

## ภาคผนวก

ภาคผนวกที่ 1 เปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกและไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้น  
 ตารางที่ ผ.1.1 สมบัติของชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพอร์นที่เกิดและไม่เกิดวิสเคอร์ดีบุกที่อุณหภูมิอบ  
 ผนึก 200 องศาเซลเซียส

Tin Whisker	Pressure (psi)	Composite Content (%)	Porosity (%)	Permeability coefficient		Average pore size diameter (microns)	Shear strength (MPa)
				min.(m <sup>2</sup> )	max.(m <sup>2</sup> )		
Whisker formed	500	2	23.02	2.79x10 <sup>-12</sup>	3.48 x10 <sup>-12</sup>	2.0-2.2	1.2-1.9
		4	20.05	2.33 x10 <sup>-12</sup>	2.98 x10 <sup>-12</sup>	1.9-2.1	1.4-1.7
		6	16.34	2.21 x10 <sup>-12</sup>	2.39 x10 <sup>-12</sup>	2.0-2.2	1.3-1.9
		8	12.79	2.01 x10 <sup>-12</sup>	2.11 x10 <sup>-12</sup>	2.2-2.3	1.4-1.7
		10	8.86	1.84 x10 <sup>-12</sup>	2.32 x10 <sup>-12</sup>	2.6-2.9	1.3-1.5
	1000	2	22.84	1.04 x10 <sup>-12</sup>	1.21 x10 <sup>-12</sup>	1.2-1.3	3.5-3.9
		4	19.67	1.26 x10 <sup>-12</sup>	1.49 x10 <sup>-12</sup>	1.4-1.6	3.6-4.2
		6	16.45	0.79 x10 <sup>-12</sup>	0.88 x10 <sup>-12</sup>	1.2-1.3	3.8-4.5
		8	12.78	0.77 x10 <sup>-12</sup>	0.86 x10 <sup>-12</sup>	1.3-1.5	3.6-5.0
		10	8.78	0.77 x10 <sup>-12</sup>	0.80 x10 <sup>-12</sup>	1.6-1.7	4.0-4.5
Whisker free	500	2	22.98	2.54 x10 <sup>-12</sup>	2.91 x10 <sup>-12</sup>	1.9-2.0	1.85-1.87
		4	19.74	1.52 x10 <sup>-12</sup>	1.61 x10 <sup>-12</sup>	1.57-1.61	1.9-2.0
		6	16.59	0.99 x10 <sup>-12</sup>	1.00 x10 <sup>-12</sup>	1.38-1.39	1.8-2.0
		8	12.99	0.90 x10 <sup>-12</sup>	0.91 x10 <sup>-12</sup>	1.49-1.50	1.95-2.0
		10	9.09	0.76 x10 <sup>-12</sup>	0.78 x10 <sup>-12</sup>	1.6-1.7	2.0-2.1
	1000	2	22.79	1.12 x10 <sup>-12</sup>	1.12 x10 <sup>-12</sup>	1.2	3.0-3.1
		4	19.68	0.90 x10 <sup>-12</sup>	1.04 x10 <sup>-12</sup>	1.2-1.3	2.4-2.7
		6	17.15	0.68 x10 <sup>-12</sup>	0.68 x10 <sup>-12</sup>	1.1	2.5-2.8
		8	12.99	0.65 x10 <sup>-12</sup>	1.56 x10 <sup>-12</sup>	1.2-1.9	2.2-2.5
		10	9.16	0.56 x10 <sup>-12</sup>	0.97 x10 <sup>-12</sup>	1.4-1.8	2.6-2.7

ตารางที่ ๗1.2 สมบัติของชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพอร์ซเลนที่เกิด-ไม่เกิดวิสเคอร์ดีบุกที่อุณหภูมิอบผืนึก 220 องศาเซลเซียส

Tin Whisker	Pressure (psi)	Composite Content. (%)	Porosity (%)	Permeability coefficient		Average pore size diameter (microns)	Shear strength (MPa)
				min.(m <sup>2</sup> )	max.(m <sup>2</sup> )		
Whisker formed	500	2	23.28	$2.76 \times 10^{-12}$	$3.35 \times 10^{-12}$	1.83-2.13	2.74-3.04
		4	20.19	$2.39 \times 10^{-12}$	$2.51 \times 10^{-12}$	1.94-1.98	4.01-4.20
		6	17.81	$2.26 \times 10^{-12}$	$3.17 \times 10^{-12}$	1.99-2.45	5.24-5.31
		8	14.09	$2.48 \times 10^{-12}$	$3.44 \times 10^{-12}$	2.29-2.90	5.05-6.55
		10	10.91	$1.96 \times 10^{-12}$	$1.96 \times 10^{-12}$	2.29-2.30	1.55-5.34
	1000	2	23.43	$1.18 \times 10^{-12}$	$1.30 \times 10^{-12}$	1.26-1.34	5.42-8.01
		4	20.10	$1.82 \times 10^{-12}$	$2.11 \times 10^{-12}$	1.68-1.85	4.04-5.51
		6	16.86	$1.42 \times 10^{-12}$	$1.47 \times 10^{-12}$	1.61-1.71	3.81-4.32
		8	14.02	$1.52 \times 10^{-12}$	$1.68 \times 10^{-12}$	1.79-1.96	3.44-4.53
		10	9.45	$1.44 \times 10^{-12}$	$1.52 \times 10^{-12}$	2.11-2.38	3.97-4.03
Whisker free	500	2	22.73	$4.02 \times 10^{-12}$	$7.14 \times 10^{-12}$	2.38-3.17	1.91-2.33
		4	19.90	$0.94 \times 10^{-12}$	$0.96 \times 10^{-12}$	1.23-1.24	2.17-2.21
		6	16.54	$0.79 \times 10^{-12}$	$1.36 \times 10^{-12}$	1.24-1.62	1.44-2.01
		8	12.85	$0.66 \times 10^{-12}$	$0.86 \times 10^{-12}$	1.28-1.46	1.48-2.44
		10	9.29	$0.69 \times 10^{-12}$	$0.75 \times 10^{-12}$	1.54-1.61	1.52-2.72
	1000	2	23.66	$1.49 \times 10^{-12}$	$1.71 \times 10^{-12}$	1.42-1.52	3.85
		4	19.61	$1.10 \times 10^{-12}$	$1.24 \times 10^{-12}$	1.34-1.42	2.87-3.53
		6	16.10	$0.97 \times 10^{-12}$	$1.52 \times 10^{-12}$	1.39-1.74	2.88-3.28
		8	12.49	$1.02 \times 10^{-12}$	$1.34 \times 10^{-12}$	1.61-1.85	3.09-3.32
		10	8.42	$0.79 \times 10^{-12}$	$0.98 \times 10^{-12}$	1.73-1.93	3.26-3.55

## ภาคผนวกที่ 2 ตารางข้อมูลคืบชั้นงานมีวิสเคอร์ตีบูก

### \* หมายเหตุ

Ratio	= ปริมาณวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เติม (%)
P	= ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป
$\emptyset$	= เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน
e	= ความหนาชิ้นงาน
W	= น้ำหนักชิ้นงาน
Temp.	= อุณหภูมิอบผนีก
$\rho_a$	= ความหนาแน่นปรากฏ
$\rho_{inc}$	= ความหนาแน่นจริง

รูปที่ 1

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
			Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0	500	25.2	3.7	1.85E-06	10	200	25.2	3.7	1.8E-06	9.9982
2	2		25.2	3.7	1.85E-06	9.9631		25.2	3.65	1.8E-06	9.9507
3	4		25.2	3.8	1.9E-06	9.9507		25.2	3.75	1.9E-06	9.95
4	6		25.2	3.8	1.9E-06	9.9748		25.2	3.8	1.9E-06	9.8485
5	8		25.2	3.8	1.9E-06	9.9877		25.2	3.75	1.9E-06	9.9849
6	10		25.2	3.9	1.95E-06	9.9861		25.2	3.8	1.9E-06	9.9138
7	0	500	25.2	3.9	1.95E-06	10.0113	220	25.2	3.85	1.9E-06	10.06
8	2		25.2	3.8	1.9E-06	9.994		25.2	3.8	1.9E-06	10.0427
9	4		25.2	3.7	1.85E-06	9.9817		25.2	3.7	1.8E-06	9.9275
10	6		25.2	3.7	1.85E-06	9.9895		25.2	3.7	1.8E-06	9.9501
11	8		25.2	3.85	1.92E-06	9.9926		25.2	3.85	1.9E-06	9.9904
12	10		25.2	3.8	1.9E-06	9.9682		25.2	3.8	1.9E-06	9.9414
13	0	1000	25.2	3.3	1.65E-06	10.0135	200	25.2	3.3	1.6E-06	9.8642
14	2		25.2	3.25	1.62E-06	10.033		25.2	3.25	1.6E-06	9.5138
15	4		25.2	3.3	1.65E-06	9.9884		25.2	3.25	1.6E-06	9.4144
16	6		25.2	3.4	1.7E-06	9.9632		25.2	3.39	1.7E-06	9.8533
17	8		25.2	3.5	1.75E-06	9.9835		25.2	3.5	1.7E-06	9.8245
18	10		25.2	3.3	1.65E-06	9.988		25.2	3.35	1.7E-06	9.0943
19	0	1000	25.2	3.45	1.72E-06	10.0073	220	25.2	3.45	1.7E-06	10.0045
20	2		25.2	3.4	1.7E-06	9.948		25.2	3.4	1.7E-06	9.955
21	4		25.2	3.5	1.75E-06	9.9987		25.2	3.5	1.7E-06	9.0224
22	6		25.2	3.3	1.65E-06	10.0033		25.2	3.3	1.6E-06	9.0404
23	8		25.2	3.3	1.65E-06	9.9962		25.2	3.3	1.6E-06	9.0438
24	10		25.2	3.3	1.65E-06	10.0091		25.2	3.3	1.6E-06	9.0635

รูปที่ 2

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
			Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0	500	25.2	3.7	1.85E-06	10.0015	200	25.2	3.7	1.8E-06	9.5982
2	2		25.2	3.8	1.9E-06	10.0037		25.2	3.8	1.9E-06	9.9707
3	4		25.2	3.85	1.92E-06	9.9855		25.2	3.85	1.9E-06	9.9668
4	6		25.2	3.8	1.9E-06	9.9159		25.2	3.8	1.9E-06	10.0344
5	8		25.2	3.8	1.9E-06	9.8958		25.2	3.9	1.9E-06	10.0218
6	10		25.2	3.95	1.97E-06	9.9102		25.2	3.95	2E-06	10.03
7	0	500	25.2	3.95	1.97E-06	9.8	220	25.3	3.9	2E-06	10.0817
8	2		25.2	3.7	1.85E-06	9.91		25.4	3.75	1.9E-06	10.0427
9	4		25.2	3.75	1.87E-06	9.892		25.3	3.75	1.9E-06	10.0025
10	6		25.2	3.8	1.9E-06	9.946		25.4	3.8	1.9E-06	9.9501
11	8		25.2	3.8	1.9E-06	10.04		25.5	3.7	1.9E-06	9.5904
12	10		25.2	4	2E-06	9.9568		25.6	4	2.1E-06	10.0117
13	0	1000	25.2	3.4	1.7E-06	10	200	25.3	3.35	1.7E-06	9.012
14	2		25.2	3.3	1.65E-06	9.999		25.3	3.3	1.7E-06	9.0138
15	4		25.2	3.25	1.62E-06	9.993		25.2	3.3	1.6E-06	9.0144
16	6		25.2	3.3	1.65E-06	9.9846		25.2	3.3	1.6E-06	9.0094
17	8		25.2	3.4	1.7E-06	9.9606		25.2	3.4	1.7E-06	9.0245
18	10		25.2	3.3	1.65E-06	9.9889		25.2	3.3	1.6E-06	9.0396
19	0	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9955	220	25.4	3.4	1.7E-06	9.595
20	2		25.2	3.4	1.7E-06	10.0074		25.4	3.3	1.7E-06	9.417
21	4		25.2	3.3	1.65E-06	9.9935		25.4	3.3	1.7E-06	9.1161
22	6		25.2	3.4	1.7E-06	10.0046		25.4	3.45	1.7E-06	9.8378
23	8		25.2	3.4	1.7E-06	9.9929		25.5	3.45	1.8E-06	9.6357
24	10		25.2	3.4	1.7E-06	9.9707		25.4	3.4	1.7E-06	9.4247

