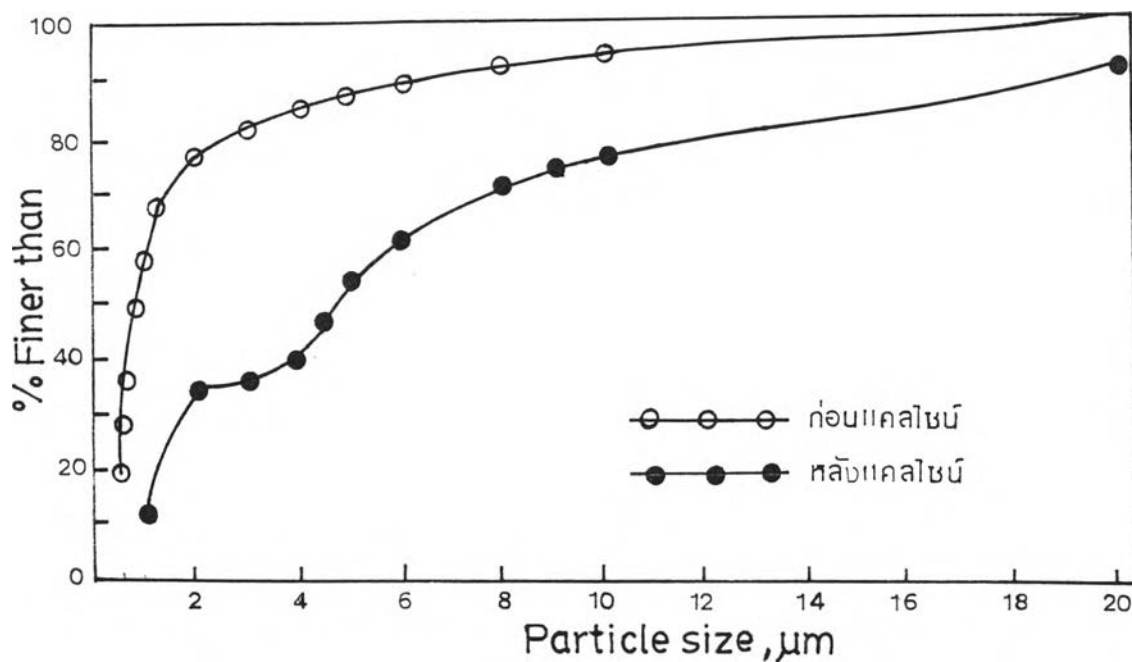
รูปที่ 30 แสดงโครงสร้างจุลภาคของสารตั้งต้น

5.2.2 การเตรียมผงเฟอร์ไรต์

ส่วนผสมของผงเฟอร์ไรต์ ถูกนำไปบดผสมเผาแคลไซน์ และบดให้ละเอียด

1. การตรวจความละเอียดและการกระจายของผงเฟอร์ไรต์

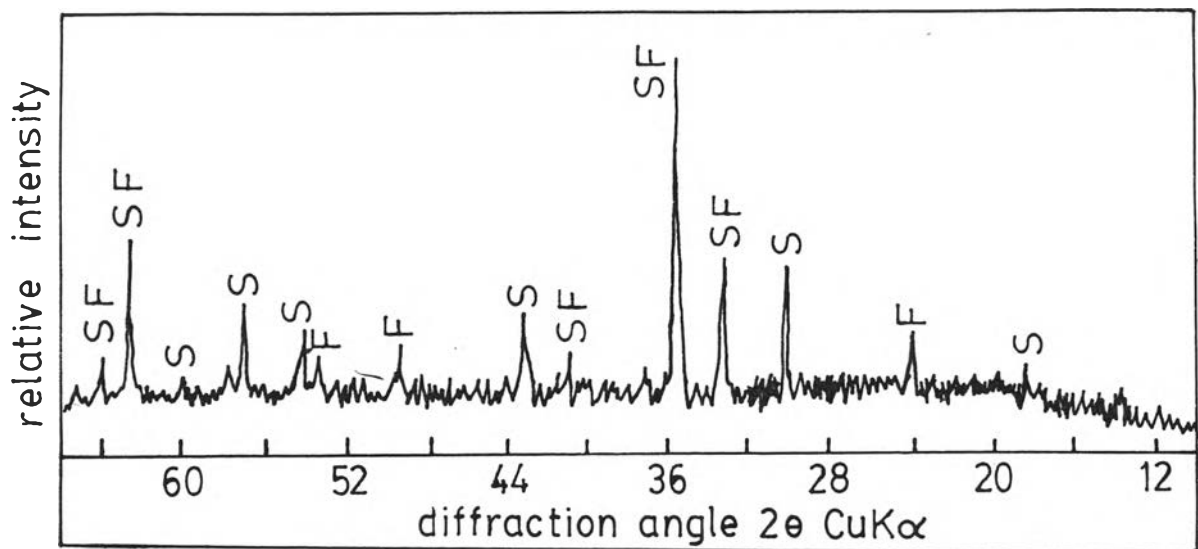
โดยเครื่องวัดการกระจายของขนาดอนุภาค เมื่อความหนาแน่นของผงก่อนแคลไซน์ มีค่า 4.73 ± 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และหลังแคลไซน์มีค่า 4.79 ± 0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่าสารเฟอร์ไรต์ก่อนผ่านการแคลไซน์มีความละเอียดมากกว่า หลังการแคลไซน์ดังรูปที่ 31 ที่ d_{50} ก่อนการแคลไซน์มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน แต่ d_{50} หลังการแคลไซน์มีขนาดประมาณ 5 ไมครอน



รูปที่ 31 การกระจายขนาดอนุภาคของผงเฟอร์ไรต์ที่ผ่านการบด

2. การตรวจเฟสของผงเฟอร์ไรต์หลังจากการแคลไซน์

เฟสของผงเฟอร์ไรต์หลังการอบและเผาแคลไซน์ พบว่าอุณหภูมิเผา 1000 องศาเซลเซียส สามารถเปลี่ยนสารออกไซด์ตั้งต้นให้เป็น แมกนีเซียมซิงค์เหล็กออกไซด์ (magnesium zinc iron oxide solid solutions) ที่ยังไม่สมบูรณ์และพบว่า Fe_2O_3 เหลืออยู่ แต่ไม่พบ MgO , ZnO และ Mn_3O_4 รูปที่ 32 แสดงภาพที่ได้จากการตรวจเฟสด้วย XRD ค่า S แทนแมกนีเซียมซิงค์ และ F แทนเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)



รูปที่ 32 แพทเทิร์นจากเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของผงเฟอร์ไรต์ ที่ผ่านการเผาแคลไซน์

5.2.3 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแกรนูล และการอัดขึ้นรูป

1. การตรวจลักษณะเฉพาะของแกรนูล

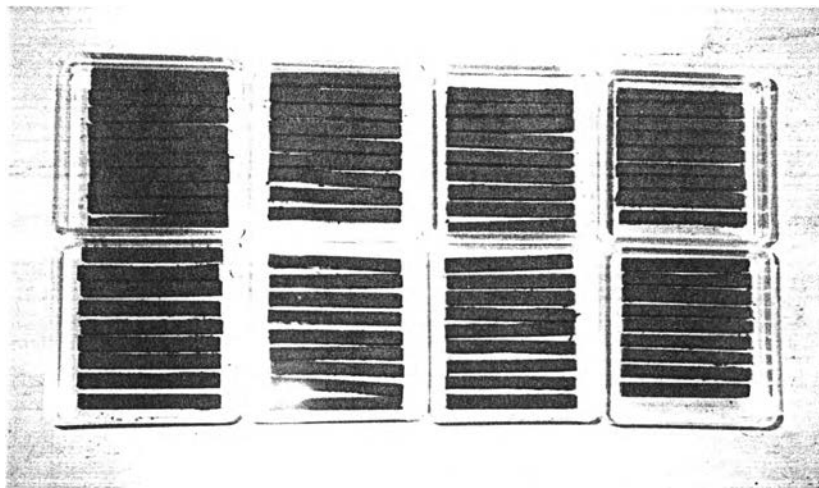
ผลการวัดอัตราการไหล (flow rate) ความหนาแน่นการบรรจุ (filled density) และความหนาแน่นภายหลังเขย่า (tap density) ของเม็ดแกรนูลแสดงไว้ในตารางที่ 21 แกรนูลที่ได้มีคุณลักษณะอยู่ในเกณฑ์ที่พร้อมจะขึ้นรูปได้ ตัวอย่าง A และ B มีความหนาแน่นภายหลังเขย่าต่อความหนาแน่นการบรรจุ มีค่าประมาณ 1.3-1.4 ซึ่งค่อนข้างสูงแต่เมื่อผสมตัวประสาน (binder) มากขึ้น ค่านี้ลดลงเหลือประมาณ 1.2 ในตัวอย่าง C, D และ E

ตารางที่ 21 ลักษณะเฉพาะของแกรนูลก่อนขึ้นรูป

ลักษณะเฉพาะของ แกรนูล	ส่วนผสม				
	A	B	C	D	E
ตัวประสาน :	0	0.6	1.2	2.4	4.0
น้ำ (%)	10.3	10.02	10.05	13.34	14.98
เก็บรักษา(วัน)	>7	>7	>7	>7	>7
อัตราการไหล(กรัม/วินาที)	0.36	0.33	0.48	0.50	0.38
ความหนาแน่นภายหลังเขย่า(กรัม/ซ.ม. ³)	1.54	1.54	1.59	1.54	1.43
ความหนาแน่นการบรรจุ(กรัม/ซ.ม. ³)	1.11	1.22	1.28	1.29	1.18
ความหนาแน่นภายหลังเขย่า					
ต่อความหนาแน่นในการบรรจุ	1.39	1.26	1.24	1.19	1.21
สารหล่อลื่น	น้ำมันก๊าด	น้ำมันก๊าด	น้ำมันก๊าด	น้ำมันก๊าด	น้ำมันก๊าด
แรงอัด(ตัน/ซ.ม. ²)	0.2-2.0	0.2-2.0	0.2-2.0	0.2-2.0	0.2-2.0