ชุดที่ 3

NO.	Composite		Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
	Addition (%)	P (psi)	Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0		-	-	-	-		-	-	-	-
2	2		25.2	4	2E-06	10.0037		25.2	3.9	1.9E-06	9.9707
3	4	500	25.2	4	1.9E-06	9.9855	200	25.2	3.9	1.9E-06	9.9668
4	6		25.2	3.8	1.95E-06	9.9159		25.2	3.8	1.9E-06	10.0344
5	8		25.2	3.9	2E-06	9.8958		25.2	3.8	1.9E-06	10.0218
6	10		25.2	4	1.85E-06	9.9102		25.2	3.9	1.9E-06	10.03
7	0		25.2	3.7	1.9E-06	9.8		25.3	3.6	1.8E-06	9.8017
8	2		25.2	3.8	1.9E-06	9.91		25.4	3.7	1.9E-06	9.9027
9	4	500	25.2	3.8	1.9E-06	9.892	220	25.3	3.8	1.9E-06	9.9752
10	6		25.2	4	2E-06	9.946		25.4	4	2E-06	9.9012
11	8		-	-	-	-		-	-	-	-
12	10		25.2	4	2E-06	9.9568		25.6	4	2.1E-06	10.0117
13	0		25.2	3.4	1.7E-06	10.0245		25.2	3.3	1.6E-06	10.0345
14	2		-	-	-	-		-	-	-	-
15	4	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.993	200	25.2	3.4	1.7E-06	10.0144
16	6		25.2	3.4	1.7E-06	9.9846		25.2	3.4	1.7E-06	10.0094
17	8		25.2	3.5	1.75E-06	9.9606		25.2	3.5	1.7E-06	10.0245
18	10		25.2	3.5	1.75E-06	9.9889		25.2	3.5	1.7E-06	10.0396
19	0		25.2	3.5	1.75E-06	9.9955		25.4	3.5	1.8E-06	9.995
20	2		25.2	3.5	1.75E-06	10.0074		25.4	3.5	1.8E-06	10.017
21	4	1000	-	-	-	-	220	-	-	-	-
22	6		-	-	-	-		-	-	-	-
23	8		25.2	3.5	1.75E-06	9.9929		25.5	3.5	1.8E-06	10.0357
24	10		-	-	-	-		-	-	-	-

ภาคผนวกที่ 3 ตารางข้อมูลคืบขึ้นงาน ไม่มีมีวิสเซอร์คืบูก

ชุดที่ 1

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
			Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0	500	25.2	3.8	1.9E-06	9.9985	200	25.2	3.75	1.9E-06	9.9975
2	2		25.2	3.8	1.9E-06	9.9735		25.2	3.8	1.9E-06	9.976
3	4		25.2	3.8	1.9E-06	9.9977		25.2	3.8	1.9E-06	10.0056
4	6		25.2	3.75	1.87E-06	9.98		25.2	3.75	1.9E-06	9.9925
5	8		25.2	3.6	1.8E-06	9.9706		25.2	3.6	1.8E-06	9.9997
6	10		25.2	3.75	1.87E-06	9.9809		25.2	3.75	1.9E-06	10.006
7	0	500	25.2	3.7	1.85E-06	10.006	220	25.2	3.7	1.8E-06	10.0075
8	2		25.2	3.8	1.9E-06	10.001		25.2	3.8	1.9E-06	10.0086
9	4		25.2	3.7	1.85E-06	9.9735		25.2	3.7	1.8E-06	9.9858
10	6		25.2	3.7	1.85E-06	9.977		25.2	3.7	1.8E-06	9.9987
11	8		25.2	3.7	1.85E-06	9.9983		25.2	3.7	1.8E-06	10.0163
12	10		25.2	3.8	1.9E-06	9.9547		25.2	3.8	1.9E-06	9.9836
13	0	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9453	200	25.2	3.4	1.7E-06	9.4053
14	2		25.2	3.15	1.57E-06	9.9968		25.2	3.15	1.6E-06	9.0145
15	4		25.2	3.5	1.75E-06	10.0032		25.2	3.5	1.7E-06	9.9281
16	6		25.2	3.35	1.67E-06	9.9105		25.2	3.35	1.7E-06	9.46
17	8		25.2	3.4	1.7E-06	9.9801		25.2	3.4	1.7E-06	9.2211
18	10		25.2	3.5	1.75E-06	9.9723		25.2	3.5	1.7E-06	9.4
19	0	1000	25.2	3.45	1.72E-06	10.0045	220	25.2	3.45	1.7E-06	9.7592
20	2		25.2	3.6	1.8E-06	9.993		25.2	3.6	1.8E-06	9.8891
21	4		25.2	3.45	1.72E-06	9.984		25.2	3.45	1.7E-06	9.7223
22	6		25.2	3.45	1.72E-06	9.992		25.2	3.45	1.7E-06	9.552
23	8		25.2	3.25	1.62E-06	9.9685		25.2	3.25	1.6E-06	9.0575
24	10		25.2	3.5	1.75E-06	9.9909		25.2	3.5	1.7E-06	9.5793

## ชุดที่ 2

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
			Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0	500	25.2	3.8	1.9E-06	9.9985	200	25.2	3.7	1.8E-06	9.9975
2	2	500	25.2	3.9	1.95E-06	9.9735		25.2	3.8	1.9E-06	9.976
3	4	500	25.2	4.2	2.1E-06	9.9977		25.2	4.2	2.1E-06	10.0385
4	6	500	25.2	4	2E-06	9.98		25.2	4	2E-06	9.9925
5	8	500	25.2	4	2E-06	9.9706		25.2	3.9	1.9E-06	9.9997
6	10	500	25.2	4.25	2.12E-06	9.9809		25.2	4.2	2.1E-06	10.006
7	0	500	25.2	3.7	1.85E-06	10.006	220	25.2	3.7	1.8E-06	10.0075
8	2	500	25.2	3.8	1.9E-06	10.001		25.2	3.8	1.9E-06	10.0086
9	4	500	25.2	3.7	1.85E-06	9.9735		25.2	3.7	1.8E-06	9.9858
10	6	500	25.2	3.9	1.95E-06	9.977		25.2	3.9	1.9E-06	9.9987
11	8	500	25.2	3.8	1.9E-06	9.9983		25.2	3.7	1.8E-06	10.0163
12	10	500	25.2	3.8	1.9E-06	9.9547		25.2	3.8	1.9E-06	9.9836
13	0	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9453	200	25.2	3.4	1.7E-06	9.9445
14	2	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9968		25.2	3.4	1.7E-06	10.0012
15	4	1000	25.2	3.45	1.72E-06	10.0032		25.2	3.45	1.7E-06	10.0135
16	6	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9105		25.2	3.4	1.7E-06	9.9254
17	8	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9801		25.2	3.4	1.7E-06	10.0006
18	10	1000	25.2	3.65	1.82E-06	9.9723		25.2	3.65	1.8E-06	9.9975
19	0	1000	25.2	3.45	1.72E-06	10.0045	220	25.2	3.45	1.7E-06	10.0592
20	2	1000	25.2	3.6	1.8E-06	9.993		25.2	3.6	1.8E-06	9.8891
21	4	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.984		25.2	3.4	1.7E-06	10.0223
22	6	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.992		25.2	3.4	1.7E-06	10.052
23	8	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9685		25.2	3.4	1.7E-06	9.9575
24	10	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9909		25.2	3.4	1.7E-06	9.7793



ภาคผนวกที่ 4 ตารางข้อมูลค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของชิ้นงาน ไม่มีวิสเตอร์คีนุก  
ชุดที่ 1

NO.	Composite Addition (%)	$\rho_s$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{the}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_s / \rho_{the}$	% Pore (%)
1	0	5.42	7.28	0.74	25.61
2	2	5.46	7.02	0.78	22.13
3	4	5.32	6.75	0.79	21.25
4	6	5.19	6.49	0.80	19.95
5	8	5.34	6.23	0.86	14.28
6	10	5.23	5.96	0.88	12.29
7	0	5.24	7.28	0.72	28.07
8	2	5.30	7.02	0.75	24.51
9	4	5.38	6.75	0.80	20.37
10	6	5.39	6.49	0.83	16.94
11	8	5.21	6.23	0.84	16.46
12	10	5.24	5.96	0.88	12.05
13	0	6.00	7.28	0.82	17.71
14	2	5.87	7.02	0.84	16.38
15	4	5.80	6.75	0.86	14.03
16	6	5.83	6.49	0.90	10.23
17	8	5.63	6.23	0.90	9.63
18	10	5.44	5.96	0.91	8.74
19	0	5.81	7.28	0.80	20.17
20	2	5.87	7.02	0.84	16.37
21	4	5.17	6.75	0.77	23.49
22	6	5.49	6.49	0.85	15.39
23	8	5.49	6.23	0.88	11.77
24	10	5.50	5.96	0.92	7.67

## ชุดที่ 2

NO.	Composite Addition (%)	$\rho_s$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{inc}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_s / \rho_s$	% Pore (%)
1	0	5.12	7.28	0.70	28.58
2	2	5.26	7.02	0.75	25.06
3	4	5.19	6.75	0.77	23.17
4	6	5.29	6.49	0.82	18.44
5	8	5.15	6.23	0.83	17.27
6	10	5.09	5.96	0.85	14.64
7	0	5.14	7.28	0.71	29.40
8	2	5.28	7.02	0.75	24.70
9	4	5.30	6.75	0.79	21.46
10	6	5.16	6.49	<u>0.80</u>	20.40
11	8	5.07	6.23	0.81	18.50
12	10	4.86	5.96	0.82	18.47
13	0	5.35	7.28	0.73	26.53
14	2	5.45	7.00	0.78	22.29
15	4	5.47	6.75	0.81	18.93
16	6	5.47	6.49	0.84	15.68
17	8	5.32	6.23	0.85	14.55
18	10	5.49	5.96	0.92	7.91
19	0	5.59	7.28	0.77	23.23
20	2	5.65	7.02	0.80	19.45
21	4	5.47	6.75	0.81	18.98
22	6	5.63	6.49	0.87	13.31
23	8	5.47	6.23	0.88	12.19
24	10	5.48	5.96	0.92	8.27

## ชุดที่ 3

NO.	Composite Addition (%)	$\rho_s$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{the}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_s / \rho_s$	% Pore (%)
1	-	-	-	-	-
2	2	5.12	7.02	0.73	26.97
3	4	5.12	6.75	0.76	24.16
4	6	5.29	6.49	0.82	18.44
5	8	5.29	6.23	0.85	15.09
6	10	5.15	5.96	0.86	13.54
7	0	5.41	7.28	0.74	25.64
8	2	5.28	7.02	0.75	24.75
9	4	5.22	6.75	0.77	22.70
10	6	4.88	6.49	0.75	24.75
11	-	-	6.23	-	-
12	10	4.86	5.96	0.82	18.46
13	0	6.09	7.28	0.84	16.29
14	-	-	7.02	-	-
15	4	5.90	6.75	0.87	12.58
16	6	5.90	6.49	0.91	9.07
17	8	5.74	6.23	0.92	7.79
18	10	5.75	5.96	0.96	3.57
19	0	5.66	7.28	0.78	22.31
20	2	5.67	7.02	0.81	19.21
21	-	-	6.75	-	-
22	-	-	6.49	-	-
23	8	5.61	6.23	0.90	9.85
24	-	-	-	0.88	-

ภาคผนวกที่ 5 ตารางข้อมูลค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของชิ้นงานมีไม้มิวสเคอร์ดีบุก  
ชุดที่ 1

NO.	Composite Addition (%)	$\rho_s$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{the}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_s / \rho_s$	% Pore (%)
1	0	5.34	7.28	0.73	26.61
2	2	5.26	7.02	0.75	25.01
3	4	5.278	6.75	0.78	21.85
4	6	5.345	6.49	0.82	17.70
5	8	5.57	6.23	0.89	10.57
6	10	5.35	5.96	0.90	10.30
7	0	5.42	7.28	0.74	25.54
8	2	5.28	7.02	<u>0.75</u>	24.77
9	4	5.41	6.75	0.80	19.90
10	6	5.41	6.49	0.83	16.54
11	8	5.43	6.23	0.87	12.85
12	10	5.27	5.96	0.88	11.68
13	0	5.54	7.28	0.76	23.85
14	2	5.74	7.02	0.82	18.26
15	4	5.69	6.75	0.84	15.81
16	6	5.66	6.49	0.87	12.78
17	8	5.447	6.23	0.87	12.69
18	10	5.38	5.96	0.90	9.71
19	0	5.67	7.28	0.78	22.13
20	2	5.51	7.02	0.78	21.53
21	4	5.65	6.75	0.84	16.36
22	6	5.55	6.49	0.86	14.49
23	8	5.59	6.23	0.90	10.28
24	10	5.49	5.96	0.92	7.99

## ชุดที่ 2

NO.	Composite Addition (%)	$\rho_s$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{true}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_s / \rho_s$	% Pore (%)
1	0	5.42	7.28	0.74	25.61
2	2	5.26	7.02	0.75	25.01
3	4	4.79	6.75	0.71	29.06
4	6	5.01	6.49	0.77	22.84
5	8	5.14	6.23	0.83	17.45
6	10	4.77	5.96	0.80	19.91
7	0	5.42	7.28	0.74	25.54
8	2	5.28	7.02	0.75	24.77
9	4	5.41	6.75	0.80	19.90
10	6	5.14	6.49	<u>0.79</u>	20.82
11	8	5.43	6.23	0.87	12.85
12	10	5.27	5.96	0.88	11.68
13	0	5.86	7.28	0.80	19.48
14	2	5.90	7.02	0.84	15.98
15	4	5.82	6.75	0.86	13.86
16	6	5.85	6.49	0.90	9.84
17	8	5.89	6.23	0.95	5.319
18	10	5.49	5.96	0.92	7.92
19	0	5.84	7.28	0.80	19.73
20	2	5.51	7.02	0.78	21.53
21	4	5.91	6.75	0.88	12.51
22	6	5.93	6.49	0.91	8.69
23	8	5.90	6.23	0.95	5.71
24	10	5.76	5.96	0.97	3.31

## ภาคผนวกที่ 6 ตารางข้อมูลของรูปต่าง ๆ

## ก. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.9

NO.	Composite Addition (%)	$\rho_s$			Average value $g/(cm^3)$
		Sample 1 $g/(cm^3)$	Sample 2 $g/(cm^3)$	Sample 3 $g/(cm^3)$	
1	0	5.42	5.20	-	5.37
2	2	5.46	5.265	5.12	5.24
3	4	5.328	5.19	5.12	5.34
4	6	5.19	5.29	5.29	5.28
5	8	5.3	5.15	5.29	5.22
6	10	5.23	5.09	5.15	5.32
7	0	5.24	5.14	5.41	5.36
8	2	5.30	5.28	5.28	5.37
9	4	5.38	5.30	5.22	5.21
10	6	5.39	5.17	4.88	5.17
11	8	5.20	5.07	-	5.12
12	10	5.24	4.86	4.86	5.44
13	0	5.99	5.35	6.09	5.92
14	2	5.87	5.45	-	6.01
15	4	5.80	5.47	5.90	6.11
16	6	5.83	5.47	5.90	6.05
17	8	5.63	5.32	5.74	5.97
18	10	5.44	5.49	5.75	5.98
19	0	5.81	5.59	5.66	6.16
20	2	5.87	5.65	5.67	5.94
21	4	5.17	5.47	-	5.75
22	6	5.49	5.63	-	5.93
23	8	5.49	5.47	5.61	5.81
24	10	5.50	5.47	-	5.67

ข. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.11

NO.	Composite	Porosity(%)			Average value
	Addition (%)	Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	25.60	25.60	-	25.60
2	2	23.02	23.02	23.02	23.02
3	4	20.05	20.05	20.05	20.05
4	6	16.54	16.23	16.23	16.34
5	8	12.79	12.79	12.79	12.79
6	10	8.86	8.86	8.86	8.86
7	0	24.98	25.57	25.57	25.38
8	2	22.46	23.68	23.68	23.28
9	4	19.76	20.39	20.39	20.18
10	6	16.94	18.24	18.24	17.80
11	8	13.072	15.10	-	14.08
12	10	9.03	11.85	11.85	10.91
13	0	25.50	26.09	25.33	25.64
14	2	22.69	22.99	-	22.84
15	4	19.66	19.66	19.66	19.66
16	6	16.44	16.44	16.44	16.45
17	8	12.77	12.77	12.77	12.77
18	10	8.78	8.78	8.78	8.78
19	0	25.56	26.50	26.51	26.19
20	2	23.14	23.58	23.58	23.43
21	4	19.60	20.60	-	20.10
22	6	16.18	17.52	-	16.85
23	8	12.60	14.72	14.72	14.01
24	10	8.56	10.34	-	9.45

## ก. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.12

NO.	Composite Addition (%)	Permeability coefficient ( $\times 10^{12} \text{ m}^2$ )			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	3.30	3.86	-	3.58
2	2	2.79	3.48	3.21	3.16
3	4	2.51	2.33	2.99	2.61
4	6	2.40	2.21	2.26	2.29
5	8	2.11	2.01	2.04	2.05
6	10	1.85	1.84	2.32	2.00
7	0	4.96	4.52	4.82	4.77
8	2	2.76	3.35	2.48	2.86
9	4	2.39	2.51	2.40	2.43
10	6	3.17	2.26	2.26	2.56
11	8	3.44	2.48	-	2.96
12	10		1.96	1.95	1.95
13	0	1.38	1.50	1.54	1.47
14	2	1.21	1.04	-	1.13
15	4	1.51	1.26	1.50	1.43
16	6	0.79	0.88	0.82	0.83
17	8	0.78	0.87	0.79	0.81
18	10	0.80	0.77	0.78	0.78
19	0	1.35	1.58	1.41	1.45
20	2	1.30	1.18	1.18	1.22
21	4	2.11	1.82	-	1.97
22	6	1.47	1.42	-	1.45
23	8	1.52	1.68	1.49	1.56
24	10	1.52	1.44	-	1.48



ง. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.13

NO.	Composite Addition (%)	Biggest pore size diameter ( $\mu\text{m}$ )			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	71.73	72.31	-	72.02
2	2	-	77.30	72.31	74.81
3	4	-	64.05	71.17	67.61
4	6	56.75	-	50.66	53.71
5	8	49.54	-	47.44	48.49
6	10	43.32	-	42.30	42.81
7	0	-	59.78	54.68	57.23
8	2	52.75	-	46.95	49.85
9	4	56.40	53.37	57.48	55.75
10	6	55.01	57.98	-	56.50
11	8	45.06	-	47.33	46.20
12	10	42.10	45.98	46.22	44.77
13	0	35.44	27.93	-	31.69
14	2	24.84	28.29	-	26.56
15	4	32.61	33.09	-	32.85
16	6	28.83	25.62	-	27.23
17	8	-	33.97	30.92	32.44
18	10	20.71	-	22.42	21.56
19	0	27.59	-	32.85	30.22
20	2	29.21	27.76	25.55	27.50
21	4	31.03	30.19	-	30.61
22	6	25.47	29.40	-	27.44
23	8	29.79	30.05	-	29.92
24	10	29.40	29.89	-	29.64

จ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.14

NO.	Composite Addition (%)	Average pore size diameter ( $\mu\text{m}$ )			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	2.03	2.20	-	2.11
2	2	1.97	2.20	2.11	2.09
3	4	2.00	1.93	2.18	2.04
4	6	2.15	2.09	2.11	2.12
5	8	2.30	2.24	2.26	2.27
6	10	2.58	2.58	2.89	2.69
7	0	2.52	2.38	2.46	2.45
8	2	1.98	2.13	1.83	1.98
9	4	1.97	1.98	<u>1.94</u>	1.96
10	6	2.45	1.99	1.99	2.14
11	8	2.90	2.29	-	2.60
12	10	-	2.30	2.29	2.30
13	0	1.32	1.35	1.39	1.35
14	2	1.31	1.20	-	1.26
15	4	1.57	1.43	1.56	1.52
16	6	1.24	1.31	1.26	1.27
17	8	1.39	1.47	1.41	1.43
18	10	1.71	1.67	1.68	1.69
19	0	1.30	1.38	1.31	1.33
20	2	1.34	1.26	1.26	1.29
21	4	1.86	1.68	-	1.77
22	6	1.71	1.61	-	1.66
23	8	1.96	1.91	1.80	1.89
24	10	2.38	2.11	-	2.25

ฉ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.15

NO.	Composite Addition (%)	Shear strength Mpa			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	1.72	1.52	1.26	1.50
2	2	1.90	1.27	1.20	1.46
3	4	1.72	1.44	1.50	1.55
4	6	1.89	1.40	1.29	1.53
5	8	1.72	1.43	1.42	1.52
6	10	1.52	1.48	1.32	1.44
7	0	2.58	2.53	2.59	2.57
8	2	3.05	3.20	2.74	3.00
9	4	4.21	4.01	-	4.11
10	6	5.24	5.31	-	5.27
11	8	6.55	5.05	-	5.80
12	10	3.27	5.34	1.55	3.39
13	0	3.75	4.02	3.13	3.64
14	2	3.51	3.88	-	3.70
15	4	3.77	4.20	3.64	3.87
16	6	3.85	4.77	4.49	4.37
17	8	3.59	4.99	4.01	4.20
18	10	4.46	4.02	4.51	4.33
19	0	5.62	5.77	5.10	5.50
20	2	7.82	8.01	5.42	7.08
21	4	4.04	5.51	-	4.77
22	6	4.32	3.81	-	4.07
23	8	4.53	3.44	4.15	4.04
24	10	4.03	3.97	-	4.00

ข. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.17

Pressure (psi)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	SD
500	5.24	0.20
1000	6.02	0.10
1500	6.17	0.13
2000	6.43	0.07

ค. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.18

Pressure (psi)	Porosity(%)			Average value	SD
	Sample1	Sample2	Sample3		
500	23.03	23.03	23.03	23.03	0.00
1000	22.69	23.00	-	22.85	0.22
1500	10.74	13.28	-	12.01	1.80
2000	7.65	9.15	-	8.40	1.06

ง. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.19

Pressure (psi)	Permeability coefficient ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2$ )			Average value	SD
	Sample1	Sample2	Sample3		
500	2.79	3.48	3.21	3.16	0.35
1000	1.21	1.04		1.13	0.12
1500	0.55	0.56		0.56	0.01
2000	0.52	0.51		0.52	0.01

ฃ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.20

Pressure (psi)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
500	74.81	3.53
1000	26.56	2.44
1500	14.82	0.17
2000	5.95	4.21

ฃ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.21

Pressure (psi)	Average pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
500	2.09	0.12
1000	1.87	0.49
1500	1.54	0.50
2000	1.27	0.06

ฃ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.22

Pressure (psi)	Shear strength (Mpa)			average value	SD
	Sample1	Sample2	Sample3		
500	1.90	1.27	1.20	1.46	0.38
1000	3.51	3.88	-	3.70	0.26
1500	4.94	5.45	-	5.19	0.37
2000	6.10	5.85	-	5.97	0.18

๓. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.22

NO.	ratio (%)	P (psi)	Temp. (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	SD
1	0	500	200	5.37	0.23
2	2			5.24	0.20
3	4			5.34	0.05
4	6			5.29	0.01
5	8			5.22	0.12
6	10			5.32	0.24
7	0	500	220	5.37	0.09
8	2			5.37	0.19
9	4			5.21	0.27
10	6			5.18	0.01
11	8			5.12	0.22
12	10			5.44	0.61
13	0	1000	200	5.93	0.03
14	2			6.02	0.10
15	4			6.12	0.05
16	6			6.06	0.13
17	8			5.98	0.11
18	10			5.98	0.21
19	0	1000	220	6.16	0.19
20	2			5.95	0.10
21	4			5.75	0.12
22	6			5.94	0.18
23	8			5.81	0.16
24	10			5.67	0.02

๓. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.25

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Porosity (%)			Average	SD
			Sample1	Sample2	Sample3		
1	0	500	25.61	25.61	-	25.61	0.00
2	2		23.03	23.03	23.03	23.03	0.00
3	4		20.05	20.05	20.05	20.05	0.00
4	6		16.55	16.24	16.24	16.34	0.18
5	8		12.80	12.80	12.80	12.80	0.00
6	10		8.87	8.87	8.87	8.87	0.00
7	0	500	24.99	25.58	25.58	25.38	0.34
8	2		22.47	23.69	23.69	23.28	0.70
9	4		19.76	20.40	20.40	20.19	0.37
10	6		16.94	18.24	18.24	17.81	0.75
11	8		13.07	15.11	-	14.09	1.44
12	10		9.03	11.85	11.85	10.91	1.63
13	0	1000	25.51	26.09	25.34	25.65	0.40
14	2		22.69	23.00	-	22.85	0.22
15	4		19.67	19.67	19.67	19.67	0.00
16	6		16.45	16.45	16.45	16.45	0.00
17	8		12.78	12.78	12.78	12.78	0.00
18	10		8.78	8.78	8.78	8.78	0.00
19	0	1000	25.56	26.51	26.51	26.19	0.55
20	2		23.15	23.58	23.58	23.44	0.25
21	4		19.60	20.60	-	20.10	0.71
22	6		16.19	17.52	-	16.86	0.95
23	8		12.61	14.72	14.72	14.02	1.22
24	10		8.56	10.34	-	9.45	1.26

ผ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.26

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Permeability coefficient ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2$ )			Average	SD
			Sample1	Sample2	Sample3		
1	0	500	3.30	3.86	-	3.58	0.39
2	2		2.79	3.48	3.21	3.16	0.35
3	4		2.51	2.33	2.99	2.61	0.34
4	6		2.40	2.21	2.26	2.29	0.09
5	8		2.11	2.01	2.04	2.05	0.05
6	10		1.85	1.84	2.32	2.00	0.27
7	0	500	4.96	4.52	4.82	4.77	0.22
8	2		2.76	3.35	2.48	2.86	0.44
9	4		2.39	2.51	2.40	2.43	0.07
10	6		3.17	2.26	2.26	2.56	0.53
11	8		3.44	2.48	-	2.96	0.68
12	10		-	1.96	1.95	1.95	0.01
13	0	1000	1.38	1.50	1.54	1.47	0.08
14	2		1.21	1.04	-	1.13	0.12
15	4		1.51	1.26	1.50	1.43	0.14
16	6		0.79	0.88	0.82	0.83	0.05
17	8		0.78	0.87	0.79	0.81	0.05
18	10		0.80	0.77	0.78	0.78	0.02
19	0	1000	1.35	1.58	1.41	1.45	0.12
20	2		1.30	1.18	1.18	1.22	0.07
21	4		2.11	1.82	-	1.97	0.21
22	6		1.47	1.42	-	1.45	0.04
23	8		1.52	1.68	1.49	1.56	0.10
24	10		1.52	1.44	-	1.48	0.06