2. การอัดขึ้นรูปเป็นชั้นทดสอบ

มีรูปร่างเป็นแท่งบาร์ ขนาด 0.44x0.44x4.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 4 กรัม ชั้นทดสอบที่ผ่านการอัดด้วยแรงต่างๆ กันแสดงในรูปที่ 33 โดยทั่วไปสามารถอัดได้โดยไม่มีรอยแตก นอกจากส่วนผสม A เมื่ออัดด้วยแรง 0.2 ตัน ต่อตารางเซนติเมตร และไม่มีตัวประสาน ตารางที่ 22 แสดงผลการอัดชั้นทดสอบที่ไม่แตกชำรุด(เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 33 แสดงถึงรูปร่างของชิ้นทดสอบ

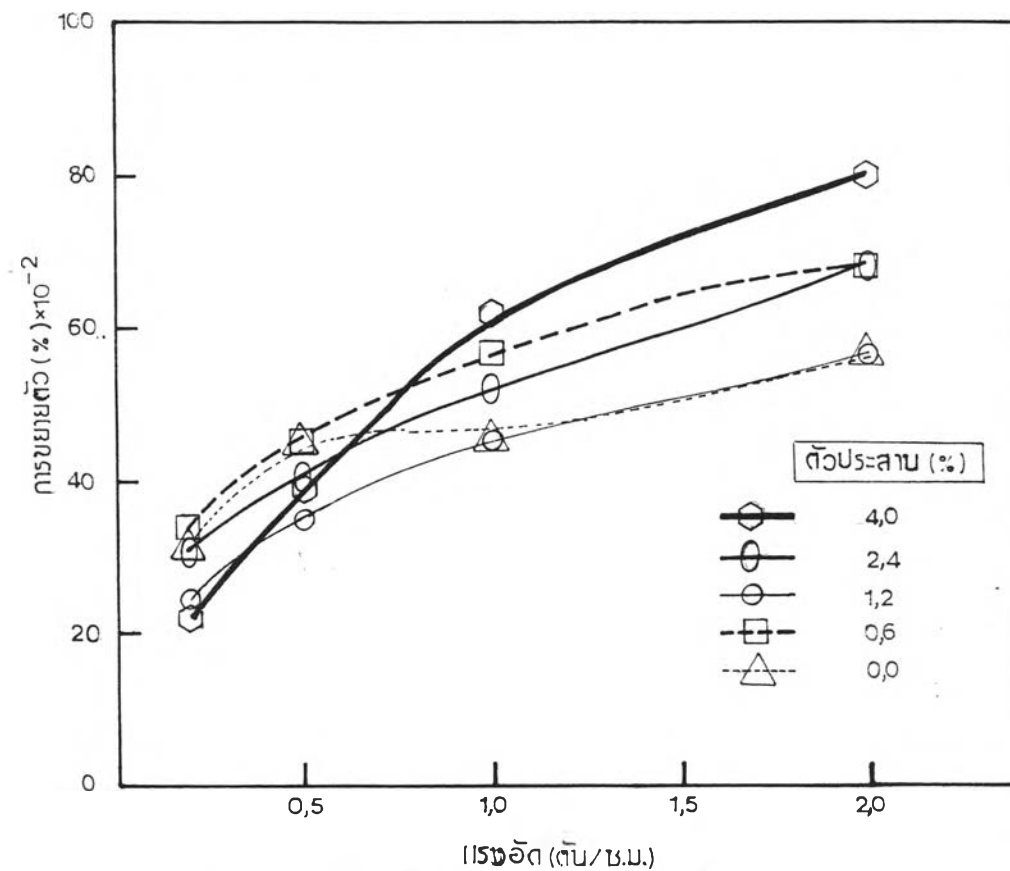
ตารางที่ 22 ผลการอัดชิ้นทดสอบที่ไม่แตกชำรุด (เปอร์เซ็นต์)

ตัวประสาน (%)	ผลที่ไม่แตกชำรุดของชิ้นทดสอบ (%)			
	แรงอัด (ตัน/ซม. ²): 0.2	0.5	1.0	2.0
0.0	33.3	100.0	83.3	100.0
0.6	83.3	100.0	100.0	100.0
1.2	100.0	100.0	100.0	100.0
2.4	100.0	100.0	100.0	100.0
4.0	100.0	100.0	100.0	100.0

การขยายตัวของชิ้นทดสอบ หลังจากการอัดขึ้นรูป เมื่ออัดที่แรงอัดและตัวประสานปริมาณต่างๆ
กัน ผลแสดงในตารางที่ 23 และ ในรูปที่ 34

ตารางที่ 23 การขยายตัวของชั้นทดสอบเมื่อแรงอัดและตัวประสานที่ปริมาณต่างๆ กัน
(เปอร์เซ็นต์)

ตัวประสาน (%)	การขยายตัว (%)			
	แรงอัด (ตัน/ซม. ²): 0.2	0.5	1.0	2.0
0.0	0.31	0.45	0.45	0.56
0.6	0.34	0.45	0.56	0.68
1.2	0.25	0.35	0.45	0.56
2.4	0.23	0.41	0.52	0.68
4.0	0.06	0.39	0.63	0.81



รูปที่ 34 แสดงถึงแรงอัดและตัวประสานมีผลต่อการขยายตัว

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแรงอัด และการขยายตัวของเนื้อเฟอร์ไรท์พบว่าแรงอัดมากขึ้นยังทำให้ การขยายตัวมากขึ้น จึงเป็นการยากที่จะถอดชิ้นงานออกจากแบบ การเติมตัวประสานปริมาณ น้อยๆ ไม่ช่วยลดการขยายตัว แต่ถ้าเพิ่มตัวประสาน 1.2 พบว่าให้ผลดีที่สุด สามารถลดการ ขยายตัวไม่ว่าจะใช้แรงอัดเท่าไร ถ้าปริมาณตัวประสานมากขึ้นเหมาะสมกับแรงอัดต่างๆ เช่น ต่ำกว่า 1 ตัน ต่อตารางเซนติเมตร ถ้าเพิ่มแรงอัดมากขึ้นยังทำให้การขยายตัวสูงขึ้น จึงสรุป ได้ว่า การอัดเฟอร์ไรท์ชั้นเล็กๆ ใช้แรงอัดที่ต่ำมากๆ เช่น 0.2 ตันต่อตารางเซนติเมตร สามารถอัดได้ดีเมื่อใช้ตัวประสานมาก (2.4-4 %)

5.2.4 การตรวจลักษณะเฉพาะของชิ้นทดสอบ

1. ความหนาแน่น

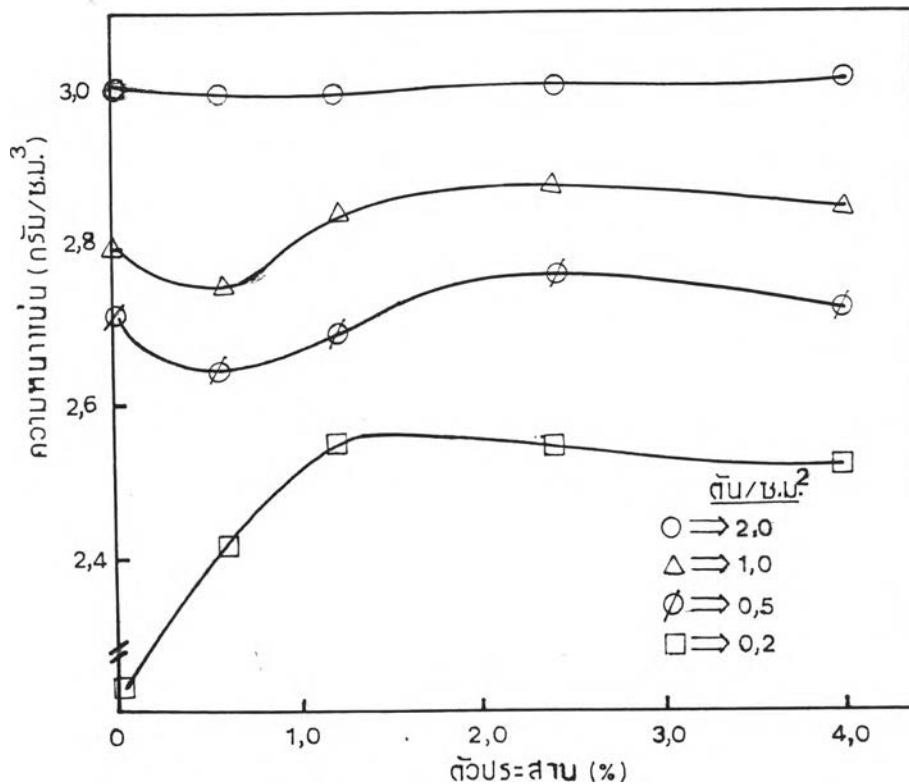
แท่งตัวอย่างมีส่วนผสมของตัวประสานปริมาณต่างๆ และอัดเป็นแท่งบาร์ด้วย แรงอัดต่างๆ กันทำให้มีความหนาแน่น(compact density) แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัด

แรงอัด ตัน/ซม ²	ความหนาแน่น, กรัม/ซม ³				
	A	B	C	D	E
	ตัวประสาน : 0 0.6 1.2 2.4 4.0				
0.2	2.25	2.39	2.56	2.53	2.51
0.5	2.70	2.61	2.68	2.75	2.71
1.0	2.79	2.73	2.85	2.87	2.85
2.0	3.02	2.92	3.00	3.04	3.02

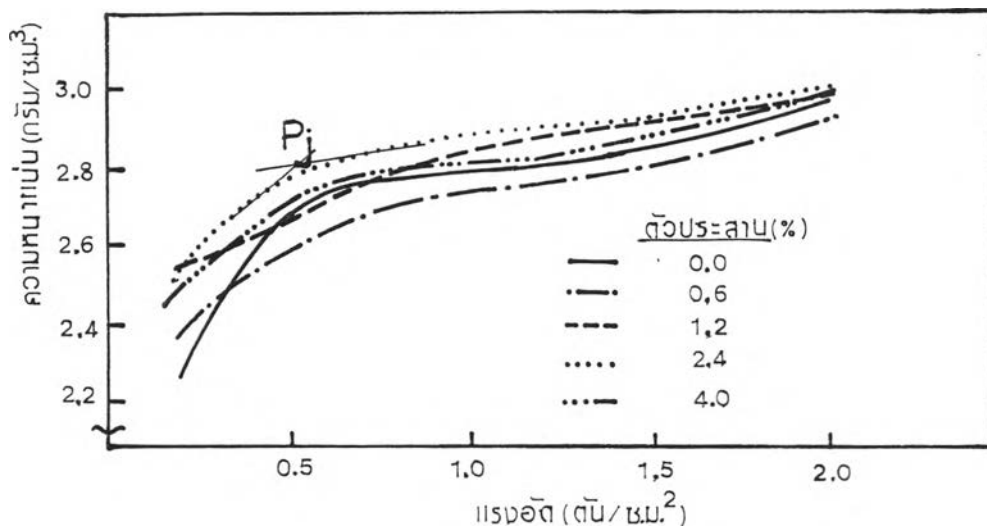
2. การศึกษาอิทธิพลแรงอัดและปริมาณตัวประสานที่มีผลต่อความหนาแน่น
(Green density)