ณ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.27

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
1	0	500	72.02	0.41
2	2		74.81	3.53
3	4		67.61	5.03
4	6		53.71	4.31
5	8		48.49	1.48
6	10		42.81	0.72
7	0	500	57.23	3.61
8	2		49.85	4.10
9	4		55.75	2.13
10	6		56.50	2.10
11	8		46.20	1.61
12	10		44.77	2.32
13	0	1000	31.69	5.31
14	2		26.56	2.44
15	4		32.85	0.34
16	6		27.23	2.27
17	8		32.44	2.15
18	10		21.56	1.21
19	0	1000	30.22	3.72
20	2		27.50	1.84
21	4		30.61	0.59
22	6		27.44	2.78
23	8		29.92	0.19
24	10		29.64	0.35

## ค. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.28

NO.	Composite Addition	P  (psi)	Average pore size diameter	SD
	(%)		( $\mu m$ )	
1	0	500	2.11	0.12
2	2		2.09	0.12
3	4		2.04	0.13
4	6		2.12	0.03
5	8		2.27	0.03
6	10		2.69	0.18
7	0	500	2.45	0.07
8	2		1.98	0.15
9	4		1.96	0.02
10	6		2.14	0.26
11	8		2.60	0.43
12	10		2.30	0.00
13	0	1000	1.35	0.04
14	2		1.26	0.07
15	4		1.52	0.08
16	6		1.27	0.04
17	8		1.43	0.04
18	10		1.69	0.02
19	0	1000	1.33	0.05
20	2		1.29	0.04
21	4		1.77	0.12
22	6		1.66	0.07
23	8		1.89	0.08
24	10		2.25	0.19

ค. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.29

NO.	Composite	P	Shear strength	SD
	Addition			
	(%)	(psi)	(Mpa)	
1	0	500	1.50	0.23
2	2		1.46	0.38
3	4		1.55	0.15
4	6		1.53	0.32
5	8		1.52	0.17
6	10		1.44	0.11
7	0	500	2.57	0.03
8	2		3.00	0.23
9	4		4.11	0.13
10	6		5.27	0.05
11	8		5.80	1.06
12	10		3.39	1.90
13	0	1000	3.64	0.46
14	2		3.70	0.26
15	4		3.87	0.29
16	6		4.37	0.47
17	8		4.20	0.72
18	10		4.33	0.27
19	0	1000	5.50	0.35
20	2		7.08	1.44
21	4		4.77	1.04
22	6		4.07	0.36
23	8		4.04	0.55
24	10		4.00	0.04

จ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.31

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Density (g/cm <sup>3</sup> )			
			whisker formed sample	SD	whisker free sample	SD
1	0	500	5.37	0.23	5.42	0.00
2	2		5.24	0.20	5.27	0.00
3	4		5.34	0.05	5.10	0.46
4	6		5.29	0.01	5.21	0.29
5	8		5.22	0.12	5.28	0.20
6	10		5.32	0.24	5.16	0.37
7	0	500	5.37	0.09	5.28	0.00
8	2		5.37	0.19	5.19	0.24
9	4		5.21	0.27	5.38	0.05
10	6		5.18	0.01	5.15	0.19
11	8		5.12	0.22	5.43	0.00
12	10		5.44	0.61	5.19	0.43
13	0	1000	5.93	0.03	5.87	0.00
14	2		6.02	0.10	5.65	0.00
15	4		6.12	0.05	5.66	0.00
16	6		6.06	0.13	6.13	0.00
17	8		5.98	0.11	5.73	0.00
18	10		5.98	0.21	6.17	0.00
19	0	1000	6.16	0.19	5.93	0.00
20	2		5.95	0.10	5.92	0.00
21	4		5.75	0.12	5.59	0.22
22	6		5.94	0.18	5.62	0.44
23	8		5.81	0.16	5.68	0.11
24	10		5.67	0.02	5.95	0.00

บ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.32

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Porosity (%)		
			whisker formed sample	SD	whisker free sample
1	0	500	25.61	0.00	25.61
2	2		23.03	0.00	22.98
3	4		20.05	0.00	19.74
4	6		16.34	0.18	16.59
5	8		12.80	0.00	12.99
6	10		8.87	0.00	9.09
7	0	500	25.38	0.34	25.54
8	2		23.28	0.70	22.73
9	4		20.19	0.37	19.90
10	6		17.81	0.75	16.54
11	8		14.09	1.44	12.85
12	10		10.91	1.63	9.29
13	0	1000	25.65	0.40	26.01
14	2		22.85	0.22	22.79
15	4		19.67	0.00	19.68
16	6		16.45	0.00	17.15
17	8		12.78	0.00	12.98
18	10		8.78	0.00	9.16
19	0	1000	26.19	0.55	25.15
20	2		23.44	0.25	23.66
21	4		20.10	0.71	19.61
22	6		16.86	0.94	16.09
23	8		14.02	1.22	12.49
24	10		9.45	1.26	8.42

## ป. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.33

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )			
			whisker formed sample	SD	whisker free sample	SD
1	0	500	72.02	0.41	70.61	0.00
2	2		74.81	3.53	84.66	3.38
3	4		67.61	5.03	64.17	3.89
4	6		53.71	4.31	58.53	5.91
5	8		48.49	1.48	52.44	0.00
6	10		42.81	0.72	52.30	8.93
7	0	500	57.23	3.61	74.11	0.00
8	2		49.85	4.10	79.35	0.00
9	4		55.75	2.13	87.91	0.00
10	6		56.50	2.10	73.54	13.42
11	8		46.20	1.61	57.95	7.35
12	10		44.77	2.32	48.87	0.94
13	0	1000	31.69	5.31	32.02	0.00
14	2		26.56	2.44	33.60	1.07
15	4		32.85	0.34	34.36	-
16	6		27.23	2.27	31.24	0.15
17	8		32.44	2.15	31.36	0.62
18	10		21.56	1.21	28.94	0.00
19	0	1000	30.22	3.72	45.68	2.14
20	2		27.50	1.84	39.79	1.37
21	4		30.61	0.59	46.64	4.10
22	6		27.44	2.78	45.75	6.54
23	8		29.92	0.19	42.84	6.16
24	10		29.64	0.35	31.88	3.50

## ผ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.34

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Average pore size diameter ( $\mu\text{m}$ )			
			whisker formed sample	SD	whisker free sample	SD
1	0	500	2.11	0.12	2.65	0.31
2	2		2.09	0.12	1.95	0.09
3	4		2.04	0.13	1.59	0.03
4	6		2.12	0.03	1.38	0.00
5	8		2.27	0.03	1.49	0.00
6	10		2.69	0.18	1.65	0.02
7	0	500	3.29	1.18	3.29	1.18
8	2		1.98	0.15	2.77	0.56
9	4		1.96	0.02	1.24	0.01
10	6		2.14	0.26	1.43	0.27
11	8		2.60	0.43	1.37	0.13
12	10		2.30	0.00	1.57	0.05
13	0	1000	1.35	0.04	1.79	0.00
14	2		1.26	0.07	1.25	0.00
15	4		1.52	0.08	1.26	0.06
16	6		1.27	0.04	1.13	0.00
17	8		1.43	0.04	1.61	0.50
18	10		1.69	0.02	1.62	0.31
19	0	1000	1.33	0.05	1.56	0.06
20	2		1.29	0.04	1.47	0.07
21	4		1.77	0.12	1.38	0.06
22	6		1.66	0.07	1.56	0.25
23	8		1.89	0.08	1.73	0.17
24	10		2.25	0.19	1.83	0.14

ผ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.35

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Volume change (%)			
			whisker formed sample	SD	whisker free sample	SD
1	0	500	0.5	0	0	0
2	2		2	1.25	-1.28	1.81
3	4		169	2.01	0.00	0.00
4	6		5	1.48	0.00	0.00
5	8		6.5	2.79	-1.25	1.77
6	10		8	1.81	-0.59	0.83
7	0	500	0	0.00	0.00	0.00
8	2		5	2.10	0.00	0.00
9	4		171	0.46	0.00	0.00
10	6		8	0.92	0.00	0.00
11	8		9.5	0.21	-1.32	1.86
12	10		11	1.85	0.00	0.00
13	0	1000	6.5	0.00	0.00	0.00
14	2		8	0.28	0.00	0.00
15	4		339.67	1.53	0.00	0.00
16	6		11	0.17	0.00	0.00
17	8		12.5	0.87	0.00	0.00
18	10		14	0.00	0.00	0.00
19	0	1000	9.5	1.50	0.00	0.00
20	2		11	0.84	0.00	0.00
21	4		341.67	2.18	0.00	0.00
22	6		14	1.97	0.00	0.00
23	8		15.5	1.13	0.00	0.00
24	10		17	0.87	0.00	0.00



พ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.36

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Permeability coefficient ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2$ )			
			whisker formed sample		whisker free sample	
				SD		SD
1	0	500	3.58	0.39	5.66	1.34
2	2		3.16	0.35	2.73	0.26
3	4		2.61	0.34	1.57	0.06
4	6		2.29	0.09	0.99	0.00
5	8		2.05	0.05	0.90	0.01
6	10		2.00	0.27	0.77	0.02
7	0	500	9.17	6.23	9.17	6.23
8	2		2.86	0.44	5.58	2.21
9	4		2.43	0.07	0.95	0.01
10	6		2.56	0.53	1.08	0.40
11	8		2.96	0.68	0.76	0.14
12	10		1.95	0.01	0.72	0.05
13	0	1000	1.47	0.08	2.60	0.00
14	2		1.13	0.12	1.12	0.00
15	4		1.43	0.14	0.98	0.10
16	6		0.83	0.05	0.68	0.00
17	8		0.81	0.05	1.10	0.65
18	10		0.78	0.02	0.76	0.29
19	0	1000	1.45	0.12	1.92	0.14
20	2		1.22	0.07	1.60	0.15
21	4		1.97	0.21	1.17	0.10
22	6		1.45	0.04	1.24	0.39
23	8		1.56	0.10	1.18	0.23
24	10		1.48	0.06	0.89	0.14

พ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.37

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Shear strength (Mpa)			
			whisker formed sample	SD	whisker free sample	SD
1	0	500	1.50	0.23	1.72	0.12
2	2		1.46	0.38	1.86	0.01
3	4		1.55	0.15	1.99	0.09
4	6		1.53	0.32	1.91	0.11
5	8		1.52	0.17	2.00	0.06
6	10		1.44	0.11	2.03	0.08
7	0	500	2.57	0.03	2.47	0.27
8	2		3.00	0.23	2.13	0.30
9	4		4.11	0.13	2.19	0.03
10	6		5.27	0.05	1.72	0.41
11	8		5.80	1.06	1.96	0.68
12	10		3.39	1.90	2.12	0.84
13	0	1000	3.64	0.46	3.54	0.00
14	2		3.70	0.26	3.06	0.10
15	4		3.87	0.29	2.55	0.15
16	6		4.37	0.47	2.64	0.22
17	8		4.20	0.72	2.39	0.21
18	10		4.33	0.27	2.66	0.06
19	0	1000	5.50	0.35	4.87	0.00
20	2		7.08	1.44	3.85	0.00
21	4		4.77	1.04	3.20	0.47
22	6		4.07	0.36	3.08	0.28
23	8		4.04	0.55	3.21	0.16
24	10		4.00	0.04	3.40	0.21

## ก. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.38

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Permeability coefficient (m <sup>2</sup> )	SD
1	0	500	3.58	0.39
2	2		3.16	0.35
3	4		2.61	0.34
4	6		2.29	0.09
5	8		2.05	0.05
6	10		2.00	0.27
7	0	500	4.77	0.22
8	2		2.86	0.44
9	4		2.43	0.07
10	6		2.56	0.53
11	8		2.96	0.68
12	10		1.95	0.01
13	0	1000	1.47	0.08
14	2		1.13	0.12
15	4		1.43	0.14
16	6		0.83	0.05
17	8		0.81	0.05
18	10		0.78	0.02
19	0	1000	1.45	0.12
20	2		1.22	0.07
21	4		1.97	0.21
22	6		1.45	0.04
23	8		1.56	0.10
24	10		1.48	0.06

## ม. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.39

NO.	Composite Addition (%)	P (psi)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
1	0	500	72.02	0.41
2	2		74.81	3.53
3	4		67.61	5.03
4	6		53.71	4.31
5	8		48.49	1.48
6	10		42.81	0.72
7	0	500	57.23	3.61
8	2		49.85	4.10
9	4		55.75	2.13
10	6		56.50	2.10
11	8		46.20	1.61
12	10		44.77	2.32
13	0	1000	31.69	5.31
14	2		26.56	2.44
15	4		32.85	0.34
16	6		27.23	2.27
17	8		32.44	2.15
18	10		21.56	1.21
19	0	1000	30.22	3.72
20	2		27.50	1.84
21	4		30.61	0.59
22	6		27.44	2.78
23	8		29.92	0.19
24	10		29.64	0.35

ข. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.40

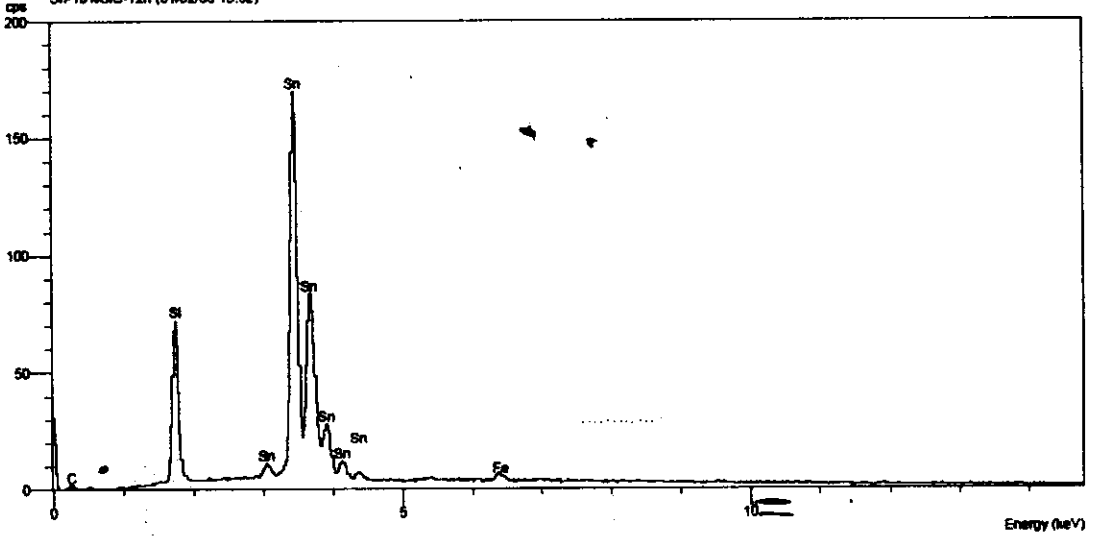
NO.	Composite	P	Average pore size diameter	SD
	Addition			
	(%)	(psi)	( $\mu\text{m}$ )	
1	0	500	2.11	0.12
2	2		2.09	0.12
3	4		2.04	0.13
4	6		2.12	0.03
5	8		2.27	0.03
6	10		2.69	0.18
7	0	500	2.45	0.07
8	2		1.98	0.15
9	4		1.96	0.02
10	6		2.14	0.26
11	8		2.60	0.43
12	10		2.30	0.00
13	0	1000	1.35	0.04
14	2		1.26	0.07
15	4		1.52	0.08
16	6		1.27	0.04
17	8		1.43	0.04
18	10		1.69	0.02
19	0	1000	1.33	0.05
20	2		1.29	0.04
21	4		1.77	0.12
22	6		1.66	0.07
23	8		1.89	0.08
24	10		2.25	0.19

## ร. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.41

NO.	Composite	P	Shear strength	SD
	Addition			
	(%)	(psi)	(Mpa)	
1	0	500	1.50	0.23
2	2		1.46	0.38
3	4		1.55	0.15
4	6		1.53	0.32
5	8		1.52	0.17
6	10		1.44	0.11
7	0	500	2.57	0.03
8	2		3.00	0.23
9	4		4.11	0.13
10	6		5.27	0.05
11	8		5.80	1.06
12	10		3.39	1.90
13	0	1000	3.64	0.46
14	2		3.70	0.26
15	4		3.87	0.29
16	6		4.37	0.47
17	8		4.20	0.72
18	10		4.33	0.27
19	0	1000	5.50	0.35
20	2		7.08	1.44
21	4		4.77	1.04
22	6		4.07	0.36
23	8		4.04	0.55
24	10		4.00	0.04

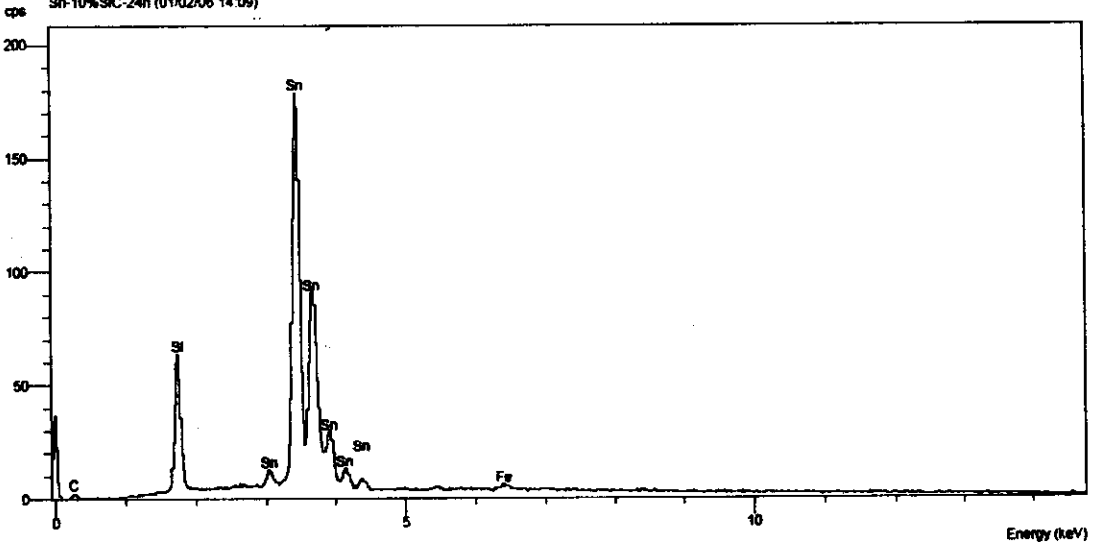
ภาคผนวกที่ 7 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ด้วยเครื่องบดแพลตนาเทรี ความเร็วรอบ 300 rpm ที่ระยะเวลาบด 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง

Operator : N.Pompot  
 Client : Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job : 7829 Kala  
 Sn-10%SiC-12h (01/02/06 13:52)



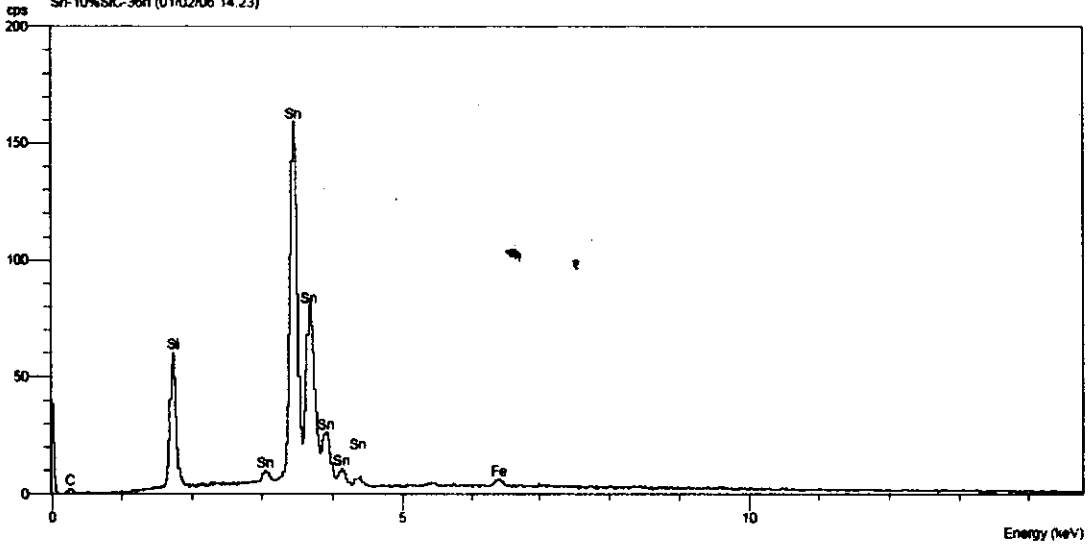
ก) ผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบด 12 ชั่วโมง

Operator : N.Pompot  
 Client : Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job : 7829 Kala  
 Sn-10%SiC-24h (01/02/06 14:09)



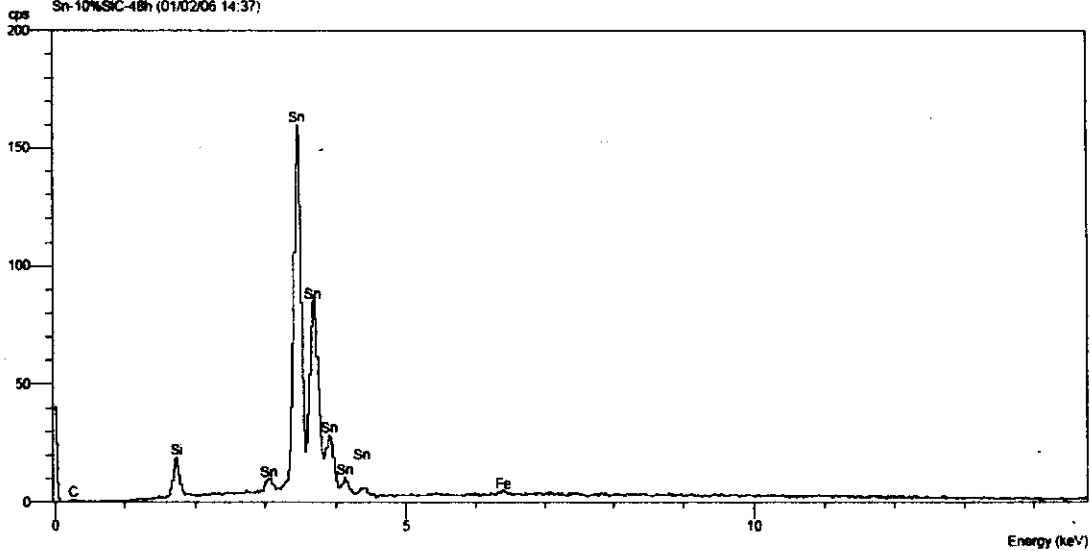
ข) ผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง

Operator : N.Pompot  
Client : Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
Job : 7829 Kata  
Sn-10%SiC-36h (01/02/06 14:23)



ก) ผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบด 36 ชั่วโมง

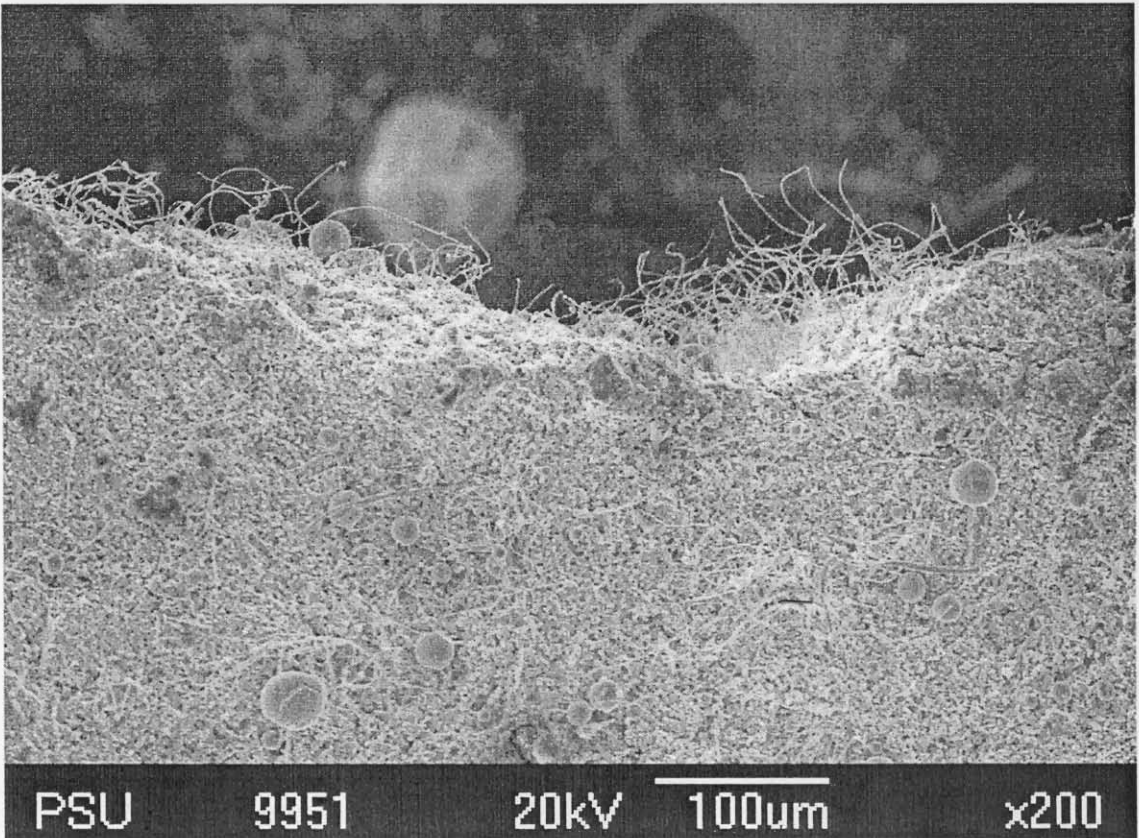
Operator : N.Pompot  
Client : Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
Job : 7829 Kata  
Sn-10%SiC-48h (01/02/06 14:37)