จากตารางที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและปริมาณสารเคมีที่เป็นตัวประสานซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นทำให้เห็นว่าเมื่อใช้แรงอัดมากขึ้นความหนาแน่นของชิ้นที่อัดได้จะเพิ่มมากขึ้น ถ้าใช้แรงอัด 0.2 ตัน/ซ.ม.² มีผลทำให้ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบมีค่าต่ำ โดยมีความหนาแน่นเพียง 2.2-2.6 กรัม/ซ.ม.³ เท่านั้น แต่ถ้าให้แรงอัดเพิ่มเป็น 0.5-2.0 ตัน/ซ.ม.² ก็จะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบเพิ่มเป็น 2.63-3.0 กรัม/ซ.ม.³ ไม่ว่าจะใช้ปริมาณตัวประสานเท่าใดก็ตาม เมื่อพล็อตค่าความหนาแน่นกับปริมาณตัวประสานและแรงอัด ดังรูปที่ 35 การศึกษาครั้งนี้พบเช่นเดียวกับผลงานของ Joann และ David ที่ว่า แรงอัดมีบทบาทต่อความหนาแน่นของชิ้นงานมากกว่าตัวประสาน



รูปที่ 35 ตัวประสานและแรงอัดมีผลต่อความหนาแน่น

ในรูปที่ 35 พบว่าที่แรงอัดสูงสุดคือ 2.0 ตันต่อตารางเซนติเมตร ชั้นทดสอบมีความหนาแน่นสูงที่สุดและใกล้เคียงกัน ตัวประสานไม่มีผลต่อความหนาแน่นเลย แต่ถ้าแรงอัดต่ำกว่า 2 ตันต่อตารางเซนติเมตร เช่นที่ 0.2, 0.5 และ 1.0 ตันต่อตารางเซนติเมตร ต้องใช้ตัวประสาน 1.2 % ถึง 4.0 % จึงทำให้ความหนาแน่นใกล้เคียงกันโดยแรงอัดที่ทำให้ความหนาแน่นต่ำกว่าแรงอัดที่สูง



รูปที่ 36 แรงอัดและตัวประสานที่มีผลต่อความหนาแน่น

การศึกษาอิทธิพลของตัวประสาน ที่มีผลต่อความหนาแน่น จากรูปที่ 36 จะเห็นว่าที่แรงอัด 0.5 ตันต่อตารางเซนติเมตรขึ้นไป ปริมาณตัวประสาน 2.4 % สามารถทำให้ชั้นทดสอบมีความหนาแน่นสูงที่สุด เพราะเป็นปริมาณที่เหมาะสม สามารถทำให้เนื้อสารมีความยึดหยุ่นและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มแรงอัดให้มากขึ้นกว่า 0.2 และ 0.5 ตัน/ซ.ม.² คุได้จากความชันของเส้นกราฟนี้ในระหว่างที่แรงอัดเพิ่มมากขึ้นเม็ดแกรนูลจะถูกบีบให้มีรูปร่างเปลี่ยนไปจากเดิม (deformed) มีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 9 ความชันของเส้นกราฟเริ่มเปลี่ยนที่จุด Pj (รูปที่ 36) ซึ่งมีค่าแรงอัด 0.5 ตัน/ซ.ม.² เข้าสู่ขั้นสุดท้ายของการอัดที่มีการเรียงตัวของอนุภาคที่อยู่ภายในเม็ดแกรนูลเพื่อจัดโพรงอากาศออกไป แรงอัดที่สูงขึ้นสามารถจัดโพรงอากาศออกไปได้มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นยังสูงขึ้น

ถ้าเปรียบเทียบจุด P_j ของเส้นกราฟที่ผสมตัวประสาน 2.4 % นี้กับเส้นกราฟที่ใช้ตัวประสานมากกว่าหรือน้อยกว่าปริมาณนี้จะพบว่าจุด P_j ของส่วนผสมอื่นๆ เกิดที่แรงอัดสูงกว่า 0.5 ตัน/ซ.ม.² แสดงว่าส่วนผสมอื่นๆ อัดได้ยากกว่า จึงมีความหนาแน่นต่ำกว่า สำหรับเส้นกราฟของส่วนผสมที่ไม่มีตัวประสาน ไม่ได้นำมาเปรียบเทียบเพราะขณะที่ใช้แรงอัดน้อยๆ ชั้นทดสอบมีรอยแตก ขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นที่ได้อาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

5.2.5 การตรวจความแข็งแรงเนื่องจากแรงดัดโค้ง

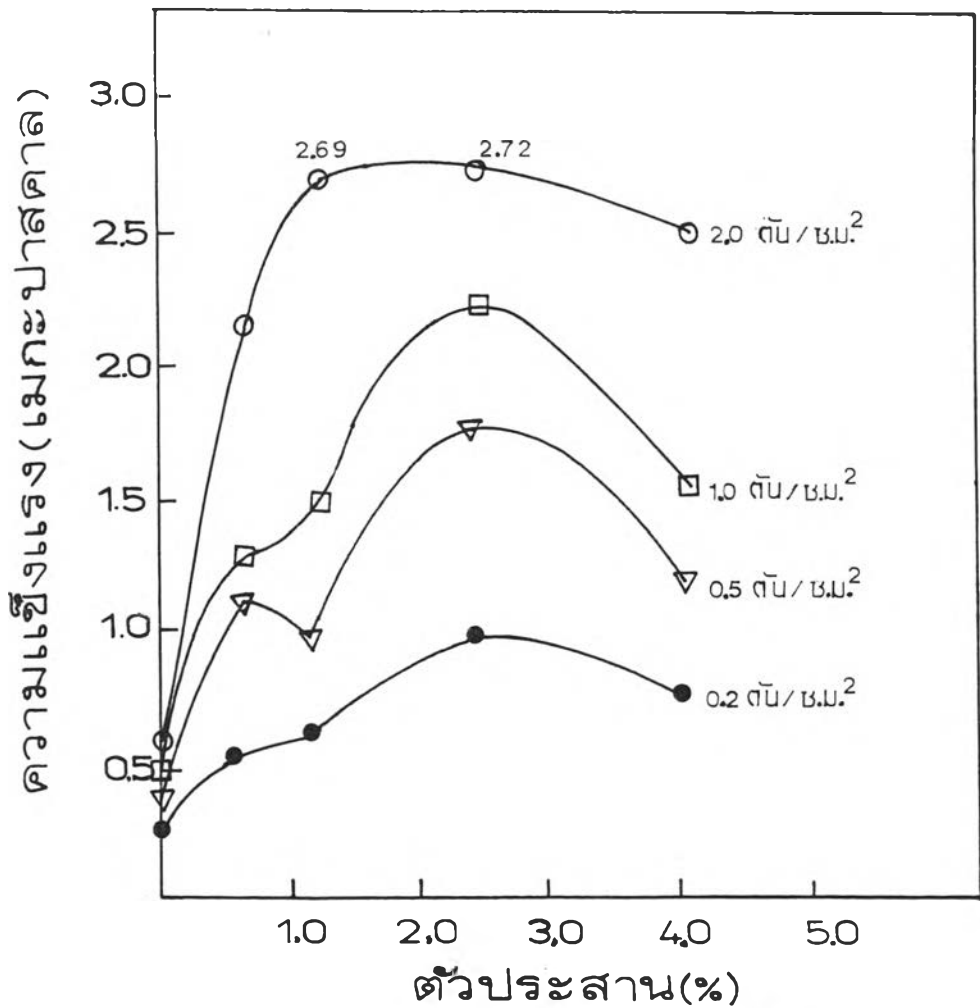
ผลการทดสอบความแข็งแรงรวบรวมไว้ในตารางที่ 25 เห็นได้ชัดเมื่อใช้แรงอัดสูงขึ้น ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น รูปที่ 37

ตารางที่ 25 แสดงถึงความแข็งแรงเนื่องจากแรงดัดโค้งภายหลังการอัดขึ้นรูปชั้นทดสอบ

(เมกะปาสคาล, MPa)

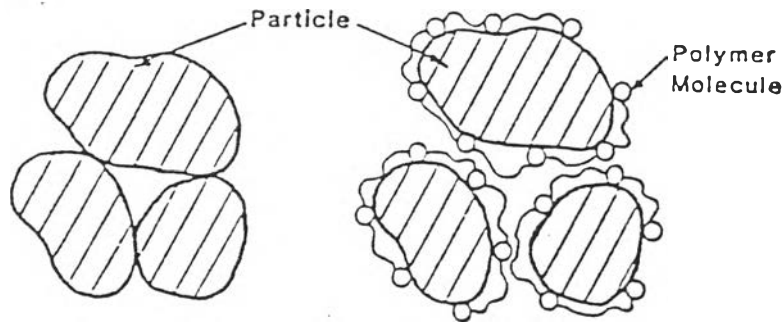
แรงอัด (ตัน/ซ.ม. ²)	ความแข็งแรงเนื่องจากแรงดัดโค้ง(เมกะปาสคาล)				
	ตัวประสาน(%)=0	0.6	1.2	2.4	4.0
0.2	0.20*	0.52[0.26]	0.60[0.12]	0.98[0.21]	0.76[0.13]
0.5	0.37[0.07]	1.13[0.19]	0.96[0.15]	1.77[0.22]	1.16[0.17]
1.0	0.45[0.10]	1.28[0.37]	1.49[0.34]	2.22[0.30]	1.52[0.27]
2.0	0.60[0.06]	2.05[0.39]	2.69[0.11]	2.72[0.11]	2.53[0.30]