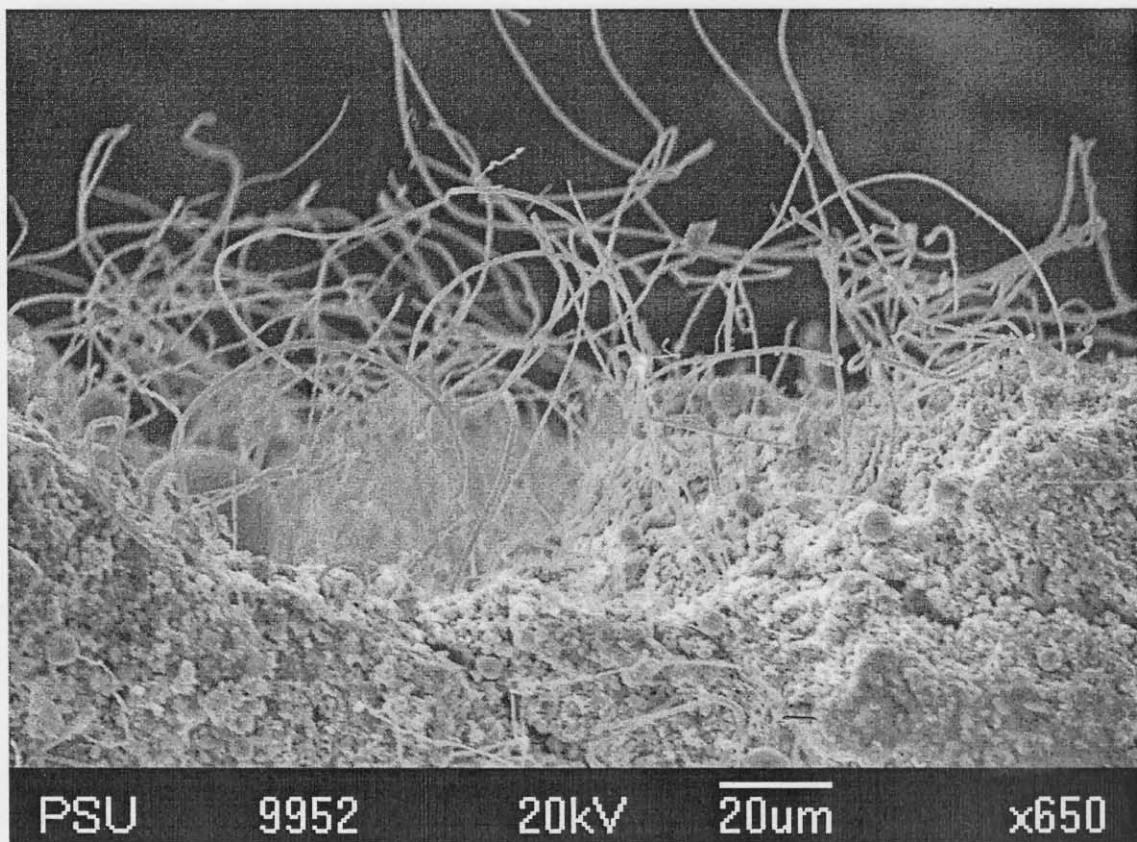
ง) ผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบด 48 ชั่วโมง



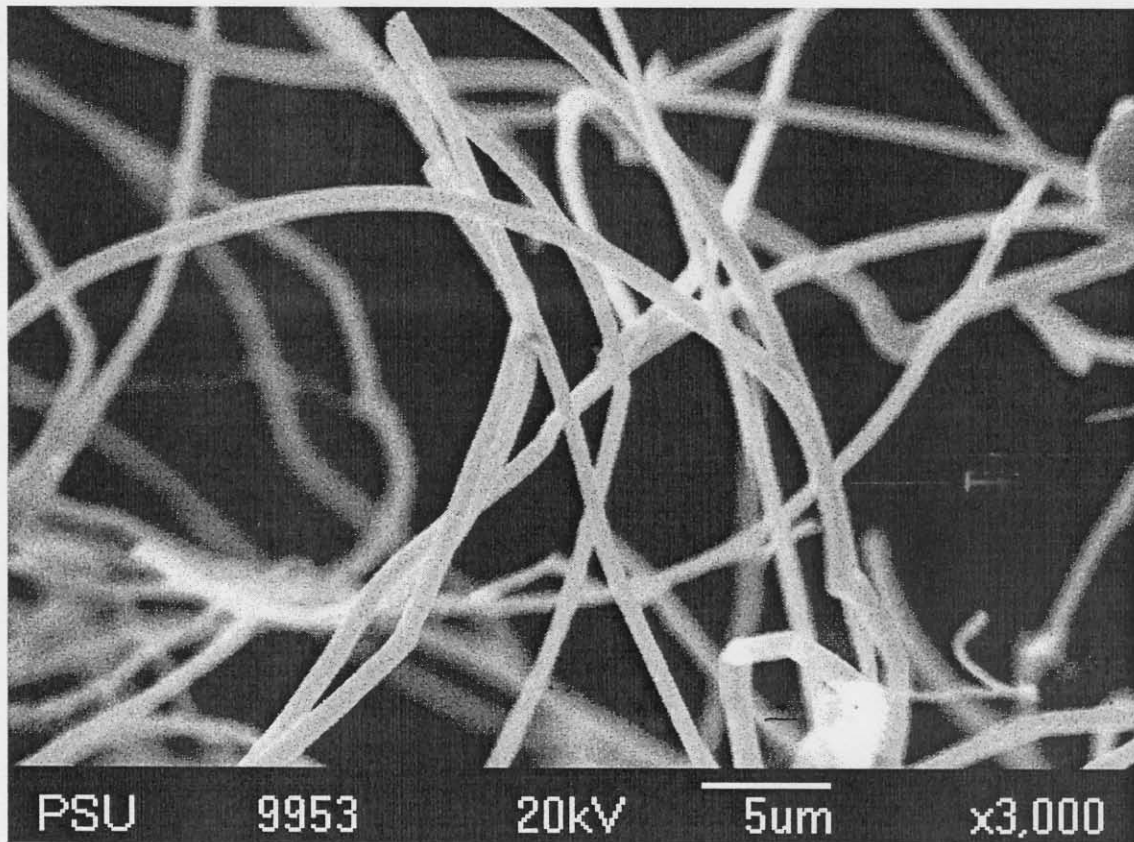
ภาคผนวกที่ 8 ภาพวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดจากวัสดุผสม Sn-10%SiC ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



ก) วิสเคอร์ดีบุกบนฐาน Sn-10%SiC อุณหภูมิช่วง 200-230 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 200 เท่า

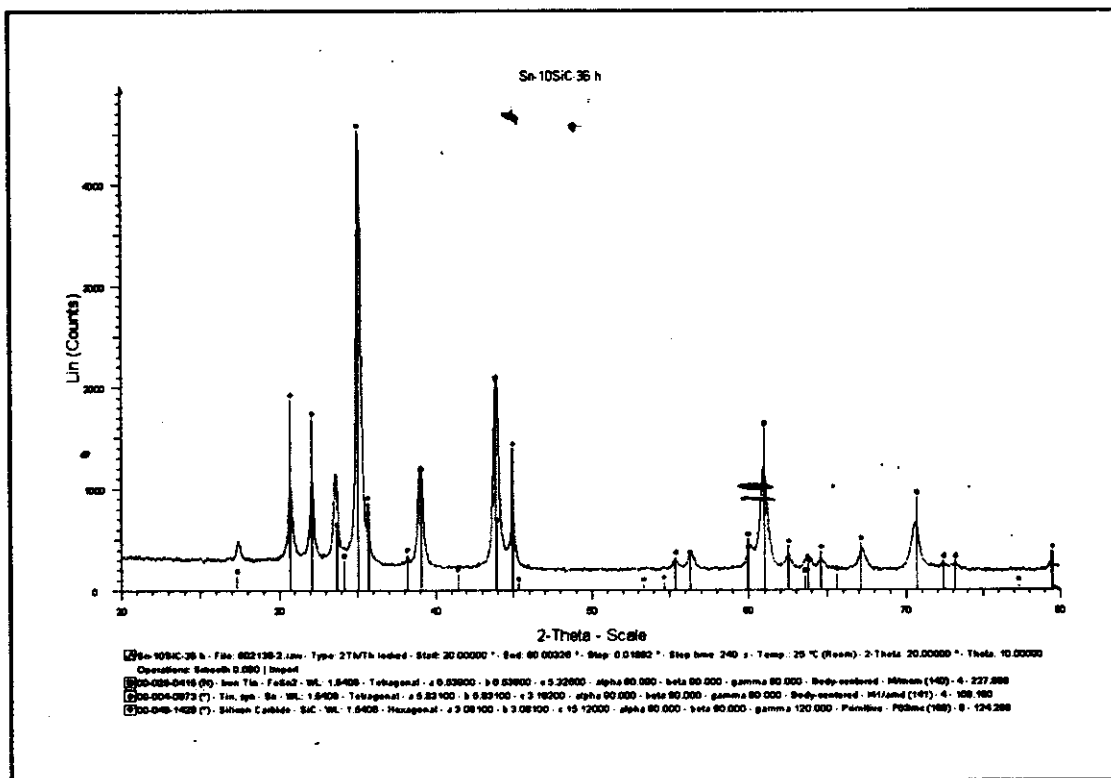


ข) วิสเคอร์ตีบุคบนฐาน Sn-10%SiC อุณหภูมิช่วง 200-230 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 650 เท่า

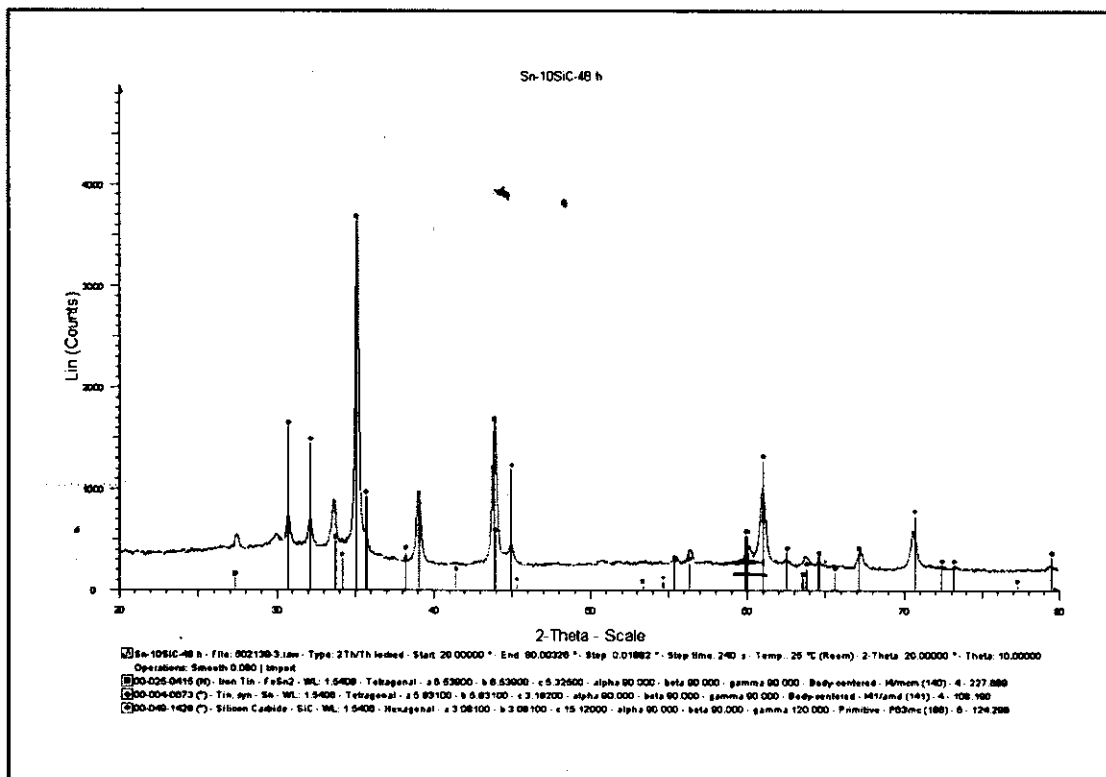


ก) วิสเคอร์ดีบุกบนฐาน Sn-10%SiC อุณหภูมิช่วง 200-230 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

ภาคผนวกที่ 9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ด้วยเครื่องบดแพลนนาเทรี ความเร็วรอบ 300 rpm ที่ระยะเวลาบดต่างๆ  
 ก) 36 ชั่วโมง



ข) 48 ชั่วโมง



### ภาคผนวกที่ 10 ผลงานที่เผยแพร่

คาตา แก้วสมบูรณ์ , เล็ก สีคง , นภิสพร มีมงคล , ธวัชชัย ปลูกผล “ การศึกษาภาวะการเกิดเส้นใย  
ดีบุกของวัสดุผสม Sn-10SiC” รายงานการประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่โลหะวิทยาและปิโตรเลียม  
รอบครั้งที่ ๓ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 20 ตุลาคม พ.ศ. 2549

# การศึกษาภาวะการเกิดเส้นใยติงของวัสดุผสม Sn-SiC.

## The Study of Tin Whisker Formation Conditions of Sn-SiC Composite.

ศกดา แก้วสมบุญ เล็ก สีคง นกิสพร มิมงคล ธวัชชัย ปลุกผล

ภาควิชาวิศวกรรมหมืองแร่และวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

หาดใหญ่ สงขลา 90110

Email: k\_kaewsomboon@hotmail.com

### บทคัดย่อ

วัสดุผสมระหว่างติงกับซิลิกอนคาร์ไบด์ส่วนผสม 9:1 ถูกเตรียมโดยวิธีบดผสมเชิงกลด้วยเครื่องบดแพลนทารีที่ความเร็วรอบ 450 รอบ/นาที เป็นระยะเวลาบดต่าง ๆ แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นงานอุณหภูมิที่  $150^{\circ}\text{C}$  ด้วยความดันต่าง ๆ กัน ภายใต้บรรยากาศปกติเพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเกิดเส้นใยติง ภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ สนามร่อนและ DTA ตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยติงด้วย EDX วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยวิธี X-Ray mapping สังเกตรูปร่างและขนาดของเส้นใยด้วย SEM และ Image Tool พบว่าระยะเวลาในการบดและความดันเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดเส้นใยติงกล่าวคือ ที่เวลาบดต่ำกว่า 12 ชั่วโมงจะไม่เกิดเส้นใยขึ้นเลยเมื่อใช้ความดันในการอัดขึ้นงานสูงถึง 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิสูงถึง  $230^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเพิ่มเวลาบดเป็น 24 และ 36 ชั่วโมงจะเริ่มเกิดเส้นใยติงที่ประมาณ  $230^{\circ}\text{C}$  เมื่อความดันที่ใช้อัดขึ้นงาน 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและที่ความดัน 1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเส้นใยจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงมาเป็น  $220^{\circ}\text{C}$  เพราะเวลาบดนานขึ้นทำให้โครงสร้างของวัสดุเป็นอสัณฐานมากขึ้น และง่ายต่อการกระตุ้นทำให้เกิดเส้นใย แต่เมื่อความดันสูงขึ้นเป็น 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วจะเกิดเส้นใยที่อุณหภูมิต่ำลงเป็น  $230^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้เพราะอนุภาคถูกบีบอัดให้เรียงตัวชิดกันมากขึ้นจึงต้องใช้อุณหภูมิกระตุ้นที่สูงกว่า รูปร่างของเส้นใยจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-30  $\mu\text{m}$  และความยาวเฉลี่ยประมาณ 200-500  $\mu\text{m}$

### Abstract

The composites between Sn - SiC was prepared by a mechanical alloying process at the various milling times by using planetary mill. Sample mixed in the weight ratio of Sn:SiC was 9:1 and formed into coin shape by thermal pressing at the temperature of  $150^{\circ}\text{C}$

under the various pressure to observe the behavior of tin whisker formation. The effect of temperature on the tin whisker formation was investigated with hot stage optical microscope and DTA. Tin whiskers were analyzed by EDX and degree of dispersion of tin whiskers were investigated by using X-ray mapping method. Morphology and Size of tin whisker were observed by SEM and Image tool .The pressure and temperature were significant factors affected on the formation of tin whisker. For compacted specimen at pressure up to 2000 psi. of 12 hours ground sample, whiskers were formed at the temperature  $230^{\circ}\text{C}$ . However, for those of 24 and 36 hours ground samples, tin whiskers started to form at temperature of  $230^{\circ}\text{C}$  but at the lower compaction pressure of 1500 psi., tin whiskers were formed at the lower temperature of  $220^{\circ}\text{C}$  because a longer milling time causes microstructure of composite to be amorphous and becomes weak so that tin whiskers were formed easier however as the higher compaction pressure up to 2000 psi. was applied, the whisker forming temperature was changed to  $230^{\circ}\text{C}$ . It was due to the ground particles were compressed until the specimens had low interstitial porosity therefore activation temperature must be higher than that of lower pressure. The morphology of tin whiskers were long rods which have the average diameter of 5-30  $\mu\text{m}$  and the average length of 200-500  $\mu\text{m}$ .

### 1.บทนำ

การศึกษาการผลิตวัสดุผสม โดยกระบวนการผลิตเชิงกล (MA) ระหว่างดีบุกและซิลิกอนคาร์ไบด์ ของ เล็ก ตีงและคณะ [1] พบว่าที่ชั้นคอนของกรอบหมึกมีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้น ซึ่งคาดว่าเส้นใยดีบุกที่ได้จะทำให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวเพิ่มมากขึ้น สามารถนำมาเป็นแนวทางในการผลิตวัสดุผสมพรุน ซึ่งอาจจะประยุกต์ไปใช้ในงานกรองได้ต่อไป จากรายงานการวิจัยต่างๆ พบว่ามีการศึกษาการเกิดขึ้นด้วยตัวเองของเส้นใยดีบุกมาอย่างต่อเนื่อง [ 2-8 ] พบว่าเส้นใยดีบุกที่เกิดขึ้นเองมีลักษณะคล้ายเส้นผม มีความยาวมากที่สุดถึง 10 mm (ที่พบโดยมากจะมีความยาวน้อยกว่า 1 mm) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.006  $\mu\text{m}$  ถึง 10  $\mu\text{m}$  พฤติกรรมการเติบโตเป็นแบบเดียวการโตของต้นไม้ กล่าวคือ โตจากฐาน กระบวนการเกิดขึ้นและเติบโตต้องใช้ระยะเวลาอย่างยาวนาน อัตราการเติบโตประมาณ 0.1  $\text{A}^\circ/\text{sec}$  ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัดเกี่ยวกับกลไกการเกิดขึ้นเองของเส้นใยดีบุก

สำหรับงานวิจัยนี้ ต้องอาศัยแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดเส้นใยดีบุกความดันตกค้าง ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการบดและอัดขึ้นรูป ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายเกี่ยวกับการเกิดขึ้นเองของเส้นใยดีบุกของ Lee และคณะ [2] ความดันตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะอยู่ในลักษณะความดันกด เกิดระหว่างอินเตอร์เฟสระหว่างเกรนของดีบุกและเกรนของซิลิกอนคาร์ไบด์ เกรนของดีบุกซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าเกรนของซิลิกอนคาร์ไบด์จะถูกบีบให้ขับเส้นใยเกิดขึ้น ปัจจัยที่คาดว่าจะเป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาการเกิดเส้นใยได้เร็วยิ่งขึ้นคือความร้อนที่ให้อินกระบวนการอบหมึก ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งในวิจัยนี้

### 2. วิธีการศึกษา

เตรียมตัวอย่างระหว่างดีบุกกับซิลิกอนคาร์ไบด์ ในอัตราส่วนผสม 9:1 โดยน้ำหนัก ทำการบดผสมดีบุกและซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วย planetary mill ที่ความเร็วรอบ 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำผงโลหะผสมไปขึ้นรูปในลักษณะทรงกระบอกด้วยเครื่องอัดขึ้นงานอุณหภูมิต่ำที่ความดัน 500, 1000, 1500 และ 2000 psi โดยให้อุณหภูมิขณะอัดเป็น 150  $^\circ\text{C}$  แล้วจึงเผาอบหมึกขึ้นงานพร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์สถานะร้อนและ DTA ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 และ 2  $^\circ\text{C}/\text{min}$  ที่อุณหภูมิ 200  $^\circ\text{C}$  และ 230 $^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยดีบุกด้วย EDX และวิเคราะห์

การกระจายตัวของอนุภาคด้วยวิธี X-ray mappingสังเกตรูปร่างและวัดขนาดของเส้นใยด้วย SEM และโปรแกรม Image tool

### 3.ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

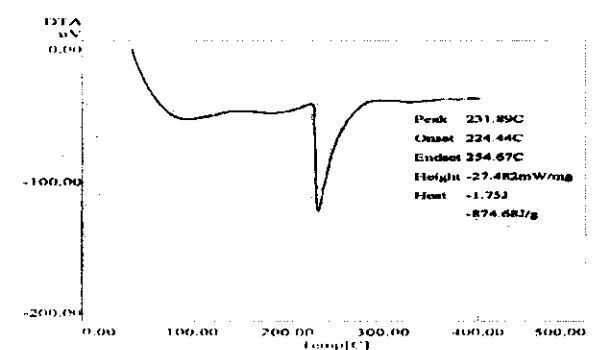
ผลการอบหมึกขึ้นตัวอย่าง Sn-10%SiC ด้วยกล้องจุลทรรศน์สถานะร้อนดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการอบหมึกขึ้นตัวอย่าง Sn-10%SiC ด้วยกล้องจุลทรรศน์สถานะร้อน ที่เวลาบด, ความดันและอุณหภูมิ ต่างๆ

Milling time (hr)	Temp. ( $^\circ\text{C}$ )	Pressure(psi)			
		500	1000	1500	2000
12	200	N	N	N	N
	220	N	N	N	N
	230	Ex	N	Ex	Ex
24	200	N	N	N	N
	220	N	N	N	N
	230	Ex	N	N	Ex
36	200	N	N	N	N
	220	N	N	Y	Y
	230	Ex	N	Y	Y
48	200	N	N	N	N
	220	N	N	N	N
	230	N	Ex+Y	Ex	Ex+Y

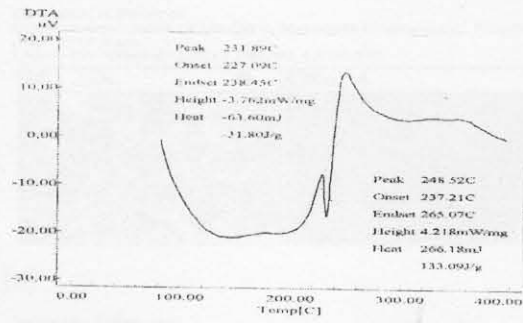
- Y = เกิดเส้นใย
- N = ไม่เกิดเส้นใย
- Ex = เกิดปฏิกิริยา Exudation

ผลการทดสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนของผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ด้วย DTA

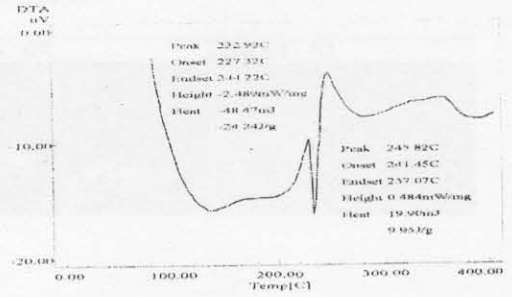


(a)

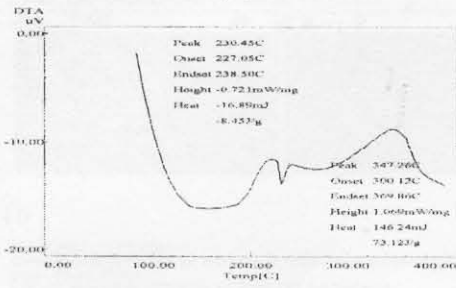




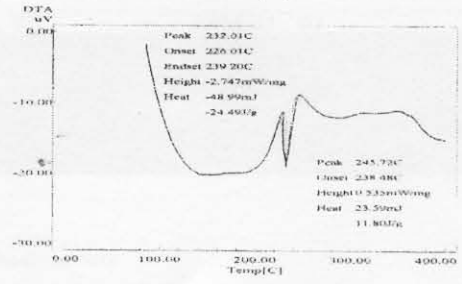
(b)



(c)

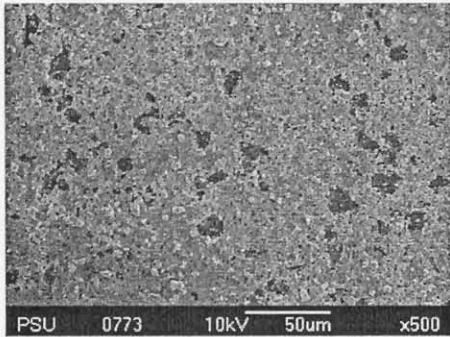


(d)