* ทัก 67 % , [] คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



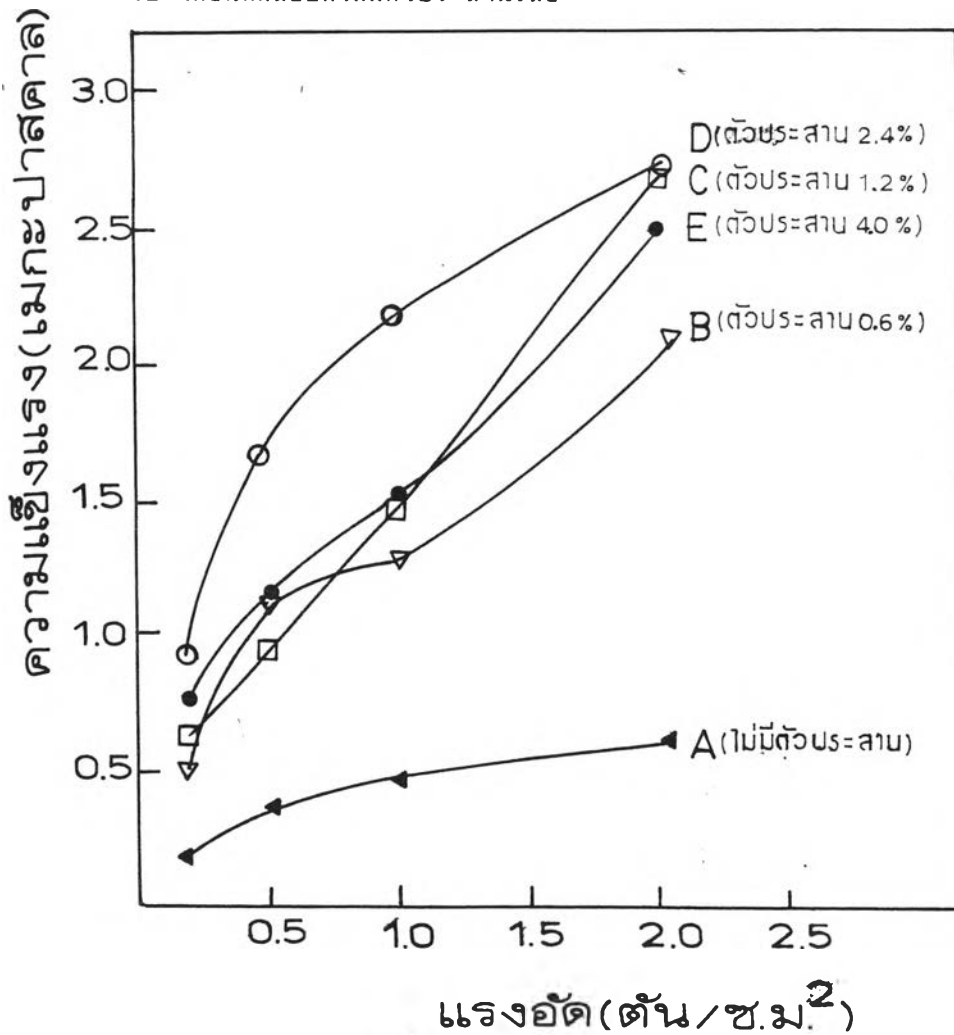
รูปที่ 37 ความแข็งแรงของชิ้นทดสอบเมื่อใช้ตัวประสานปริมาณต่างๆ กัน

อิทธิพลของตัวประสาน ที่มีผลต่อความแข็งแรง ขึ้นกับความสามารถของตัวประสาน ที่ทำให้ชิ้นทดสอบถูกอัดได้ง่าย ทำให้มีความหนาแน่นสูง ในที่นี้คือ โพลีเอทิลีนไกลคอล เป็นตัวช่วยทำให้สารมีความยืดหยุ่นและถูกอัดได้ง่าย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งช่วยยึดอนุภาคให้เกาะติดกัน ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน ดูจากรูปที่ 37 พบว่าเมื่อใส่ตัวประสาน 2.4 % จะทำให้ชิ้นทดสอบมีความแข็งแรงสูงสุด เมื่อเพิ่มตัวประสานมากขึ้น ความหนาแน่นของสารลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของตัวประสาน มีค่าน้อยกว่าสารเฟอร์ไรท์ ขณะเดียวกันโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่จับผิวอนุภาคสารมีปริมาณมากเกินไป (ดูรูปที่ 38) ไม่ได้ช่วยให้การเชื่อมติดของอนุภาคสารกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มมากขึ้น แม้ว่าโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล มีความยืดหยุ่น แต่ตัวมันเองมีความเปราะ เมื่อตัวเติมพิเศษนี้เกาะกันเอง หนาๆ จึงเป็นเหตุให้ความแข็งแรงลดลง (James S.Reed "Introduction to the Principles of Ceramic Processing" p.175)



รูปที่ 38 แสดงถึงโมเลกุลของพอลิเมอร์เคลือบผิวของอนุภาค(แหล่งที่ตัดออกมาเหมือนรูปที่ 9)

การใช้แรงอัดต่างๆ มีผลต่อความแข็งแรง ดังรูปที่ 39 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อใช้ตัวประสานระหว่าง 1.2%-4.0 % ที่แรงอัด 2 ตัน/ซ.ม.² ให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน และแตกต่างกันไปจากชั้นทดสอบที่ไม่มีตัวประสานเลย



รูปที่ 39 ความแข็งแรงของชั้นทดสอบที่แรงอัดต่างกัน

ชิ้นงานควรมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการถูกเคลื่อนย้ายระหว่างผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยไม่มี การแตกหัก(Laboratory Instruction Manual for Ceramic Undergraduate, N.Y.S. at Alfred University.) ได้มีผู้รวบรวมลักษณะของชิ้นงานที่มีความแข็งแรง ในระดับต่างๆ ไว้ดังนี้

ความแข็งแรง (PSI [MPa])	ลักษณะชิ้นงาน
<50 [0.345]	- หลุดเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย
50 [0.345]-100 [0.690]	- หลุดตามขอบและมุมแล้ว ยังมีผิวหยาบ
150 [1.034]-300 [2.069]	- ผิวเรียบ ขอบคมชัดเหมาะสมกับการทำชิ้นงานขนาดเล็ก และอื่นๆ
300 [2.069]-600 [4.138]	- ผิวเรียบเหมาะสมกับชิ้นงานที่เป็นแท่งยาว
>600 [4.138]	- สามารถนำไปกลึงหรือไสด้วยเครื่องจักร

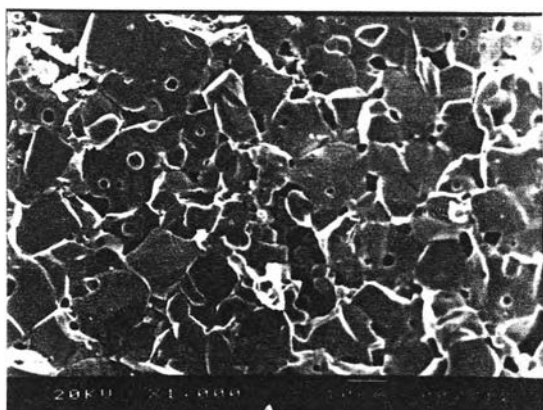
ถ้าเปรียบเทียบผลของการอัดชิ้นงานทดสอบกับความแข็งแรงจากการทดลองนี้ สามารถสรุปได้ว่าการอัดชิ้นงานขนาดเล็กสามารถใช้แรงอัด 0.5 ตันต่อตารางเซนติเมตร ต้องใช้ตัวประสาน 2.4 % หรือใช้แรงอัด 1 ตันต่อตารางเซนติเมตร ต้องใช้ตัวประสาน 0.6, 1.2 หรือ 4.0 % หรือแรงอัด 2 ตันต่อตารางเซนติเมตร ต้องใช้ตัวประสาน 0.6 % ถ้าต้องการอัดชิ้นงานขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อใช้แรงอัด 1 ตันต่อตารางเซนติเมตร ต้องใช้ตัวประสาน 2.4 % แต่ถ้าใช้แรงอัดสูงขึ้นอีกเป็น 2 เท่า อาจใช้ตัวประสาน 1.2, 2.4 หรือ 4.0 %

เนื่องจากดีเฟล็คชันโฮคเป็นชิ้นส่วนแม่เหล็กทรงระฆังมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับแกนแม่เหล็กชนิดอื่นๆ ฉะนั้นแรงอัดที่เหมาะสมนำไปใช้งานคือ 1.0-2.0 ตันต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ร่วมกับตัวประสาน 1.2, 2.4 หรือ 4.0 % จึงสามารถทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงพอ แต่ถ้าต้องการให้แข็งแรงมากที่สุดต้องใช้ตัวประสาน 2.4 %

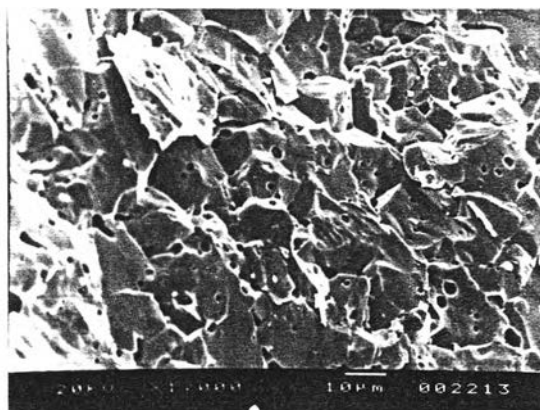
5.2.6 การตรวจลักษณะเฉพาะหลังการขึ้นเตอร

1. โครงสร้างจุลภาค

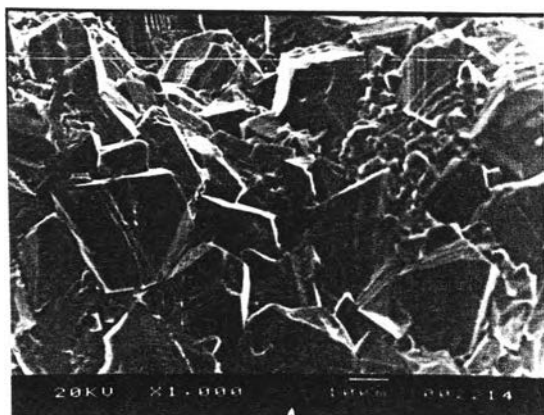
รูปที่ 40 แสดงให้เห็นภาพโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นเตอรที่ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นอิทธิพลของการอัดที่มีผลต่อความหนาแน่นเมื่อเนื้อสารมีตัวประสาน 1.2 % เท่ากัน ถ้าใช้แรงอัดน้อย (C-1 และ C-2) เนื้อสารมีโพรงอากาศมาก โพรงอากาศเป็นทั้งชนิดแทรกระหว่างเกรน (intergranular) และชนิดอยู่ในเกรน (intragranular) เมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น (C-3 และ C-4) โพรงอากาศน้อยลง ขนาดเกรนของขึ้นทดสอบนี้ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยมีขนาดประมาณ 30-50 ไมโครเมตร



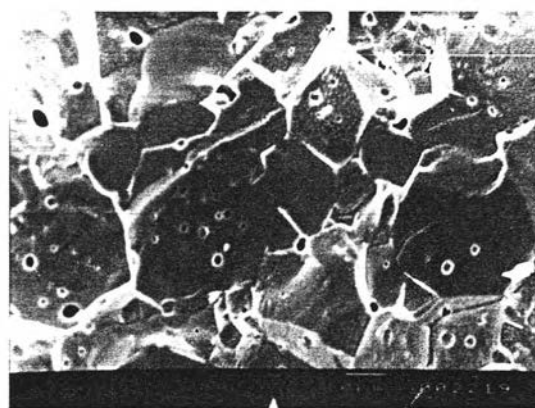
C-1 แรงอัด 0.2 ตัน/ซ.ม.²



C-2 แรงอัด 0.5 ตัน/ซ.ม.²



C-3 แรงอัด 1.0 ตัน/ซ.ม.²

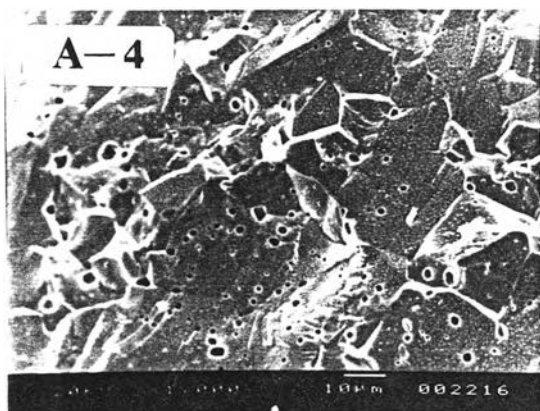


C-4 แรงอัด 2.0 ตัน/ซ.ม.²

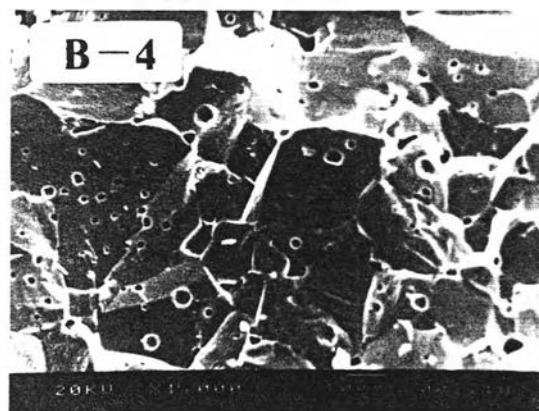
รูปที่ 40 แสดงโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบ ที่มีตัวประสาน 1.2 % อัดด้วยแรงต่างกัน และขึ้นเตอร 1250 องศาเซลเซียส

รูปที่ 41 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ทดสอบ เมื่อผ่านการซินเตอร์ที่ 1300°C .

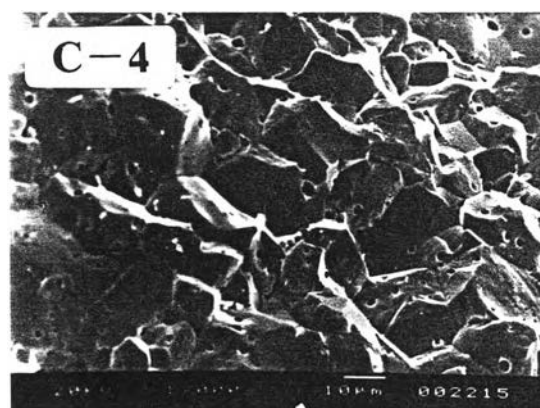
รูปนี้แสดงให้เห็นความแตกต่างของความหนาแน่น อันเนื่องมาจากการผสมตัวประสาน ปริมาณต่างกัน แต่ใช้แรงอัดเท่ากันที่ 2.0 ตัน/ซม^2 ที่แรงอัดสูงความหนาแน่นก่อนซินเตอร์สูงเกือบเท่ากันหมด (ดูตารางที่ 24) เมื่อซินเตอร์แล้วให้ความหนาแน่นสูงเช่นกัน จึงมีลักษณะเกรนและ



ตัวประสาน 0 %



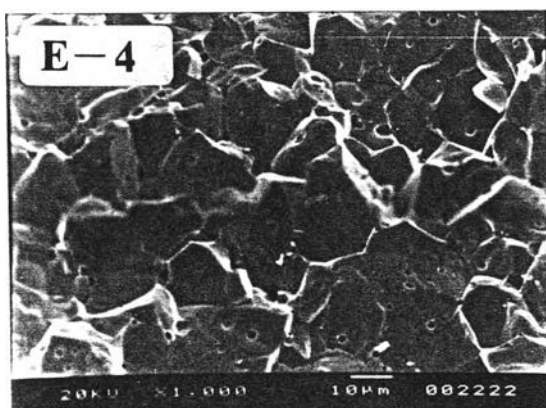
ตัวประสาน 0.6 %



ตัวประสาน 1.2 %



ตัวประสาน 2.4 %



ตัวประสาน 4.0 %

รูปที่ 41 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ทดสอบ ซึ่งใช้แรงอัด 2.0 ตัน/ซ.ม.^2 ให้ตัวประสาน ปริมาณต่างกัน และซินเตอร์ 1300 องศาเซลเซียส

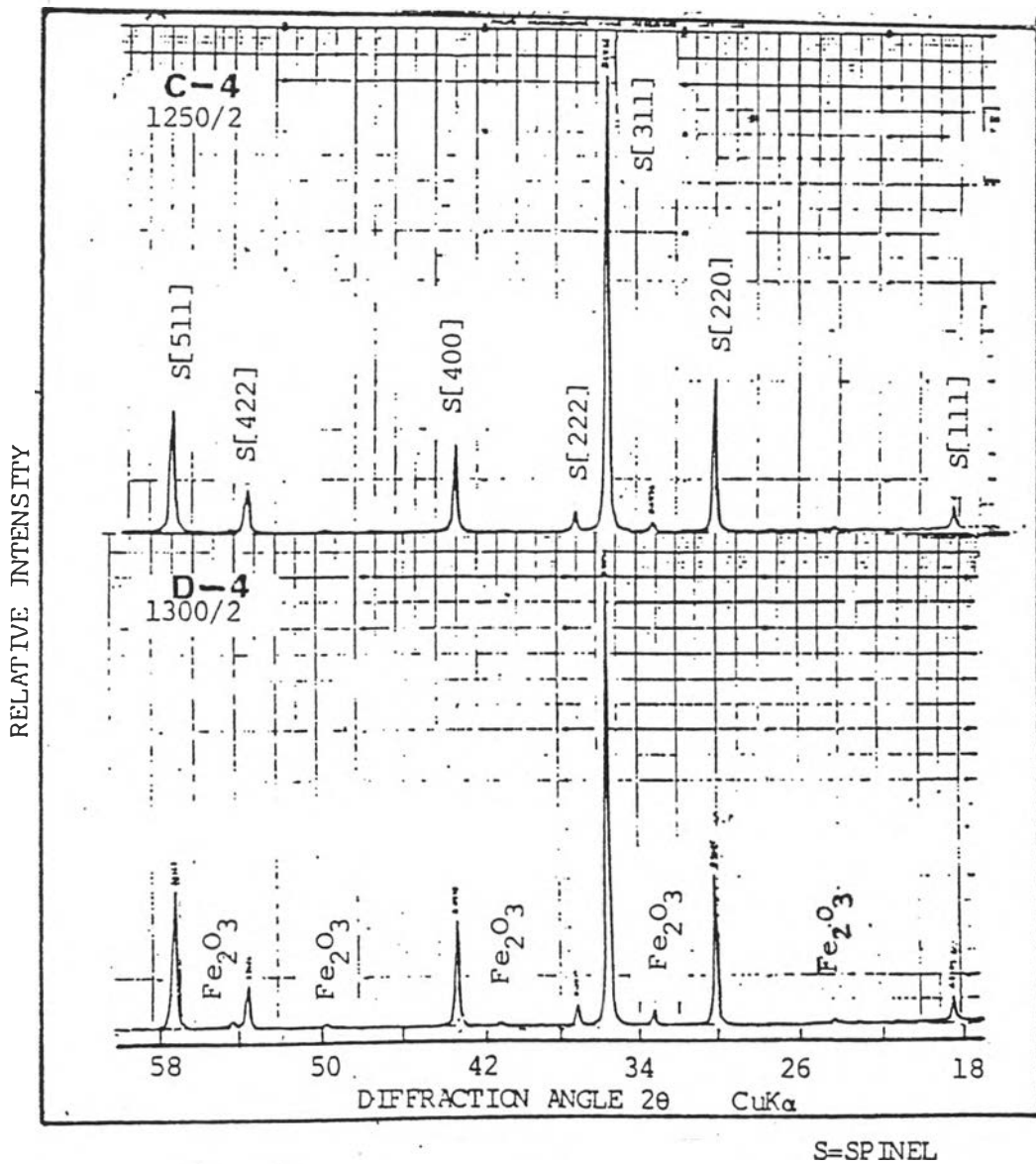
ความพรุนตัวคล้ายกันมาก ยกเว้น D-4 ซึ่งมีตัวประสาน 2.4 % เป็นสูตรที่ความหนาแน่นก่อนเผาสูงที่สุดและมีความแข็งแรงสูงที่สุดเช่นกัน (ดูตารางที่ 24 และตารางที่ 25 เมื่อแรงอัดเท่ากับ 2.0 ตัน/ซม^2 ตัวประสาน 2.4 %) จึงส่งผลทำให้มีเนื้อแน่นมากภายหลังการขึ้นเตอร์

การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเตอร์สูงขึ้นทำให้ขนาดเกรนโตขึ้น (grain growth) สามารถเปรียบเทียบการโตของขนาดเกรนได้โดยดู C-4 ของรูปที่ 40 และ 41 ซึ่งเป็นขั้นตอนสอบเคียวกัน เกรนภายหลังการขึ้นเตอร์ที่ 1300 องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 50-100 ไมโครเมตร

ถ้าเปรียบเทียบภาพ C-3, C-4 รูปที่ 40 และภาพ D-4, E-4 รูปที่ 41 กับรูปที่ 26 ซึ่งเป็นภาพของดีเฟลคชันโฮคจากห้องตลาด ชิ้นงานที่ทำได้ในห้องแล็บนี้ให้เนื้อแน่นกว่ามาก มีขนาดเกรนไม่ต่างกันมาก ซ้ำมีขนาดโพรงอากาศเล็กกว่าหรือเกือบไม่มีโพรงอากาศเลย (ดู D-4) ซึ่งจัดเป็นลักษณะที่ดีของโครงสร้างจุลภาค ฉะนั้นจึงนับได้ว่าเทคโนโลยีการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการผลิตครั้งนี้ใช้ได้ดี เมื่อความหนาแน่นสูงก็จะให้สมบัติทางแม่เหล็กที่ดี (Yamamoto "Magnetic Properties of Mn-Zn Ferrites with Fine Grain Sizes for Magnetic Heads" Japan 1992)

2. เฟส

การตรวจเฟสที่ปรากฏในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเตอร์ที่ 1250 องศาเซลเซียส และ 1300 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 42



รูปที่ 42 แพทเทิร์นเอ็กซ์เรย์คิฟแฟลกชันของชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นเตอร์ที่ 1250 องศาเซลเซียส และ 1300 องศาเซลเซียส

ผลการตรวจเฟสพบว่าเนื้อชิ้นทดสอบมีเฟสบีเนลของแมกนีเซียมซิงค์เหล็กออกไซด์ (Zinc Magnesium Iron Oxide Solid Solutions) ร่วมกับเหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดเป็นเฟสที่สอง(second phase) แต่มีปริมาณน้อยมาก

3. ความหนาแน่น(bulk density)

ชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นเตอร์มีความหนาแน่นระหว่าง 4.6-4.7 กรัม/ซม.³ มีความพรุนตัว(apparent porosity) 0.9-2.6 %

ความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นทดสอบคำนวณจากพีซีเอ็กซ์เรย์ C-4 และ D-4 ในรูปที่ 42 ค่า 2θ ที่ 43.0 [d-spacing 2.1006, h k l [4, 0, 0] และ 2θ ที่ 43.1 [d-spacing 2.0978, h k l [4, 0, 0]] ให้ค่าเฉลี่ย a - พารามิเตอร์เท่ากับ 8.3968 Å ให้ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี 4.814 กรัม/ซม.³

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของชิ้นทดสอบที่ผ่านการเผาแล้ว พบว่ามีความหนาแน่นเป็น 95.5-97.6 % ของความหนาแน่นทางทฤษฎี การที่ชิ้นทดสอบมีความหนาแน่น 4.6-4.7 กรัม/ซม.³ ขณะที่สินค้าในท้องตลาดมีความหนาแน่น 4.4-4.6 กรัม/ซม.³ เพราะสินค้าในท้องตลาดมีความพรุนตัวมาก (0.5-6.1 %) ดูจากตารางที่ 14

5.3 การทำดีเฟล็คชันโยค

5.3.1 การเตรียมเฟอร์ไรต์เพื่อการขึ้นรูป

ผลจากการศึกษาข้อมูลจากการศึกษาอิทธิพลของตัวประสาน และ แรงอัดของชิ้นทดสอบ ได้ผลการศึกษาว่าการใช้ตัวประสาน 2.4 % และการใช้แรงอัด 1-2 ตัน/ซ.ม.² จะมีผลดีที่สุด ในการเตรียมสารตั้งต้น บดผสม อบและเผาแคลไซน์ แล้ว บดละเอียดอีกครั้งหนึ่งเหมือนหัวข้อ 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 และ 4.3.4 ตามลำดับ น้ำ สลিপภายหลังการบดละเอียด มีความกว้างจำเพาะเฉลี่ย 1.709

การทำแกรนูลโดยวิธี 4.3.5 ผลการตรวจสอบสมบัติของเม็ดเฟอร์ไรท์ แสดงในตารางที่ 26 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับที่ใช้ชั้นรูปชั้นทดสอบ

ตารางที่ 26 แสดงการตรวจลักษณะแกรนูลก่อนชั้นรูปดีเฟล็คชันโฮค

น้ำ (%)	12.55
การหมัก (วัน)	>7
อัตราการไหล (กรัม/วินาที)	0.35
ความหนาแน่นการเซ้า (กรัม/ซม. ³)	1.54
ความหนาแน่นการบรรจุ(กรัม/ซม. ³)	1.22
ความหนาแน่นการเซ้า/ความหนาแน่นการบรรจุ	1.26
การหล่อลื่น	น้ำมันก๊าด
แรงอัด (ตัน/ซม. ²)	1-2
ตัวประสาน (%)	2.4

5.3.2 การอัดชั้นรูป

ทดลองอัดชั้นรูปดีเฟล็คชันโฮค โดยใช้แบบแม่พิมพ์ชุดแรก ตามรูปที่ 15 ใช้เม็ดเฟอร์ไรท์หนัก 200 กรัม/ชิ้น แรงอัด 1 ตัน/ซม.² อัดโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน เมื่ออัดแล้วผลปรากฏว่าไม่สามารถแยกแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่างออกจากกันได้ เพราะเครื่องอัดไฮดรอลิกนี้ เป็นแบบอัดทิศทางเดียว แม่พิมพ์มีสปริงเป็นตัวปลดชิ้นงานแต่แรงสปริงไม่เพียงพอในการปลดชิ้นงาน

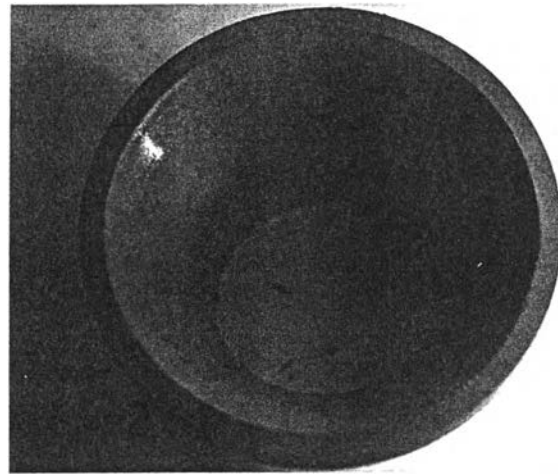
จากเหตุผลดังกล่าว จึงทำแบบพิมพ์ชุดที่ 2 ตามรูปที่ 16-17 ใช้เม็ดเฟอร์ไรท์หนัก 145-220 กรัม/ชิ้น และแรงอัด 0.04-1 ตัน/ซม.² ดังตารางที่ 27 การอัดดีเฟล็คชันโฮคโดยใช้แม่พิมพ์ชุดนี้มีจุดเด่นคือ แม่พิมพ์ชุบผิวแข็งผ่านการเจียรไนมีพิทความเพือ 0.02 ม.ม.

และมีตัวปลดชิ้นงานโดยการอัดชิ้นงานออกจากแบบพิมพ์ แบบพิมพ์ชุดนี้จึงสามารถใช้งานได้ดี
เหมาะสมที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ จากการทดลองพบว่าใช้เม็ดเฟอร์ไรท์หนัก 175 กรัม/ชิ้น และ
แรงอัด 0.8 ตัน/ซม.² จะให้ผลดีที่สุดชิ้นที่ 15-22 ไม่สามารถใส่แรงอัด 1-2 ตัน/ซม.²
ตามที่ใช้ทำชิ้นทดสอบได้ เพราะรูปร่างดีเฟล็คชันโยคซับซ้อนกว่าชิ้นทดสอบ เมื่อใช้แรงอัดและ
จำนวนเม็ดเฟอร์ไรท์มากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานแตกร้าว หลังปลดชิ้นงานออก ถ้าแรงอัดและ
จำนวนเม็ดเฟอร์ไรท์น้อยจะทำให้ชิ้นงานปลดออกง่าย แต่ความหนาแน่นน้อยเกินไป

ตารางที่ 27 แสดงผลหลังการอัดชิ้นรูปดีเฟล็คชันโยค ที่น้ำหนักและแรงอัดต่างๆ

น้ำหนักเม็ดเฟอร์ไรท์ (กรัม)	แรงอัด (ตัน/ซม. ²)	ผลที่ได้รับ	ชิ้นที่
145	0.04	เสีย(ปลดง่าย)	1
170	0.5	ดี	5
175	0.8	ดีมาก	15-22
180	0.9-1.0	เสีย(แตกร้าว)	10, 12-14
180	0.2-0.5	ดี	3-4, 6-9, 11
220	0.3	เสีย(ปลดยาก)	2

ขนาดและน้ำหนักของดีเฟล็คชันโศคหลังการอบแห้ง แสดงในรูปที่ 43 และตารางที่ 28



รูปที่ 43 ดีเฟล็คชันโศคหลังอบแห้ง

ตารางที่ 28 แสดงขนาดและน้ำหนักของดีเฟล็คชันโศคหลังการอบแห้ง

ชั้นที่	ขนาด(ม.ม.)					น้ำหนัก (กรัม)
	A	B	C	D	E	
12	85.7	76.7	55.7	42.3	36.0	155.05
13	85.7	76.7	55.7	42.3	36.0	155.05
15	85.6	76.7	55.7	42.3	36.3	151.13
18	85.7	76.6	55.7	42.2	36.4	154.31
19	85.7	76.6	55.7	42.2	36.4	154.31
22	85.7	76.6	55.7	42.2	36.4	154.22

หมายเหตุ ชั้นที่ 1-2, 10, 12-14 เสี่ยง

ชั้นที่ 3-9, 11 ดี (เป็นสารที่ใช้ทดลองแบบพิมพ์)

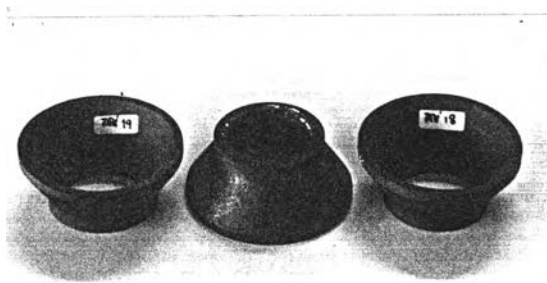
5.3.3 การขึ้นเตอรดีเฟิล์คชันโศค

1. นำกลุ่มตัวอย่างที่ถอดแบบได้ดี (ชั้นที่ 5,6) และชั้นที่เสีย (ชั้นที่ 12,13) ไปทดลองขึ้นเตอร ใช้เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงชนิดท่อ การขึ้นเตอรครั้งแรกเหมือนหัวข้อ 4.3.7 โดยเลือกอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานที่ขึ้นเตอรเรียบร้อยออกจากเตา พบว่าชิ้นงานทั้งหมดบิดเบี้ยว ส่วนที่บิดเบี้ยวมากที่สุด คือส่วนที่สัมผัสกับฐานรองชิ้นงาน
 2. นำกลุ่มตัวอย่างที่เสีย (ชั้นที่ 10) และชั้นที่ดี (ชั้นที่ 18,19) มาทดลองเผาในบรรยากาศออกซิเจน ใช้อุณหภูมิ 1330 องศาเซลเซียส และอัตราการเผาเดิม พบว่าทุกชิ้นยังคงบิดเบี้ยวตรงส่วนที่สัมผัสกับฐานรอง ทั้งนี้เพราะไม่สามารถจัดหาฐานรองที่ทำด้วยทังสเตนคาร์ไบด์ และมีรูปทรงคล้ายระฆังได้
 3. ทดลองเผาในอัตราการเผาที่ช้าลง พร้อมกับลดอุณหภูมิลงที่ 1280 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเจน ใช้กลุ่มตัวอย่างชั้นที่ 11,15-17,20,22 ให้ผลดี ทุกตัวอย่างบิดเบี้ยวน้อยลง
- พบว่า การเผาในบรรยากาศออกซิเจน ให้ผลที่บิดเบี้ยวน้อยกว่าการเผาธรรมดา

5.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะหลังการขึ้นเตอร

1. ขนาดและความหนาแน่น

นำชิ้นงานที่มีความบิดเบี้ยวน้อยที่สุด เมื่อผ่านการขึ้นเตอรแล้ว มาวัดขนาดและน้ำหนักของดีเฟิล์คชันโศคหลังการขึ้นเตอร ซึ่งแสดงในรูปที่ 44 และตารางที่ 29



รูปที่ 44 ดีเฟิล์คชันโศคหลังการขึ้นเตอร



ตารางที่ 29 ขนาด น้ำหนัก ความหนาแน่นบัลค์และความพรุนตัวของดีเฟล็คชันโยคหลังการ
ซินเตอร์

ชั้นที่	ขนาด (ม.ม.)					น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น บัลค์ (กรัม/ซ.ม.)	ความพรุนตัว (%)
	φA	φB	φC	φD	E			
12	69.3-76.8	61.0-67.0	44.5-47.6	33.5-36.7	29.7	136.08*	4.70	0.10
13	73.4-76.2	65.7-68.8	47.4-47.7	36.1-36.5	29.9-30.8	150.39	4.71	0.03
15	69.9	62.6	44.9-46.4	34.0-35.5	30.0	148.89	-	-
18	69.8-72.0	61.5-65.7	45.1-47.3	33.2-35.8	30.5	126.41*	4.71	0.08
19	69.7	62.5	45.0-47.0	33.6-36.2	30.4	147.44	4.71	0.06
22	68.9-71.4	60.7-64.0	44.0-47.8	33.2-36.5	30.0-30.4	123.34*	4.67	0.53
15	18.4	18.3	17.9	17.5	17.6	3.03	การหดตัวหลังซินเตอร์ (%)	

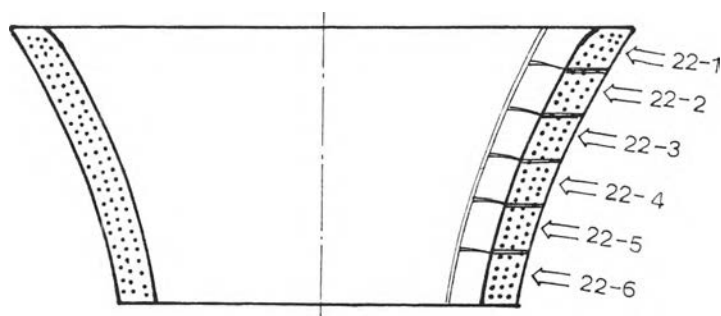
* ชั้นงานถูกตัดแบ่งเพื่อค้โครงสร้างจุลภาคและเฟส

จากตารางที่ 29 ค่าเฉลี่ยการหดตัวของชั้นงานในแนวนอน(A,B,C,D) 18.0 % และแนวตั้ง(E) 17.6 % ส่วนความหนาแน่นบัลค์และความพรุนตัวของดีเฟล็คชันโยคหลังซินเตอร์ ชั้นที่ 12-13, 18-19 และ 22 มีความหนาแน่นบัลค์ 4.67-4.71 กรัม/ซ.ม.³ และความพรุนตัว 0.03-0.53 % แสดงว่าอุณหภูมิที่ต่ำ ให้ความหนาแน่นต่ำ แต่ความพรุนตัวสูง เช่นชั้นที่ 22 ความหนาแน่น 4.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัว 0.53 % เมื่อเผาที่ 1280 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 1300 องศาเซลเซียสให้ความหนาแน่น 4.70 กรัม/ซ.ม.³ ความพรุนตัว 0.1 % และที่อุณหภูมิสูงที่สุด คือ 1330 องศาเซลเซียส ให้ค่าความหนาแน่น 4.71 กรัม/ซ.ม.³ ความพรุนตัว 0.03 %

สรุปว่า อุณหภูมิ 1330 องศาเซลเซียส ให้ความหนาแน่นสูงสุด และความพรุนตัวต่ำสุด

เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่สุ่มจากท้องตลาด กับชั้นงานที่ทำขึ้น จะพบว่าชั้นงานที่ทำขึ้นให้ความหนาแน่นบัลค์สูงกว่าและความพรุนตัวน้อยกว่า

ความแตกต่างของความหนาแน่นบัลค์และความพรุนตัว ในงานชั้นเดียวกันแต่ตำแหน่งต่างกัน ดังรูปที่ 45 ของดิเฟล็คชั่นโฮคหลังการชินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส ในอัตราการเผา 2 องศาเซลเซียส/นาที เวลาที่เผาแค่ 4 ชั่วโมง ใช้ออกซิเจนเป็นบรรยากาศ ในการชินเตอร์ โดยตัดชิ้นส่วนต่างๆ และแสดงถึงความหนาแน่นบัลค์และความพรุนตัวของส่วนต่างๆ ในชั้นที่ 22 ดังตารางที่ 30



รูปที่ 45 การตัดและกำหนดหมายเลข

ตารางที่ 30 แสดงความหนาแน่นบัลค์ และความพรุนตัวของชั้นงานหลังชินเตอร์ ในส่วนต่างๆ

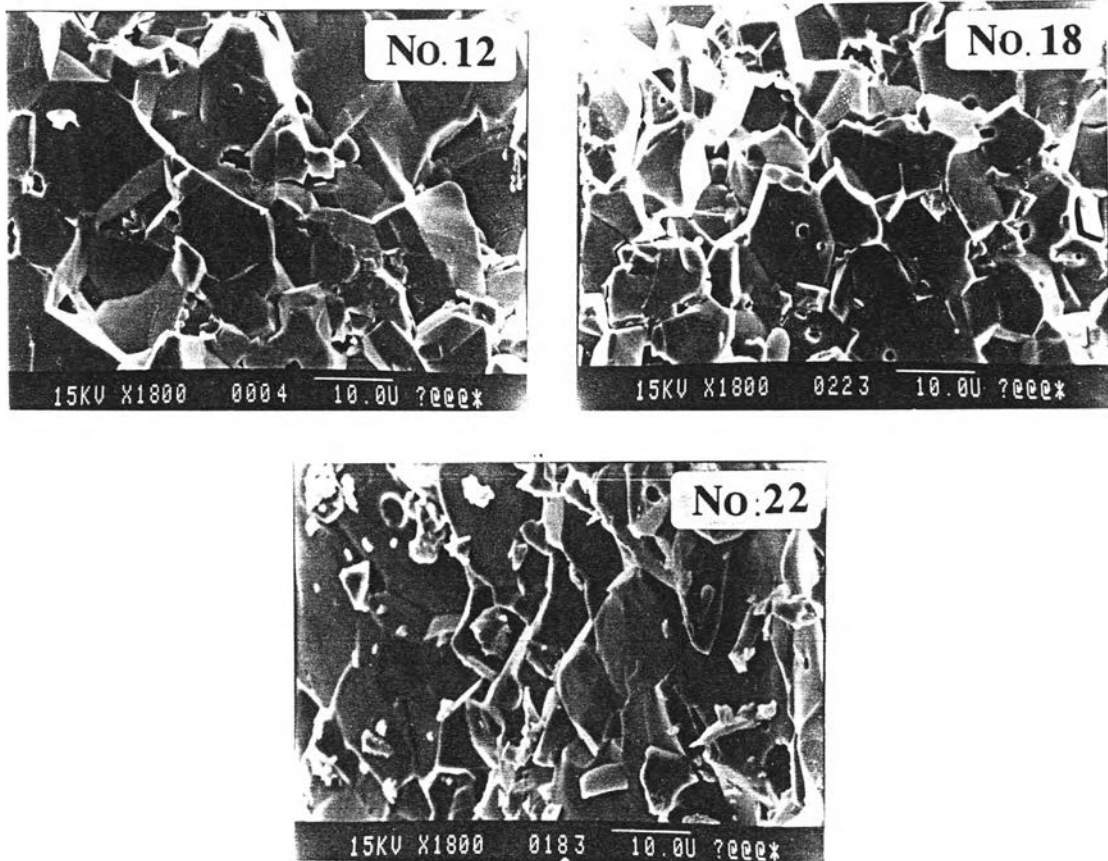
ชั้นที่	ความหนาแน่นบัลค์ (กรัม/ซ.ม. ³)	ความพรุนตัว (%)
22-1	4.69	0.15
22-2	4.61	0.11
22-3	4.57	0.39
22-4	4.55	0.50
22-5	4.68	0.17
22-6	4.69	0.09



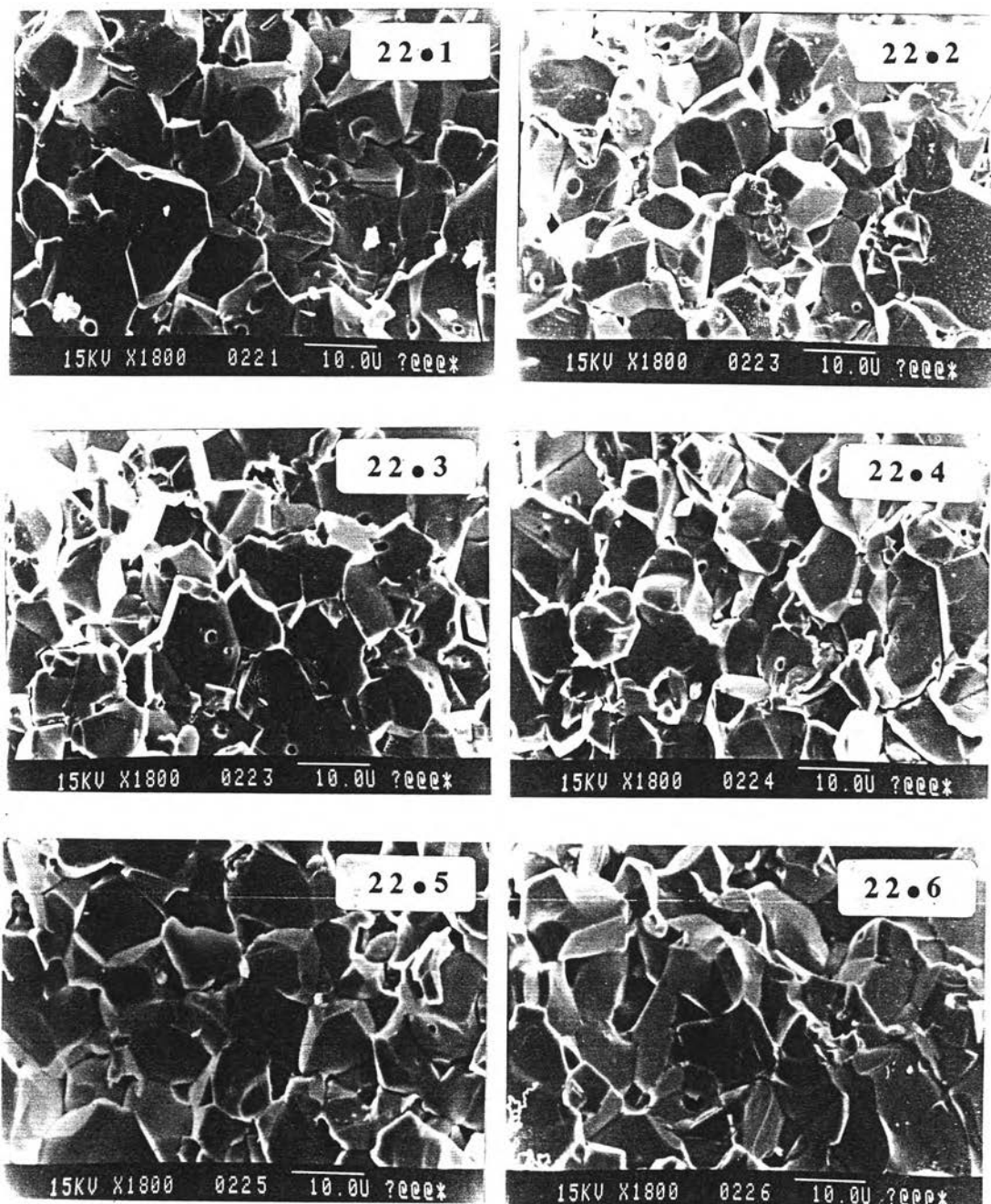
จากการตรวจความหนาแน่นบัลค์พบว่าส่วนกลาง(22-4) มีความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ 4.55 กรัม/ซ.ม.³ ขณะที่ส่วนบนและส่วนล่างมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน คือ 4.61-4.69 กรัม/ซ.ม.³

2. โครงสร้างจุลภาค

ใช้สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป หาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ชั้นที่ 12, 18 และ 22 (1300, 1330 และ 1280 องศาเซลเซียส) และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 46-47 และตารางที่ 31 พบว่าขนาดเกรนชั้นที่ 18 ใหญ่กว่าชั้นที่ 12 และใหญ่กว่าชั้นที่ 22 ส่วนขนาดโพรงอากาศชั้นที่ 18 เล็กกว่าชั้นที่ 12 และเล็กกว่าชั้นที่ 22



รูปที่ 46 โครงสร้างจุลภาคของชั้นที่ 12, 18, 22 (ตำแหน่งเดียวกัน อุณหภูมิการเผา 1300, 1330 และ 1280 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 47 โครงสร้างจุลภาคของชั้นที่ 22 ตำแหน่ง 1 ถึง 6

ตารางที่ 31 ขนาดเกรนและขนาดโพรงอากาศของชั้นงาน

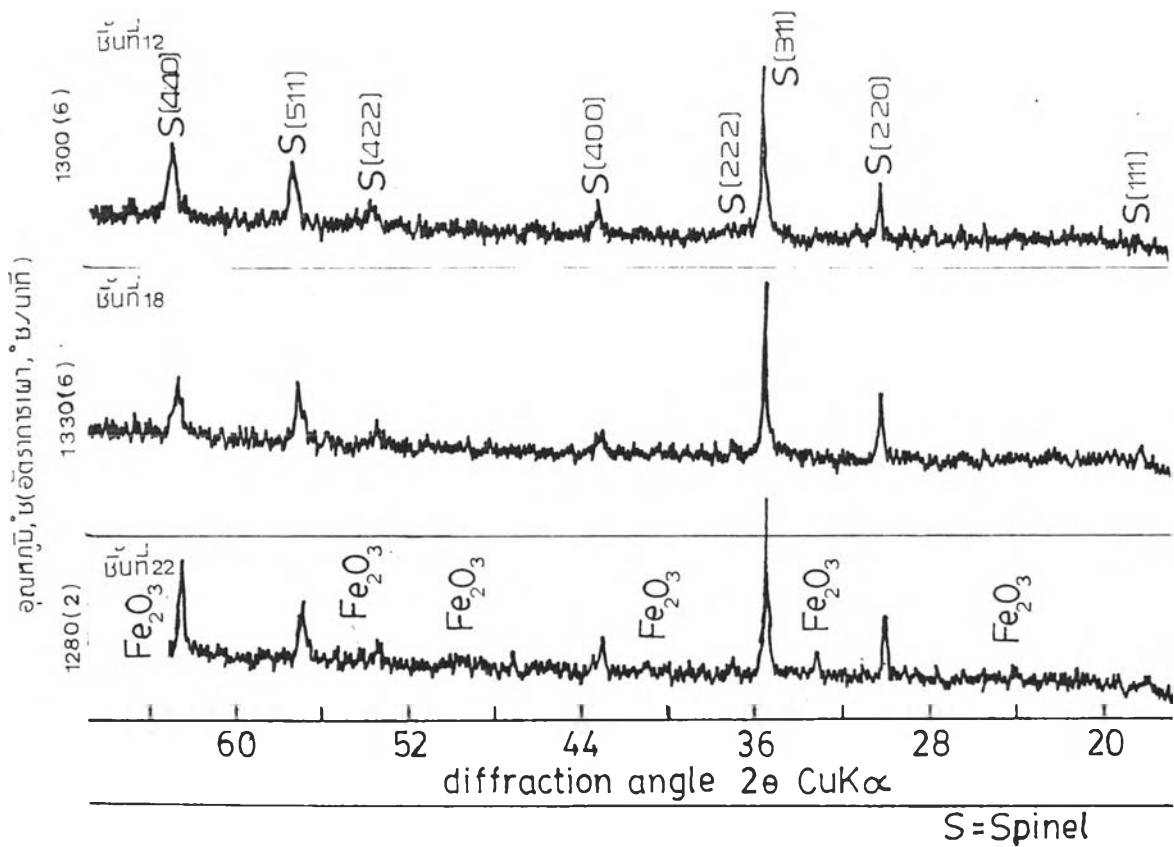
ชั้นที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ขนาดเกรนโดยประมาณ (ไมครอน)	ขนาดโพรงอากาศ (ไมครอน)
12	1300	4-20	<3
18	1330	4-20	2-4
22	1280	4-12	<3
22.1	1280	6-10	<3
22.2	1280	6-10	<3
22.3	1280	6-10	<3
22.4	1280	4-10	<4
22.5	1280	6-10	<3
22.6	1280	6-10	<3

จากตารางที่ 31 ในการศึกษาขนาดเกรนโดยประมาณจากภาพโครงสร้างจลภาค รูปที่ 46 พบว่าตัวอย่างการขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300 และ 1330 องศาเซลเซียสไม่มี ความแตกต่างของขนาดเกรนมากนัก แต่เห็นได้ชัดว่าเมื่อขึ้นเตอร์ที่ 1280 องศาเซลเซียส ชั้นงานมีขนาดเกรนเล็กกว่า

ในการศึกษาชั้นงานเดียวกันแต่ตำแหน่งต่างกันของรูปที่ 47 พบว่าขนาดเกรนเหมือนกันหมด ยกเว้นชั้นที่ 22.4 มีขนาดเกรนเล็กสุด

3. เฟส

การตรวจเฟสที่ปรากฏในงาน(ชั้นที่ 12,18,22) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่ 1300, 1330 และ 1280 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 48 พบว่าชั้นที่ 12 และ 22 ซึ่งซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1330 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างเป็นแบบสปินเนล เป็นเฟสของแมกนีเซียมซิงค์เหล็กออกไซด์(zinc magnesium iron oxide solid solution) ร่วมกับเหล็กออกไซด์(iron oxide) ส่วนชั้นที่ 18 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1330 องศาเซลเซียสจะไม่พบเหล็กออกไซด์ พบแต่เฟสสปินเนลเพียงอย่างเดียว เพราะซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 48 แพทเทิร์นเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟลกชันของการซินเตอร์ทั้ง 3 แบบ