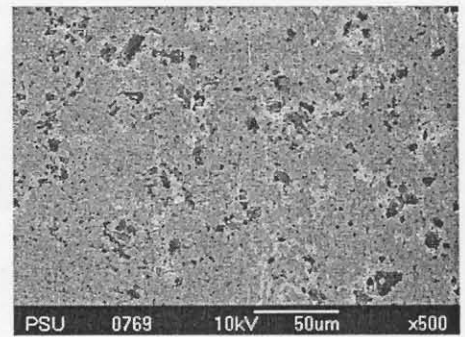


(e)

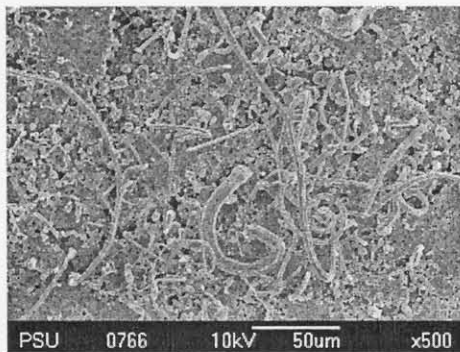
รูปที่ 1 ผลทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA ของ (a) ผงคิบูบกรบริสุทธิ์ กับ ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด (b) 12 ชั่วโมง (c) 24 ชั่วโมง (d) 36 ชั่วโมง และ (e) 48 ชั่วโมง



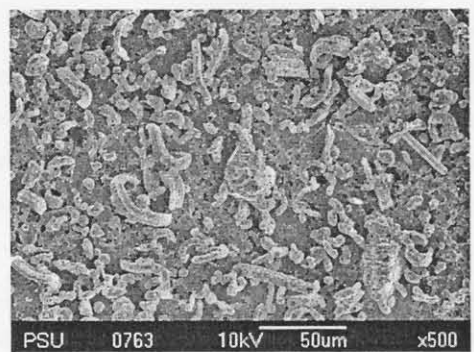
(a)



(b)



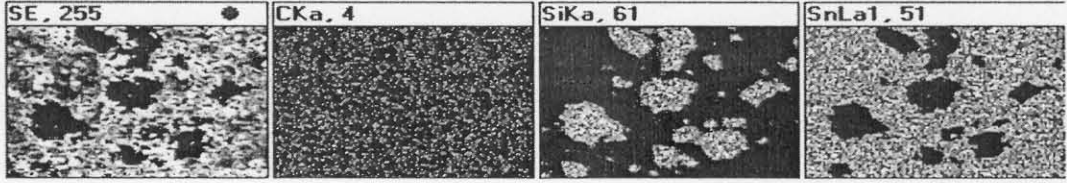
(c)



(d)

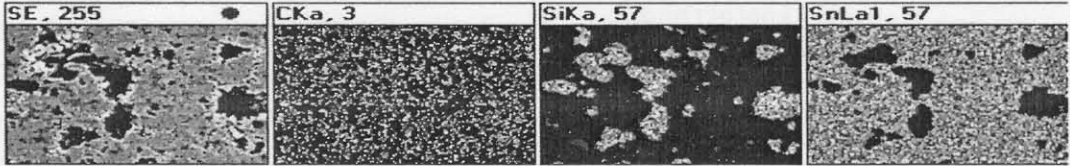
รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ความดัน 1500 psi ให้ความร้อนอุณหภูมิประมาณ 230 °C ที่เวลาบด (a) 12 ชั่วโมง (b) 24 ชั่วโมง (c) 36 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง (กำลังขยาย 500 เท่า)

Operator: N.Pornpot  
Client: Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
Job: 7829 Kata  
Label: Sn-10%SiC-12h (1 Feb 06 13:55:56)



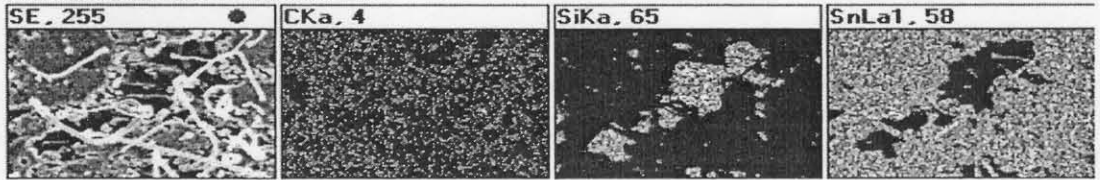
(a)

Operator: N.Pornpot  
Client: Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
Job: 7829 Kata  
Label: Sn-10%SiC-24h (1 Feb 06 14:12:13)



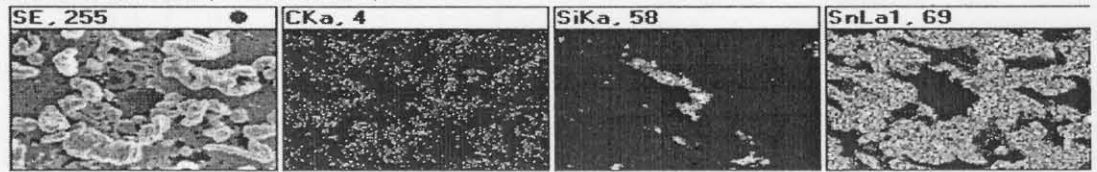
(b)

Operator: N.Pornpot  
Client: Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
Job: 7829 Kata  
Label: Sn-10%SiC-36h (1 Feb 06 14:25:41)



(c)

Operator: N.Pornpot  
Client: Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
Job: 7829 Kata  
Label: Sn-10%SiC-48h (1 Feb 06 14:39:55)



(d)

รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของรากบนเส้นใยติบุกและชั้นตัวอย่างวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด (a) 12 ชั่วโมง (b) 24 ชั่วโมง (c) 36 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง

ผลจากการทดสอบปฏิริยาทางความร้อนด้วย DTA (รูปที่ 1) ติบุกที่ยังไม่ผสม, ติบุกผสมซัลไฟออนคาร์ไบด์ที่เวลาผสมนาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีจุดหลอมเหลว เป็น 231.89 °C, 231.89 °C, 232.92 °C, 232.01 °C และ 230.45 °C ตามลำดับ ติบุกผสมซัลไฟออนคาร์ไบด์ที่เวลาผสมนาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีจุดสิ้นสุดของปฏิริยาคายความร้อนเป็น 248.52 °C, 248.52 °C, 248.52 °C, 245.72 °C และ 347.26 °C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเส้นใยหรือ whisker เริ่มเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 231 °C และเกิดมากที่สุดที่อุณหภูมิ 248 °C จากเส้นกราฟที่ 1d จะเห็นไม่ชัดเจนนักซึ่งอาจเป็นเพราะการวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์เพียงหนึ่งครั้ง

ผลจากการที่ 1 ทำให้เราทราบว่าเวลาบดมีผลต่อการเกิดเส้นใยติบุกเนื่องจาก ผลการการบดโลหะผสมที่เวลาบด 12 ชั่วโมง ไม่เกิดเส้นใยขึ้นเลย แต่เมื่อเพิ่มเวลาบดนานขึ้นเป็น 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีเส้นใยเกิดขึ้น นอกจากนี้ เวลาบดยังมีความสัมพันธ์กับความดันและอุณหภูมิอีกด้วยที่เวลาบด 24 ชั่วโมงมีเส้นใยเกิดขึ้นที่ความดัน 2000 psi, อุณหภูมิ 230 °C เมื่อเพิ่มเวลาบดนานขึ้นเป็น 36 และ 48 ชั่วโมง ความดันและอุณหภูมิที่สามารถเกิดเส้นใยได้ลดลงมาอยู่ที่ 1500 psi และ 220 °C ตามลำดับ เป็นผลมาจากเวลาบดที่นานขึ้นทำให้อุณหภูมิของซัลไฟออนคาร์ไบด์แตกตัวและกระจายตัวได้ดีขึ้น ดังที่เห็นในภาพถ่าย SEM รูปที่ 2a และ 2b ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง อุณหภูมิของซัลไฟออนคาร์

ใบค้กระจายตัวได้ดีกว่าที่ 12 ชั่วโมง และจากรูปที่ 2c และ 2d คือภาพถ่าย SEM ที่เวลาบด 36 และ 48 ชั่วโมง ความดัน 1500 psi อุณหภูมิ 230 °C เมื่อเปรียบเทียบกับกันแล้ว เส้นใยคิงที่เวลาบด 48 ชั่วโมงมีความสม่ำเสมอกว่าที่ 36 ชั่วโมง เป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ดีกว่าของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์

2. จากรูปที่ 3 แสดงผลการการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนบนเส้นใยคิงและชั้นตัวอย่างวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบดผสมต่างๆ พบว่ารูปที่ 3a และ 3b จะเห็นเส้นใยไม่ชัด ส่วนรูปที่ 3c และ 3d จะเห็นเส้นใยชัดและเส้นใยเป็นโลหะคิงซึ่งมีซิลิกอนคาร์ไบด์ปนอยู่บ้างเมื่อวัดขนาดของเส้นใยปรากฏว่ามีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-30  $\mu\text{m}$  และความยาวเฉลี่ย 200-500  $\mu\text{m}$  (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ขนาดและความยาวของเส้นใยคิงที่เวลาบดและความดันต่างๆ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 230 °C

Milling Time (hr)	Pressure (psi)			
	1500		2000	
	Mean Length ( $\mu\text{m}$ )	Mean Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Mean Length ( $\mu\text{m}$ )	Mean Diameter ( $\mu\text{m}$ )
12	-	-	-	-
24	-	-	429.94	28.19
36	256.13	14.82	-	-
48	240.98	6.17	301.40	15.68

#### 4.สรุป

1. ผลของ DTA บ่งบอกได้ว่า ผลของการผสมระหว่างคิงและซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้วัสดุผสมอยู่ในสภาวะที่พร้อมจะเกิดเส้นใยได้ เมื่อมีแรงขับเคลื่อนที่เหมาะสมกระตุ้น
3. แรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดเส้นใยคือความเค้นดกค้างที่ได้จากการให้ความดันขณะขึ้นรูปกับชิ้นงานซึ่งต้องมากกว่า 1500 psi และความร้อนเป็นปัจจัยกระตุ้น
4. เมื่อความดันสูงขึ้นเป็น 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วจะเกิดเส้นใยที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 230°C ทั้งนี้เพราะอนุภาคถูกบีบอัดให้เรียงตัวชิดกันมากขึ้นจึงต้องใช้อุณหภูมิกระตุ้นที่สูงกว่า
5. เนื่องจากการเกิดเส้นใยจะเกิดบริเวณอินเตอร์เฟซ ทำให้ที่ระยะเวลาบด 48 ชั่วโมง การเกิดขึ้นของเส้นใยมีความสม่ำเสมอกว่าที่เวลาบด 36 ชั่วโมง เพราะเมื่อเพิ่มระยะเวลาบดทำให้อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์แตกตัวและกระจายตัวได้ดีกว่า

6. รูปร่างของเส้นใยจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-30  $\mu\text{m}$  และความยาวเฉลี่ยประมาณ 200-500  $\mu\text{m}$

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้ให้ทุนวิจัยและขอขอบคุณบริษัทไทยชาร์โก้จำกัดที่ได้อนุเคราะห์ตัวอย่างโลหะคิง

#### 7.เอกสารอ้างอิง

- [1]เล็ก สิกง , ศิริกุล วิสุทธิเมธานุกร , ชรินทร์ คำธรรการ , ศรีพงษ์ พรรณแก้ว "สมบัติทางประการของวัสดุผสมระหว่างโลหะ คิงกับซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เตรียมด้วยวิธี Mechanical Alloying" รายงานการประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่โลหะวิทยาและปิโตรเลียม รอบครึ่งทาง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พ.ศ.2546 หน้า 75-80.
- [2]B.-Z. Lee and D.N. Lee, "Spontaneous growth mechanism of tin whiskers", Acta Metallurgical Inc, Vol. 46, No.10, 1998 pp. 3701 – 3714.
- [3]Jay A. Brusse, Gary J. Ewell and Jocelyn P. Siplon, "Tin Whiskers: Attributes and Mitigation", Capacitor and Resistor Technology Symposium (CARTS), 2002 pp. 68-80.
- [4]Tong Fang, Michael Osterman and Michael Pecth, "Statistical analysis of tin whisker growth", Microelectronics and Reliability, Vol. 46, Issues 5-6, May-June 2006 pp. 846-849
- [5]Kyung-Seob Kim, Chung-Hee Yu and Jun-Mo Yang, "Behavior of tin whisker formation and growth on lead-free solder finish", Thin Solid Films, Vol. 504, Issues 1-2, 10 May 2006 pp. 350-354
- [6]K.S. Kim, C.H. Yu and J.M. Yang, "Tin whisker formation of lead-free plated leadframes", Microelectronics and Reliability, Vol. 46, Issue 7, July 2006 pp. 1080-1086
- [7][http://www.inemi.org/cms/projects/ese/tin\\_whisker.html](http://www.inemi.org/cms/projects/ese/tin_whisker.html)
- [8][http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech\\_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf](http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf)