รายงานการวิจัย

การทดลองประดิษฐ์ Thermocouple Pyrometer โดยใช้เนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินาเป็นฉนวนความร้อน

An Experiment Construction of a Thermocouple Pyrometer from High Alumina Body that used to be heat insulator.

นายนิวัตร พัฒนะ

สาขาเทคโนโลยีเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

สถาบันราชภัฏพิบูลสงคราม

พ.ศ. 2545

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนาการเรียนการสอน
วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ในสถาบันราชภัฏ
ประจำปีงบประมาณ 2544

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
Pibulsongkram Rajabhat University

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ในสถาบันราชภัฏ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณสถาบันราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการโปรแกรมวิชาเทคโนโลยีเซรามิกส์ โครงการจัดตั้งคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ สุภาพ รมณีย์พิกุล รองศาสตราจารย์วิชาญ ก่องตาวงษ์ และอาจารย์วิเศษ จุลพันธ์ ที่กรุณาตรวจแก้ไขรายงานการวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์รัชฎาภรณ์ พัฒนะ ที่ช่วยเหลือปรับปรุงรายงานการวิจัย และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยอย่างดี ทำให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุวัตถุประสงค์ได้อย่างสมบูรณ์

ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ปัญหาการวิจัย การทดลองประดิษฐ์ Thermocouple Pyrometer โดยใช้เนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินาเป็นฉนวนความร้อน

An Experiment Construction of a Thermocouple Pyrometer from High Alumina Body that used to be heat insulator.

ชื่อผู้วิจัย นายนิวัตร พัฒนะ

Mr.Niwat Pattana

สาขาที่ทำวิจัย วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

ปีที่ทำวิจัยสำเร็จเรียบร้อย พ.ศ. 2545

บทคัดย่อ : การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินาที่ใช้เป็นฉนวนความร้อน และ เพื่อหาประสิทธิภาพของ Thermocouple Pyrometer ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา วิธีดำเนินการเริ่มด้วยการสร้างส่วนผสมเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา จากกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มแบบเจาะจงจากสัดส่วนระหว่าง 1-3 Al_2O_3 และ 1-3 SiO_2 จำนวน 21 ตัวอย่าง เผาเนื้อดินปั้นกลุ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1600 °C และทำการวิเคราะห์ผล พบว่า มีค่าความหดตัวอยู่ระหว่าง 7-12 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงระหว่าง 33.40-228.75 Kg/cm^2 ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 10.25-25.20 เปอร์เซ็นต์ ทุกตัวอย่างสามารถทนไฟได้ และทนต่อ Thermal shock ได้ หลังจากนั้นคัดเลือกตัวอย่างที่มีความเหมาะสมในด้านการขึ้นรูป มาขึ้นรูปเป็น Tube เผาที่อุณหภูมิ 1600 °C แล้วนำมาประกอบกับลวด PR Type R ทำการทดสอบประสิทธิภาพ การวัดอุณหภูมิ 600 °C - 1300 °C โดยเปรียบเทียบกับ Thermocouple Pyrometer ที่ได้มาตรฐานในเตาเผาเซรามิกส์ ผลปรากฏว่าที่อัตราเร่ง 20 °C ค่าผลต่างสูงสุด 1°C มีค่าเฉลี่ยของผลต่าง 0.606°C และที่อัตราเร่ง 150 °C มีค่าผลต่างสูงสุด 3°C มีค่าเฉลี่ยของผลต่าง 1.775 °C ซึ่งถือว่ามีความเที่ยงตรง สามารถใช้เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิในเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ได้เป็นอย่างดี

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

Abstract : The purpose of this research were to study the properties of High Alumina Body that used to be heat insulator and to seek the efficiency of Thermocouple Pyrometer. The method of this study were to create the composition of High Alumina Body from the sample that selected by Purposive Sampling from the ratio between. 1-3 Al_2O_3 and 1-3 SiO_2 in the amount of 21 samples. Bum the sample at 1600°C and the analysis was found that the shrinkage value are in between 7-12 percent, the strength value are in between 33.40 – 228.75 kg/cm^2, the water absorbent value are in between 10.25 – 25.20 percent.

Every sample can be endure fire and Thermal shock. Select the sample that appropriate to be forming. Used the selected sample forming the tube and bum at 1600°C after that put together with wire PR Type R and do efficiency test. The temperature measurement at 600°C – 1300°C by compare with standard Thermocouple Pyrometer in ceramic kiln. The result was fund that at the acceleration 20°C have the maximum differentiate 1°C the means value is 0.606°C and at the acceleration 150°C have the maximum 3°C the means value is 1.775°C. From the accurate result it can be used for temperature measurement in ceramic kiln.

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	1
	ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
	ประโยชน์ของการวิจัย	2
	ขอบเขตของการวิจัย	2
	ข้อตกลงเบื้องต้น	2
	นิยามawif~am:	3
2	**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	4
	การวัดอุณหภูมิของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์	4
	อุณหภูมิและมาตราวัดอุณหภูมิ	8
	เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)	12
	วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองเนื้อดินปั้น	24
	การวิเคราะห์สมบัติของเนื้อดินปั้น	42
3	**วิธีดำเนินการวิจัย**	44
	กลุ่มตัวอย่าง	44
	ตัวแปรที่ศึกษา	45
	วัสดุเครื่องมืออุปกรณ์ในการวิจัย	45
	ขั้นตอนการวิจัย	45
	การวิเคราะห์ข้อมูล	46
4	**ผลการวิเคราะห์ข้อมูล**	48
	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา	48
	ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิ	49
5	**สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ**	52
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	52
	วิธีดำเนินการวิจัย	52

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 53

อภิปรายผล..... 54

ข้อเสนอแนะ..... 54

บรรณานุกรม..... 56

ภาคผนวก..... 57

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง

1 Pyrometric Cones (Temperature Equivalents of Orton Pyrometric Cones).... i

2 IPTS – 68 REFERENCE TEMPERATURE (จุดอ้างอิงอุณหภูมิมาตรฐาน IPTS 68). 10

3 แสดงหลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเชิงกล..... 11

4 แสดงหลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า..... 11

5 แสดงหลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสง และการแผ่รังสี..... 11

6 แสดงหลักการวัดอุณหภูมิโดยวิธีการทางเคมี..... 12

7 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบของ Thermocouple แบบมาตรฐาน..... 16

8 แสดงสภาวะแวดล้อมในการใช้งาน Thermocouple แบบมาตรฐานโดยไม่ต้องใช้ protecting tube.:..... 16

9 คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไป..... 18

10 รายละเอียดเปรียบเทียบฉนวนแบบอ่อน..... 20

11 แสดงการเปรียบเทียบ Extension wire สำหรับ Thermocouple แบบมาตรฐาน..... 22

12 แสดงช่วงอุณหภูมิของการสอบเทียบค่าของ Thermocouple แบบมาตรฐานและค่าผิดพลาดที่อยู่ในพิกัด..... 24

13 แสดงการเปลี่ยนรูปผลึกของอะลูมินาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง..... 30

14 รูปผลึกของแร่ต่างๆ เป็นสารประกอบอะลูมินาและอะลูมินาไฮเดรต..... 30

15 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของอะลูมินาทั้งชนิด γ-Al_2O_3 และ α-Al_2O_3 31

16 แสดงคุณสมบัติของแร่ประกอบหินบอกไซต์..... 32

17 แสดงคุณสมบัติของบอกไซต์ที่ผลิตจำหน่ายจากแหล่งต่างๆ..... 32

18 แสดงผลิตภัณฑ์อะลูมินาทั้ง 12 กลุ่ม ที่เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะแตกต่างกัน..... 37

19 แสดงข้อมูลสำหรับเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานผลิตภัณฑ์ ไฮ-อะลูมินาและผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดอื่นๆ..... 38

20 แสดงกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย..... 44

21 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C..... 48

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี@สุดารัตน์ Pibulsongkram Rajabhat University

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง

22 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิที่อัตราเร่ง 20 °C ต่อชั่วโมง (หน่วย : °C).49

23 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิอัตราเร่ง 150 °C ต่อชั่วโมง (หน่วย : °C)..50

24 สรุปค่าเฉลี่ยผลต่างซึ่งแสดงค่าผิดพลาดในการวัดอุณหภูมิ..... 51

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ

1	แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิทั้ง 3 มาตรา.....	4
2	แสดงโครงสร้างของแร่ α-Al_2O_3 จากแร่คอรันดัม.....	30
3	แสดงโครงสร้างหนึ่งหน่วยเซลล์ของยิบบ์ไซต์ γ $[Al(OH)_3]3$.....	31
4	แสดง Thermocouple Tube ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1600 atศาเซลเซียส.	58
5	แสดง Thermocouple Tube ที่ผ่านการทดสอบการใช้งานมาระยะหนึ่ง.....	59
6	ลวด PR พร้อมฉนวนเซรามิกส์.....	60
7	เตาเผาอุณหภูมิสูง (1800 °C).....	61
8	หม้อบดความเร็วสูงที่ใช้บดผสมเนื้อดินปั้นกดุ่มตัวอย่าง.....	62
9	Thermocouple ที่ได้จากการทดลองวิจัย.....	62
10	แสดงขั้วต่อสายตัวนำของ Thermocouple ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา.....	63
11	ชุดแสดงผลการวัดอุณหภูมิขณะทดสอบประสิทธิภาพของ Thermocouple.	63
12	แสดง Thermocouple มาตรฐานและ Thermocouple ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา ประกอบสายตัวนำพร้อมใช้งาน.....	64
13	แสดงตำแหน่งการทดสอบการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง Thermocouple มาตรฐานและ Thermocouple ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา ภายในเตาเผาเซรามิกส์.....	64

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

Thermocouple Pyrometer เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์ที่อาศัยหลักการเกิดกระแสไฟฟ้าจากความร้อน (Thermo Electric Pyrometer) โดยนำเอาโลหะสองชนิดมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับตัวแสดงผลอุณหภูมิ (Indicator) เป็นองศาเซลเซียส หรือองศาฟาเรนไฮต์ Thermocouple สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 1800 °C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ 2 ชนิดที่ใช้ และฉนวนความร้อน (ทวี พรหมพฤกษ์. 2525 : 107)

โดยทั่วไปฉนวนความร้อนที่ใช้ครอบหรือป้องกันเปลวไฟสัมผัสเส้นลวดโลหะนั้น จะใช้เนื้อ ไฮ-อะลูมินาเซรามิกส์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและทนทานต่อ Thermal shock แต่ปัจจุบัน Thermocouple Pyrometer ทั้งชุดมีราคาแพงมาก เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์นำเข้าโดยเฉพาะฉนวนความร้อนซึ่งมักจะมีการแตกหักเสียหายได้ง่าย ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญและความจำเป็นในการทำวิจัยครั้งนี้ จึงได้จัดทำโครงการวิจัยนี้ขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ต่องานเซรามิกส์ของประเทศ ซึ่งสอดคล้องกับวาระวิจัยแห่งชาติ ด้านการวิจัยเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เน้นการวิจัยรูปแบบโครงสร้างองค์กรทางวิทยาศาสตร์ขั้นพื้นฐาน ทั้งด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อความเป็นเอกภาพในการดำเนินงานอย่างมีประสิทธิภาพ และการวิจัยวิทยาศาสตร์ขั้นพื้นฐานทั้งด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ เกษตร อุตสาหกรรม พลังงาน และด้านอื่นๆ ให้เข้มแข็งเพื่อสร้างองค์ความรู้ในการนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อไป รวมทั้งการวิจัยเพื่อประเมินเทคโนโลยีและจัดลำดับความสำคัญทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีให้สอดคล้องกับสถานการณ์ของประเทศในปัจจุบัน การพัฒนาที่ยั่งยืนและการพัฒนาเพื่อการแข่งขันกับประเทศต่างๆ ในระดับโลก (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 2542 : 7)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินาที่ใช้เป็นฉนวนความร้อน
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของ Thermocouple Pyrometer ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ประโยชน์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ Thermocouple Pyrometer ที่มีประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิ สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการผลิตในระบบอุตสาหกรรมได้

หน่วยงานที่สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้แก่

1. โรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกส์
2. สถาบันการศึกษาที่มีสาขาเซรามิกส์
3. สถาบันวิจัยด้านเซรามิกส์
4. อุตสาหกรรมที่มีการวัดอุณหภูมิสูงทั่วๆ ไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. **เป้าหมายการทดลอง**

1.1 **เป็นการทดลองประดิษฐ์** Thermocouple Pyrometer **เฉพาะที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ ประเภทเครื่องปั้นดินเผา**

1.2 **ช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบระหว่าง** 600° – 1300° C

2. **กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้มาจากการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จำนวน** 21 ตัวอย่าง จากสัดส่วนของอะลูมินาต่อซิลิกา (Al_2O_3 : SiO_2)

3. **ตัวแปรที่ศึกษา** การวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาตัวแปรจากคุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิ คือ

3.1 การหดตัว

3.2 การดูดซึมน้ำ

3.3 ความแข็งแรงหลังการเผา

3.4 ความทน Thermal Shock

3.5 ประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิ

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองเนื้อดินปั้น ไฮ-อะลูมินา ได้แก่

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

1.1 ดินขาวระนอง จาก บริษัทเคลย์ แอนด์ มิเนอรัลส์ จำกัด มีผลการวิเคราะห์ทางเคมี SiO_2 47.10 %, TiO_2 0.05 %, Al_2O_3 37.30 %, Fe_2O_3 0.88 %, CaO 0.04 %, MgO 0.05 %, K_2O 1.42 %, Na_2O 0.08%, LOI 3.00 %

1.2 อะลูมินา จากบริษัทเซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด มีผลการวิเคราะห์ทางเคมี Al_2O_3 99.20%, SiO_2 0.02 %, Fe_2O_3 0.02 %, Na_2O 0.04%, LOI 0.02 %

2. ชั่งวัตถุดิบ ด้วยเครื่องชั่งระบบไฟฟ้า (0.001 g)
3. บดส่วนผสมด้วยหม้อบด Centifical ใช้เวลา 5นาที ความเร็วรอบ 400 RPM
4. กรองผ่านตะแกรง ขนาด 325 เมช (Mesh)
5. การขึ้นรูปชิ้นทดลอง ใช้การขึ้นรูปโดยหล่อในแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์
6. ทดลองเผาในบรรยากาศแบบออกซิเดชันด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิ 1600°C
7. เผายืนไฟ (Soaking Time) เป็นเวลา 30 นาที
8. ความยาวของ Thermocouple tube ไม่เกิน 30 เซนติเมตร

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. เนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา หมายถึง เนื้อดินปั้นที่มีส่วนผสมของอะลูมินาเป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสำหรับใช้เป็นฉนวนความร้อนของ Thermocouple Pyrometer
2. Thermocouple Pyrometer หมายถึง Thermocouple Pyrometer เฉพาะที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ประเภทเครื่องปั้นดินเผาช่วงอุณหภูมิ 600° – 1300° C (Type R)
3. ประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิหมายถึงความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิระหว่าง Thermouple Pyrometer มาตรฐานกับ Thermocouple Pyrometer ที่ทดลองประดิษฐ์ขึ้นมา ซึ่งดูจากผลต่างของการวัดอุณหภูมิที่อัตราเร่ง 20 °C และ 150 °C เปรียบเทียบทุกๆ 10 นาที

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้จำเป็นต้องได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆ เพื่อให้เกิดความชัดเจนในเนื้อหาสาระที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์ Thermocouple Pyrometer ไว้ดังนี้

1. การวัดอุณหภูมิของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ในสมัยโบราณจะใช้วิธีการสังเกตสีของความร้อน โดยการคาดคะเนด้วยสายตาจากประสบการณ์และความชำนาญเฉพาะบุคคล แต่ในปัจจุบันได้มีเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่มีความเที่ยงตรงซึ่งเป็นที่นิยมใช้อยู่ 3 ประเภท ซึ่งมีหลักการแตกต่างกันไป (หวี พรหมพฤกษ์ 2525 : 107-110) ได้แก่

1.1 Thermo Electric Pyrometer หรือ Thermocouple Pyrometer เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ที่อาศัยหลักการ การเกิดกระแสไฟฟ้าจากความร้อน (Thermo Electric Pyrometer) โดยนำเอาโลหะสองชนิดมาเชื่อมให้ปลายติดกัน เรียกว่า Hot Junction แต่โลหะทั้งสองจะต้องมีคุณสมบัติแตกต่างกันใส่ในเตาให้ได้รับความร้อน (Thermocouple) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ (Indicator) แล้วเข็มจะชี้บอกอัตราความร้อนตามความมากน้อยของกระแสไฟฟ้า จะมีตัวเลขเทียบ อุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียส และ ฟาเรนไฮต์ ปลายของโลหะที่ต่อไปยังหน้าปัดเรียกว่า Cold Junction Themocouple ที่วัดอุณหภูมิสูงๆ จะมีเครื่องป้องกัน Protectue ทำด้วยวัตถุทนไฟป้องกันอีกชั้นหนึ่ง

โลหะต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นสื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับความร้อน คือ

- Copper + Nickle = 500° C (932° F)
- Iron = 850° C (1562° F)
- Chromel + Nickle = 1100° C (2012° F)
- Platinum 87 + Rhodium 13 = 1500° C (2732° F)
- Platimun 70 + Rhodium 30 = 1800° C (3270° F)

1.2 Pyrometric Cone ทุ่นวัดอุณหภูมิ หรือ เรียกสั้น ๆ ว่า Cone เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิภายในเตา การใช้ก็ง่ายและสะดวก ผู้ที่คิดทำทุ่นวัดอุณหภูมิ เป็นครั้งแรกได้แก่ ชาวเยอรมัน ชื่อ Segger ตั้งชื่อว่า Segger Cone โดยนำเอาวัตถุดิบผสมกับสารละลาย (Flux)

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตามสัดส่วนต่างๆ มาทำเป็นแท่งสามเหลี่ยม ให้ปลายแหลม (Pyramid Shape) ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 585°C (1085° F) ขึ้นไปจนถึง 2015°C (3659° F) และแบ่งออกเป็นนัมเบอร์ต่างๆ ถึง 42 นัมเบอร์ ระบบการจัดนัมเบอร์อุณหภูมิต่ำจะให้ตัวเลขศูนย์นำหน้า เช่น อุณหภูมิที่ต่ำที่สุด 022 อุณหภูมิสูงสุด No 42 เป็นต้น ทุ่นวัดอุณหภูมิ ที่ใช้เป็นมาตรฐานในปัจจุบัน คือ ของ Segger Cone (S.K) กับ Ortan Cone (P.C.E)

โดยเฉพาะทุ่นวัดอุณหภูมิ ของ Orton ที่ใช้วัดอุณหภูมิ มี 2 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ (Large Cone) และขนาดเล็ก (Small Cone)

การใช้ทุ่นวัดอุณหภูมิ ที่ถูกต้องนั้น ใช้ครั้งละ 3 ตัว เรียงตามลำดับอุณหภูมิบนแท่งดิน (cone Plaque) โดยทำมุมเอียง 82° การอ่าน Cone จะยึดตัวกลางเป็นหลักและเป็นตัวอุณหภูมิที่ต้องการ การเผาที่ถูกต้อง จะล้มตามเข็มนาฬิกา Cone ตัวแรกจะล้มราบ ตัวที่สองจะเอียงประมาณสองนาฬิกา ตัวที่สามจะเอียงหนึ่งนาฬิกา เป็นต้น

การตั้ง Cone วัดอุณหภูมิตั้งในส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยของเตา และควรตั้งให้สามารถมองเห็นได้อย่างง่าย การวัดอุณหภูมิด้วย Cone ที่แน่นอนควรเผาในบรรยากาศที่เป็น oxidation โดยเฉพาะเตาไฟฟ้าวัดอุณหภูมิได้ถูกต้องแน่นอน สำหรับเตาถ่าน เตาหลอมไม่เหมาะสมในการใช้

1.3 Optical Pyrometer เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Optical Pyrometer จะใช้วัดความเข้มข้นของแสงที่แผ่รังสีออกจากวัตถุที่ร้อนโดยอาศัยแบตเตอรี่ (Battery) จากเครื่องมือผ่านเลนซ์ ทำหน้าที่รวมแสงเป็นเส้น นำไปเปรียบเทียบสีในเตาให้ใกล้เคียงกัน แล้วสามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ทันที เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบ Optical นี้ สามารถวัดอุณหภูมิในเตาได้เกือบทุกชนิด ข้อเสียคือวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 750°C ขึ้นไป

ตาราง 1 Pyrometric Cones (Temperature Equivalents of Orton Pyrometric Cones)

Cone No. / Temp.	End point, 20 °C.per hr.		End point, 150 °C.per hr.	
	°C	°F	°C	°F
022	580	1090	605	1120
021	595	1100	615	1140
020	625	1160	650	1200
019	630	1170	660	1220
018	670	1240	720	1330

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 1 (ต่อ)

Cone No. / Temp	End point, 20 °C.per hr.		End point, 150 °C.per hr.	
	°C	°F	°C	°F
017	720	1330	770	1420
016	735	1360	795	1460
015	770	1420	805	1480
014	795	1460	830	1530
013	825	1520	860	1580
012	840	1540	875	1610
011	875	1610	905	1660
010	890	1630	895	1640
09	930	1710	930	1710
08	945	1730	950	1740
07	975	1790	990	1810
06	1005	1840	1015	1860
05	1030	1890	1040	1900
04	1050	1920	1060	1940
03	1080	1980	1115	2040
02	1095	2000	1125	2060
01	1110	2030	1145	2090
1	1125	2060	1160	2120
2	1135	2080	1165	1230
3	1145	2090	1170	2140
4	1165	2130	1190	2170
5	1180	2160	1205	2200
6	1190	2170	1230	2250
7	1210	2210	1250	2280
8	1225	2240	1260	2300
9	1250	2280	1285	2350
10	1260	2300	1305	2380

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 1 (ต่อ)

Cone No. / Temp	End point, 20 °C.per hr.		End point, 150 °C.per hr.	
	°C	°F	°C	°F
1I	1285	2350	1325	2420
12	1310	2300	1335	2440
13	1350	2460	1350	2460
14	1390	2530	1400	2550
15	1410	2570	1435	2620
16	1450	2640	1465	2670
17	1465	2670	1475	2690
18	1485	2710	1490	2710
19	1515	2760	1520	2770
20	1520	2770	1530	2790
23			1580	2880
26			1595	2900
27			1605	2920
28			1615	2940
29			1640	2980
30			1650	3000
31			1680	3060
32			1700	3090
33			1745	3170
34	1755	3190	1760	3200
35	1775	3230	1785	3250
36	1810	3290	1810	3290
37	1830	3330	1820	3310
38	1850	3360	1835	3340
39	1865	3390		
40	1885	3430		
41	1970	3580		
42	2015	3660		

พิบูลสงคราม Rajabhat University

2. อุณหภูมิและมาตราวัดอุณหภูมิ

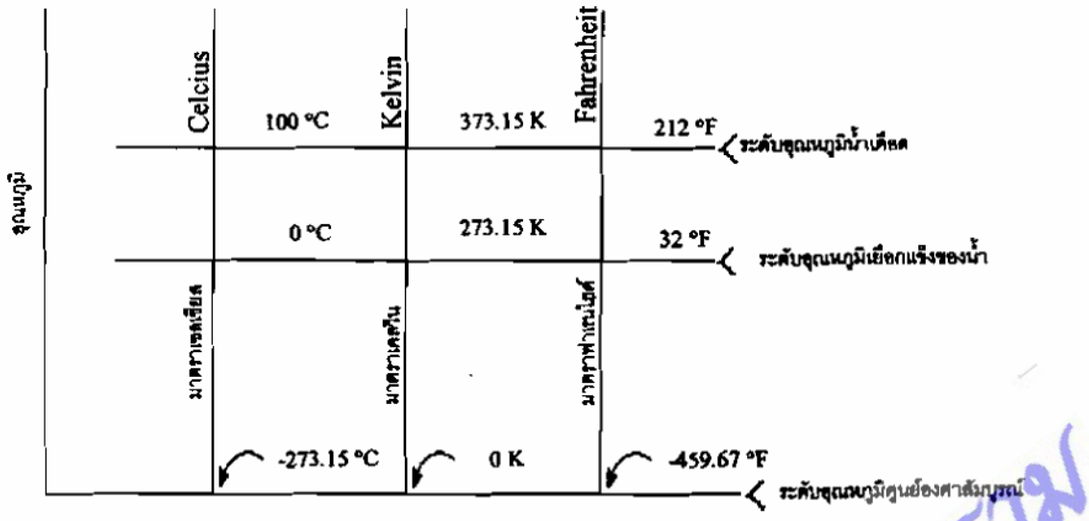
หน่วยวัดและมาตราวัดอุณหภูมิ (Temperature Units and Temperature Scales) สมศักดิ์ กีรติวุฒิเศรษฐ์ (2534 : 1-2) ได้ศึกษาและรวบรวมแนวคิดเกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิไว้ว่า อุณหภูมิเป็นหน่วยมูลฐานที่สำคัญ และใช้มากที่สุดค่าหนึ่งในอุตสาหกรรม หน่วยของอุณหภูมิที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายหน่วยด้วยกันที่สำคัญคือ เซลเซียส (Celcius) เคลวิน (Kelvin) ฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit)

เซลเซียส เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิที่ตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน Anders Celcius (1701–1744) โดย เซลเซียส พบว่า ณ ความดันบรรยากาศน้ำบริสุทธิ์จะมีจุดที่ทางอุณหภูมิอยู่สองจุดคือ จุดเยือกแข็งของน้ำ และจุดที่น้ำเดือด เขาจึงได้กำหนดจุด 0 องศา ที่จุดเยือกแข็งของน้ำ และ 100 องศา ที่จุดเดือดของน้ำ

ฟาเรนไฮต์ เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิที่ตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ชาวดัทช์ Daniel Grabriel Fahrenheit (1686–1736) โดย ฟาเรนไฮต์ ได้พยายามหาจุดต่ำสุดของอุณหภูมิโดยการทดลองกับสารต่างๆ หลายๆ อย่าง และพบว่าจุดเยือกแข็งของแอมโมเนียมคลอไรด์ เป็นจุดต่ำสุดของอุณหภูมิเท่าที่เขาทดลองได้ จึงกำหนดจุดนี้เป็นจุด 0 องศา ส่วนจุดบนของสเกลนั้น เขาพบว่าอุณหภูมิของร่างกายมนุษย์ เป็นจุดที่อุณหภูมิคงที่ จึงกำหนดจุดนี้เป็น 98 องศา สาเหตุที่ไม่กำหนดจุดบนของสเกลเป็น 100 องศา เพราะต้องการให้มีค่าเป็นสัดส่วนทวีคูณของ 12 ตามหน่วยอื่นๆ ที่นิยมในสมัยนั้น

ทั้งหน่วยเซลเซียสและฟาเรนไฮต์ก็เป็นมาตราวัดอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองหาสภาวะคงที่ทางอุณหภูมิของสาร ณ จุดต่างๆ ที่อยู่ในย่านบรรยากาศของพื้นโลกและแบ่งสเกล ให้เป็นไปตามความสะดวกเหมาะสมมิได้มีหลักเกณฑ์ตายตัวอะไร ต่อมานักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ลอร์ดเคลวิน เป็นผู้ค้นคิดหน่วยของอุณหภูมิทางวิทยาศาสตร์ขึ้นในปี 1851 เรียกว่ามาตราเคลวิน โดยกำหนดจุดอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (Zero Absolute Temperature) ขึ้น ณ จุดที่เป็น Ideal นี้อิเล็คตรอนในอะตอมของสารต่างๆ จะหยุดโคจรรอบนิวเคลียสโดยไม่มีพลังงานความร้อนหลงเหลืออยู่ในสารนั้นๆ อีกต่อไป ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้เย็นจัดถึงจุดนี้ได้ (กำหนดได้จากการคำนวณ) และแบ่งช่วงของมาตราตามมาตราเซลเซียส ระบบหน่วยสากล (The Systeme International d' Unites) ซึ่งเรียกย่อว่า SI ได้กำหนดหน่วยสากลของอุณหภูมิเทอร์โมไดนามิกเป็นมาตราเคลวิน และหน่วยของอุณหภูมิทั่วๆ ไปเป็นเซลเซียส

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี@สงฆราม เพชรบุรีราชภัฏ Rajabhat University



ภาพประกอบ 1 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิทั้ง 3 มาตรา

เปรียบเทียบจุดอ้างอิง (Reference) ของมาตราต่างๆ

จุดศูนย์สัมบูรณ์	=	- 273.15 °C	= - 459.67 °F	0.00 K
จุดเยือกแข็งของน้ำ	=	0 °C	= 32 °F	= 273.15 K
จุดเดือดของน้ำ	=	100 °C	= 212 °F	= 373.15 K

สูตรการเปลี่ยนมาตราเซลเซียสและฟาเรนไฮต์เป็นมาตราเคลวิน

$$\ldots K = \ldots {}^{\circ}C + 273.15$$

.....

$$\ldots K = 5\frac{(F-32)}{9} + 273.15$$

2.1 อุณหภูมิอ้างอิงมาตรฐาน (Reference Temperatures) มาตราสากลของอุณหภูมิในทางปฏิบัติ (International Practical Temperature Scale) ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยที่ประชุมของกลุ่มประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรมในปี *1968* และเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปเรียกโดยย่อว่า IPTS 68 ได้กำหนดจุดอ้างอิงมาตรฐานของอุณหภูมิ (Reference Temperature) เพิ่มเติมขึ้นอีกหลายจุดโดยกำหนดจากจุดเยือกแข็งหรือจุดไตรภาค (Triple Point) ซึ่งเป็นจุดที่มีสภาวะ

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

คงที่ทางอุณหภูมิของสารต่างๆ เพราะเมื่อวิทยาการเจริญมากขึ้น ความต้องการอุณหภูมิอ้างอิง (Reference Temperature) ณ จุดที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำก็มีมากขึ้น

IPTS *68* ได้กำหนดมาตราของอุณหภูมิมาตรฐานขึ้น 2 มาตรา คือเซลเซียส และเคลวิน

ตาราง 2 IPTS – *68* REFERENCE TEMPERATURE (จุดอ้างอิงอุณหภูมิมาตรฐาน IPTS 68)

EQUILIBRIUM POINT	K	°C
(จุดที่มีสภาวะคงที่ทางอุณหภูมิ)		
จุดไตรภาคของไฮโดรเจน	13.810	- 259.340
จุดสมดุลในสภาวะก๊าซและของเหลวของไฮโดรเจน ที่ความดัน 25/76 ของความดันบรรยากาศ	17.042	- 256.108
จุดเดือดของไฮโดรเจน	20.280	- 252.870
จุดเดือดของนีออน	27.102	- 246.048
จุดไตรภาคของออกซิเจน	54.361	- 218.789
จุดเดือดของออกซิเจน	90.188	- 182.962
จุดไตรภาคของน้ำบริสุทธิ์	273.160	0.010
จุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์	373.150	100.000
จุดแข็งตัวของสังกะสี	692.730	419.580
จุดแข็งตัวของเงิน	1,235.080	961.930
จุดแข็งตัวของทอง	1,337.580	1,064.430
จุดแข็งตัวของดีบุก	505.1181	231.9681

หมายเหตุ

- มาตราเคลวินไม่ต้องเรียน ... °K ให้กำหนดอักษร K ตามหลัง เช่น 273.15 K
- อุณหภูมิของสาร ณ จุดต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้จะใช้เป็นจุดอ้างอิงมาตรฐาน (References) ในการสอบเทียบค่าสากลของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

2.2 หลักการวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดอุณหภูมิมีหลายชนิด โดยเครื่องมือแต่ละชนิดอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเฉพาะของสาร คือ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้ เมื่ออุณหภูมิที่วัดเปลี่ยนไป และการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้จะต้องคงที่แน่นอนและพิสูจน์ได้

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 3 แสดงหลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเชิงกล

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
ไร้ของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด (Thermometer)	A อุณหภูมิ → เทอร์โมมิเตอร์ → A การขยายตัวของของเหลว	ปรอท แอลกอฮอล์	- 130 ถึง 315 °C (- 200 ถึง 600 °F)
เปลี่ยนการขยายตัวเป็นความดัน(Filled Thermal)	A อุณหภูมิ → เทอร์โมมิเตอร์ → A ความดันแบบ Filled Thermal → Δ ปริมาตร	ปรอท แอลกอฮอล์	- 185 ถึง 540 °C (- 300 ถึง 1000 °F)
แบบแถบโลหะคู่	Δ อุณหภูมิ → ตัววัด Bimetal → Δ ระยะทาง	INVAR-Ni + Fe + Cr.	- 60 ถึง 425 °C (- 30 ถึง 800 °F)

ตาราง 4 แสดงหลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
เทอร์โมคับเปิล	Δ อุณหภูมิ → เทอร์โมคับเปิล → Δ แรงเคลื่อนไฟฟ้า	Type B	600 ~ + 1700 °C
		S	0 ~ + 1600 °C
		R	0 ~ + 1600 °C
		K	- 200 ~ + 1200 °C
		E	- 200 ~ + 800 °C
		J	- 200 ~ + 800 °C
		T	- 200 ~ + 350 °C
อาร์ทีดี	Δ อุณหภูมิ → RTD → Δ ความต้านทาน	พลาตินัม Pt	- 258 ~ 900 °C
		นิเกิล	- 150 ~ 300 °C
		ทองแดง	- 200 ~ 120 °C
เทอร์มิสเตอร์	Δ อุณหภูมิ → เทอร์มิสเตอร์ → Δ ความต้านทาน	เทอร์มิสเตอร์	- 30 ~ 300 °C

ตาราง 5 แสดงหลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงและการแผ่รังสี

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
ออพติคอลไพโรมิเตอร์	ความเข้มของแสง → เปรียบเทียบ → Δ อุณหภูมิความเข้มของแสง	-	> 700 °C

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 6 แสดงหลักการวัดอุณหภูมิโดยวิธีการทางเคมี

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
Crayon แล็คเกอร์	A อุณหภูมิ → แล็คเกอร์ → หลอมละลาย → เปลี่ยนสี	สารเคมี	37 ถึง 150 °C 100 ถึง 300 °C

3. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)

สมศักดิ์ กีรติวุฒิเศรษฐ์ (2534 : 5-30) กล่าวถึงเทอร์โมคัปเปิลไว้ว่า ในปี ค.ศ.1821 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน Thomas Seebeck พบว่า เมื่อนำลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองนี้ ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายด้านเปิด แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า "ซีเบ็คโวลเตจ"

ต่อมาในปี 1834 นักวิทยาศาสตร์ Jean C.A. Peltier พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรลักษณะเดียวกับที่ซีเบ็คสร้างขึ้น จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของจุดต่อแตกต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อนขึ้นและปลายอีกข้างหนึ่งจะเย็นลง ลวดทั้งสองทำจากบิสมัสและ นอนติโมนี เมื่อมีกระแสจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจร จะทำให้ปลายข้างขวามีอุณหภูมิสูงขึ้นและปลายข้างซ้ายมีอุณหภูมิเย็นลง ในทางกลับกันเมื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสก็จะทำให้อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสองกลับกันด้วย

จากการค้นพบของซีเบ็คและเพลเทียร์ การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัปเปิลได้ดำเนินต่อมา จนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิใช้อย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม เช่นในปัจจุบัน

3.1 เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตราฐาน นับตั้งแต่ซีเบ็ค ได้ค้นพบหลักการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลในปี 1821 เป็นต้นมารายละเอียดในหลักการได้ถูกพัฒนาให้ก้าวหน้าเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมมาโดยตลอด และได้เกิดเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตราฐานขึ้นหลายชนิดเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ

3.1.1 เทอร์โมคัปเปิลแบบ S (Type S Platinum 10% Rhodium V.S. Platinum)ในปี 1886 Le Chatelier ได้ประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิล โดยสายลบทำจาก พลาตินัม และสายบวกทำจากโลหะผสม 90 % ของพลาตินัม + 10 % ของโรเดียม สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1400°C ซึ่งต่อมาเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ได้กลายเป็นแบบ S, มาตรฐานสากล ตาม IPTS 68 ระบุว่าสามารถใช้

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ในการสอบเทียบค่า และเปรียบเทียบเป็นค่ามาตรฐาน (Calibration and Comparision) ตั้งแต่จุดแข็งตัวของแอนติโมนี (630.74 °C) จนถึงจุดแข็งตัวของทอง (1064.43 °C)

เทอร์โมคัปเปิลแบบ S นี้สามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Oxidizing และ Inert ได้ดีโดยสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1400 °C หรือกับการใช้งานในระยะเวลาสั้นๆ สามารถทนได้ถึง1482 °C แต่ไม่เหมาะสำหรับสภาวะงานที่เป็นแบบ Reducing, Vacuum หรือสภาพงานที่มีไอของโลหะ เช่น ตะกั่ว สังกะสี และไอของอโลหะ เช่น อาเซนิค ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส ซึ่งจะทำให้มีอายุการใช้งานสั้นลง ถ้าจำเป็นต้องใช้จะต้องป้องกันด้วย Protecting Tube ที่เป็นแบบอโลหะ เช่น อะลูมินาบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูงๆ เม็ดเกรนของพลาตินัมจะพองตัวและพลาตินัมก็จะเกิดสกปรก (Contamination) ได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงๆ ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าต่ำลง จากการวิเคราะห์ส่วนผสม (Composition) ภายหลังการใช้งาน 20 ปี ส่วนผสมของ โรเดียมจะเปลี่ยนสภาพเป็น พาลาเดียม ทำให้มีคุณสมบัติผิดไป การเปลี่ยนสภาพเช่นนี้จะเกิดกับเทอร์โมคัปเปิลทุกแบบที่มีส่วนผสมของโรเดียม

3.1.2 **เทอร์โมคัปเปิลแบบ** R (Type R Platinum 13 % Rhodium V.S. Platinum) เทอร์โมคัปเปิลแบบ R สายบวกทำจาก พลาตินัม สายลบทำจาก พลาตินัม 87 % + โรเดียม 13 % ผลที่ได้จะทำให้แบบ R ให้เอาท์พุทสูงกว่าแบบ S ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 1400 °C

3.1.3 **เทอร์โมคัปเปิลแบบ** B (Type B Platinum 30 % Rhodium/Platinum 6 % Rhodium) ผลิตขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1954 ในประเทศเยอรมัน สายบวกทำจากพลาตินัม สายบวกทำจากพลาตินัม 70 % + โรเดียม 30 % , สายลบทำจากพลาตินัม 94 % + โรเดียม 6 % เทอร์โมคัปเปิลแบบ B จะให้แรงเคลื่อนต่ำกว่าแบบ S และแบบ R แต่คุณสมบัติที่เด่นกว่าคือแข็งแรงและทนทานกว่า สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1704 °C (3100 °F) ในสภาวะที่เป็น Oxiding หรือ Inett แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานในสภาวะ Reducing หรือ Vacuum และในงานที่มีไอของโลหะและอโลหะเช่นเดียวกับแบบ R และแบบ S

3.1.4 **เทอร์โมคัปเปิลแบบ** J (Type J Iron V.S. Constantan) เนื่องจาก พลาตินัม เป็นธาตุที่มีราคาแพง เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลมีราคาถูกลงได้มีการค้นคว้าหาวัสดุที่มีราคาถูกกว่าเพื่อใช้แทนพลาตินัม วัสดุที่เริ่มทดลองใช้ เช่น เหล็ก นิเกิล นิเกิลบริสุทธิ์ เปราะมากในสภาพงานที่เป็น Oxidizing การทดลองต่อมาพบว่าโลหะผสมระหว่าง 60 % ของทองแดง + 40 % ของนิเกิล ที่ต่อมาเรียกว่า Constantan สามารถแก้ปัญหานี้ได้ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้สายบวกทำด้วยเหล็ก และสายลบทำด้วย Constantan จึงถือกำเนิดขึ้น และต่อมากลายเป็นแบบมาตราฐาน แบบ J

คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบ J เหมาะสำหรับสภาพงานที่เป็น Vacuum, Oxidizing. Reducing หรือ inert ที่อุณหภูมิไม่เกิน 760 °C ไม่เหมาะสำหรับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า °C และที่อุณหภูมิสูงกว่า 538 °C (1000 °F) สายที่เป็นเหล็กจะเกิด Oxidization ด้วยอัตราสูงกว่าปกติมาก สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่า 538 °C จะต้องใช้สายเทอร์โมคัปเปิลขนาดใหญ่จะช่วยให้อายุการใช้งานยืนยาวขึ้น จากการทดลองใช้งานภายใน 20 ปี พบว่าส่วนผสมของโลหะเทอร์โมคัปเปิลจะเปลี่ยนไป 0.5 % (แมงกานีสเพิ่มขึ้นในเนื้อเหล็ก)

3.1.5 **เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K Chromel V.S. Alumel)** เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่าจึงได้มีผู้ประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิลแบบใหม่ที่สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง นิเกิล 10 % + โครเมียม 90 % และสายลบทำจากโลหะผสมระหว่าง นิเกิล 95 % + 5 % ของส่วนผสมระหว่าง อะลูมิเนียม, แมงกานีส และซิลิกอน ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นแบบมาตรฐานแบบ K เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด สามารถใช้กับสภาวะงานที่เป็น Oxidizing หรือ Inert ได้ดีกว่าแบบอื่น สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260 °C (2300 °F) และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250 °C (420 °F) ในสภาพงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน แบบ K ก็สามารถใช้งานได้ดีเช่นกันคุณสมบัติที่เด่นมากของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K คือให้แรงเคลื่อนเอาท์พุทสูงกว่าแบบอื่นๆ

3.1.6 **เทอร์โมคัปเปิลแบบ T (Type T Copper V.S. Constantan)** เป็นเทอร์โมคัปเปิลแบบที่เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ สายบวกของ เทอร์โมคัปเปิลแบบ T ทำจากทองแดง และสายลบทำจาก Constantan ในสภาพการใช้งาน ปกติสามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำถึง -184 °C แต่อุณหภูมิทางบวกวัดได้ต่ำกว่าแบบอื่นๆ คือ ประมาณ 370 °C เท่านั้นเพราะที่อุณหภูมิสูงกว่า 370 °C อัตราการเกิด Oxide ของโลหะเทอร์โมคัปเปิลจะเพิ่มมากขึ้น เป็นแบบที่ทนการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีความชื้นได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Vacuum, Oxidizing. Reducing หรือ Inert ได้ดี การใช้งานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีโดยตรงจะทำให้ส่วนผสมของเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนไปได้ จึงไม่เหมาะกับงานลักษณะนี้ จากการทดลองใช้งานใน 20 ปี ส่วนผสมของนิเกิล และสังกะสี จะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 %

3.1.7 **เทอร์โมคัปเปิลแบบ E (Type E Chromel V.S. Constantant)** สายบวกทำจากส่วนผสมระหว่าง 10 % ของโครเมียม +90 % ของนิเกิล และสายลบทำจาก Constantan อุณหภูมิใช้งานปกติอยู่ระหว่าง –250 °C ถึง 871 °C เหมาะกับสภาพงานที่เป็น Oxidizing คุณสมบัติด้านอื่นๆ คล้ายกับเทอร์โมคัปเปิลแบบ K

แบบของเทอร์โมคัปเปิลที่กล่าวมานี้เป็นแบบมาตรฐาน แต่ในปัจจุบันได้มีการทดลองนำโลหะอีกหลายชนิด เช่น ทังสเตน รีเนียม (Rhynium) เออริเดียม (Iridium) มาประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิลแบบใหม่ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต่างไปจากแบบมาตรฐานที่มีอยู่ ซึ่งจะได้รับการจัดเข้าเป็นแบบมาตรฐานในอนาคตต่อไป

นิโครซิล–นิซิล (นิเกิล, โครเมียม, ซิลิกอน–นิเกิล, ซิลิกอน) คุณสมบัติช่วงอุณหภูมิใช้งานจาก –240 °C ถึง 1230 °C คุณสมบัติโดยทั่วไปเหมือนแบบ K แต่ให้อายุการใช้งานนานและมีเสถียรภาพดีกว่าแบบ K

พลาตินัม 20 % , โรเดียม 80 % - พลาตินัม 5 % , โรเดียม 95 %
พลาตินัม 40 % , โรเดียม 60 % - พลาตินัม 20 % , โรเดียม 80 %
พลาตินัม 13 % , โรเดียม 87 % - พลาตินัม 1 % , โรเดียม 99 %

} พัฒนามาจากแบบ R, S และ B ทำให้อายุการใช้งานนานกว่า และวัดอุณหภูมิได้สูงกว่า

พลาตินัม 15 % , เออริเดียม 85 % - พาลาเดียม ให้แรงเคลื่อนเอาท์พุทสูงกว่าแบบที่มีส่วนผสม พลาตินัมชนิดอื่นๆ

พลาตินัม 5 % , โมลิบดีนัม 95 % - 99.9 % , พลาตินัม 0.1 % ทำให้คุณสมบัติการรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อนได้ดีกว่าแบบที่มีส่วนผสมพลาตินัมชนิดอื่น

เออริเดียม 40 % , โรเดียม 60 % - โรเดียม สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1830 °C

ทังสเตน – ทังสเตน 74 % , รีเนียม 26 %

ทังสเตน 97 % , รีเนียม 3 % - ทังสเตน 75 % , รีเนียม 25 % สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 2760 °C

ทังสเตน 95 % , รีเนียม 5 % - ทังสเตน 74% , รีเนียม 26%

netแดง – ทอง 97.89 % , โคบอลท์ 2.11 % สำหรับวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำถึงจุด 0 °C สมบูรณ์ แต่ไม่เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศปกติ

โครเมล – ทอง 99.03 % , เหล็ก 0.07 % สำหรับการวัดอุณหภูมิที่มีค่าเป็นลบมากๆ ให้แรงเคลื่อนเอาท์พุทสูง และมีเสถียรภาพดี

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 7 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบของ Thermocouple แบบมาตรฐาน

แบบ	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ mV
		°C	°F	
B	พลาตินัม – 30% โรเดียม พลาตินัม – 6% โรเดียม	0 to 1820	32 to 3310	0 to 13.814
R	พลาตินัม – 13% โรเดียม พลาตินัม	- 50 to 1768	- 60 to 3210	- 02.26 to 21.108
S	พลาตินัม – 10% โรเดียม พลาตินัม	- 50 to 1768	- 60 to 3210	- 0.236 to 18.698
J	เหล็ก / คอนสแตนแตน	- 210 to 760	- 350 to 1400	- 8.096 to 42.922
K	โครเมล / อะลูเมล	- 270 to 1372	- 450 to 2500	- 6.458 to 54.875
T	ทองแดง / คอนสแตนแตน	- 270 to 400	- 450 to 750	- 6.258 to 20.869
E	โครเมล / คอนสแตนแตน	- 270 to 1000	- 450 to 1830	- 9.835 to 76.358

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ

ตาราง 8 แสดงสภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานโดยไม่ต้องใช้ protecting tube

	ความเหมาะสมในการใช้งาน						
TC แบบ	บรรยากาศ oxidizing	บรรยากาศ reducing	บรรยากาศ inert	vacuum	บรรยากาศ sulferous	อุณหภูมิ < 0° C	มีไอของโลหะ
B	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้ในช่วงสั้นๆ	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
R	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
S	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
J	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้	ไม่ได้ถ้า>500° C	ไม่ได้	ได้
K	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
T	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
E	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้

ใช้งานได้ดีกว่าแบบ E , J และ T เมื่ออุณหภูมิ > 550° C

\+ โดยเฉพาะกับอุณหภูมิ < 0° C

3.2 ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Hardware and Fabrication)

ส่วนประกอบที่สำคัญในการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลมีหลายส่วน แต่ละส่วนนับแต่ตัวเทอร์โมคัปเปิลเองและส่วนประกอบอื่นๆ ก็ได้รับการออกแบบ เพื่อให้เหมาะสมสะดวกกับสภาพการใช้งาน และให้อายุการใช้งานยืนยาว

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

3.2.1 ตัวเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Elements) หลักการเลือกวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลได้ถูกกำหนดตามความต้องการตามสภาพของงาน ส่วนผสมของโลหะที่ใช้ทำจะต้องไม่เปลี่ยน หรือสูญเสียธาตุส่วนผสมไปในเวลาอันรวดเร็ว จะต้องให้แรงเคลื่อนเอาท์พุทที่มีเสถียรภาพ (Stable) ในการใช้งานไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในช่วงเวลาใช้งาน มีความแข็งแรง และทนต่อสภาวะแวดล้อมในการใช้งานที่พิสูจน์ได้ตัวเทอร์โมคัปเปิล โดยปกติจะถูกเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า จุดต่อสำหรับวัด (Measuring Junction) และร้อยด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการลัดวงจรแบบที่มีใช้อยู่โดยทั่วไปในปัจจุบัน เป็นเทอร์โมคัปเปิล จุดต่อสำหรับวัดบิดเป็นเกลียว และเชื่อมปลายไว้ แสดงการเชื่อมปลายจุดต่อแบบ Butt Weld ซึ่งเป็นแบบที่ดีที่สุด จุดต่อบิดเป็นเกลียวและเชื่อมปลายไว้พันฉนวนด้วยใยหิน (Asbestos) ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ดี ปลายจุดต่อเป็นแบบ Butt Weld ร้อยติดกันด้วยฉนวนกระเบื้องแบบรูคู่ สามารถดัดโค้งได้บ้าง) ฉนวนเป็นแบบร้อยแยกกันทั้งสองเส้น เป็นเทอร์โมคัปเปิล 2 คู่ ร้อยติดกันด้วยฉนวนกระเบื้องแบบ 4 รู เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน

3.2.2 ครอบโลหะป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล (Metal Sheath) เพื่อให้สภาพของเทอร์โมคัปเปิลเรียบร้อยแข็งแรง พร้อมที่จะนำไปใช้งานคู่สายของเทอร์โมคัปเปิลจะต้องประกอบอยู่ภายใน Metal Sheath ลักษณะการประกอบตัวเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับ Metal Sheath มี 3 วิธี แต่ละวิธีก็มีลักษณะการใช้งานเฉพาะตัวของมัน คือ แบบเปลือยจุดต่อ (Wxposed) แบบใช้ Metal Sheath เป็นจุดต่อเทอร์โมคัปเปิล (Ground Junction) และแบบไม่ใช้ Metal Sheath เป็นจุดต่อ (Unground Junction) Metal Sheath ของเทอร์โมคัปเปิลแบบธรรมดาจะเป็นสเตนเลส ตีลชนิดต่างๆ ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ตั้งแต่ 843 °C (แบบ 304) ไปจนถึง 1053 °C (แบบ 309) สำหรับการวัดอุณหภูมิสูงกว่านั้น จะต้องใช้วัสดุอย่างอื่น เช่น

โมลิบดีนัม	สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 2200 °C
โมลิบดีนัม 50 % วีเนียม 50 %	สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 2400 °C
แทนตาลัม	สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 2480 °C

3.2.3 **ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล** (Thermocouple Insulators) ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล สำหรับกั้นตัวเทอร์โมคัปเปิล กับ Metal Sheath ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์ , อะลูมิเนียมออกไซด์ หรือ เบอรีลเลี่ยมออกไซด์ ลักษณะเดียวกับที่ใช้ในขดลวดทำความร้อน (Heater) ในปัจจุบัน วิธีการทำฉนวน คือ ใส่ผงอลูมิเนียมออกไซด์ ลงไปใน Metal Sheath ที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลอยู่แล้ว และบีบอัดทำให้ Metal Sheath มีขนาดเล็กลง เป็นการอัดอะลูมิเนียมออกไซด์ให้แน่น หลังจากนั้นจะถูกนำไปอบร้อนเป็นการคลายความเครียด

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

อันเนื่องมาจากการบีบอัดตัว Metal Sheath และเป็นการอบไล่ความชื้นที่มีอยู่ในตัว Sheath การทำฉนวนด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้ Thermocouple ที่กะทัดรัด แข็งแรง และสะดวกสำหรับการติดตั้งใช้งานฉนวนแบบกระเบื้อง (Ceramic) เป็นแบบที่ผู้ใช้งานเป็นผู้เลือกใช้เองตามสภาพงาน มีหลายแบบให้เลือกทั้งหมดรูปร่างและความยาวส่วนผสมของกระเบื้องฉนวน 99 % เป็น Al_2O_3 นอกจากนั้นเป็น Oxide ของสารต่างๆ เช่น SiO_2, MgO, Na_2, CaO, Fe_2O_3 คุณสมบัติของกระเบื้องฉนวน คือ เป็นตัวปิดกั้นแก๊ส และ vacuum ได้ดีเป็นพิเศษ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีแม้ที่อุณหภูมิสูงๆ ไม่ทำปฏิกิริยากับพลาตินัม ทังสเตนและโมลิบดีนัมที่เป็นส่วนผสมของตัว Thermocouple และสามารถทนอุณหภูมิใช้งานได้ถึง 1900°C

ตาราง 9 คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไป

คุณสมบัติ	ส่วนผสมหลัก		
	99.7% Al_2O_3	99% Al_2O_3	80 % Mullite 20 % Glass
การดูดซับน้ำ	0.00	0.00	0.00
ถ.พ.	3.85	3.7	24
เมื่อใช้กับแก๊ส	ไม่ให้แก๊สซึมผ่าน	ไม่ให้แก๊สซึมผ่าน	ไม่ให้แก๊สซึมผ่าน
ทนต่อแรงอัด (Psi)	300,000	300,000	100,000
ทนต่อแรงดึง (Psi)	30,000	30,000	14,000
Transverse Strength (Psi)	*55,000*	*55,000*	20,000
สัมประสิทธิ์การขยายตัว เมื่อได้รับความร้อน			
24°C - 250°C	6.2 x 10^{-6} หน่วย	6.6 x 10^{-6} หน่วย	———
24°C - 500°C	7.4 x 10^{-6} หน่วย	7.3 x 10^{-6} หน่วย	———
24°C - 1000°C	8.5 x 10^{-6} หน่วย	8.1 x 10^{-6} หน่วย	———
26°C - 1500°C	9.8 x 10^{-6} หน่วย	———	———

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 9 (do)

คุณสมบัติ	ส่วนผสมหลัก		
	99.7% Al_2O_3	99 % Al_2O_3	80 % Mullite 20 % Glass
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน			
24°C - 250°C	6.2 x 10^{-6} หน่วย	6.6 x 10^{-6} หน่วย	———
24°C - 500°C	7.4 x 10^{-6} หน่วย	7.3 x 10^{-6} หน่วย	———
24°C - 1000°C	8.5 x 10^{-6} หน่วย	8.1 x 10^{-6} หน่วย	———
26°C - 1500°C	9.8 x 10^{-6} หน่วย	———	———
การนำความร้อนโดยประมาณ (Btu/ ft^2/ hr/ °F/ in)			
24°C	230	210	16
800°C	60	50	———
ทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด	1950°C 3540°F	1950°C 3540°F	1650°C 3000°F
ค่าไดอีเล็กทริค คอนสเตนท์ (1 MC)	9.29	8.61	4.95
ค่า Dielectric strength (volt/mil)	230	250	250
ค่าความต้านทาน (Ohm cm)	10^{13}	10^{13}	———
ค่า Te	800°C	1100°C	———
ค่าความแข็ง (Mohs scale)	9	9	7
วิธีการสร้าง	Cast & Extrusion	Cast Extrusion	Extrusion

ฉนวนแบบอ่อนมีอยู่หลายประเภท เช่น ฝ้าย โพลีวินิล ไนลอน รายละเอียดเทียบพอสังเขปตามตารางด้านล่างนี้

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 10 รายละเอียดเปรียบเทียบฉนวนแบบอ่อน

ประเภทของฉนวน	อุณหภูมิที่ใช้ได้ตามปกติ	ทนทานต่อความชื้น	การเสื่อมสภาพจากการเสียดสี
ฝ้าย (Cotton)	94°C (200°F)	ไม่ดี	พอใช้
โพลีวินิล	105°C (200°F)	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม
อีนาเมลและฝ้าย	94°C (200°F)	พอใช้	พอใช้
ไนลอน	126°C (260°F)	ดี	ดี
เทฟลอน	204°C (400°F)	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม
โพลีไมด์	315°C (600°F)	ดีเยี่ยม	ดี
เทฟลอนและไฟเบอร์กล๊าส	315°C (600°F)	ดีเยี่ยม	ดี
แอสเบสทอสอัด	538°C (1000°F)	ไม่ดี	ไม่ดี

3.2.4 Protection Tubes จะทำหน้าที่หลักอยู่ 2 ประการ คือ เสริมความแข็งแรงทนทานให้ตัวเทอร์โมคัปเปิล และป้องกันการเสียหายของตัวเทอร์โมคัปเปิล จากสภาวะของการใช้งาน เช่น สารเคมีหรือการแผ่รังสีของแหล่งกำเนิดความร้อนของระบบ อันจะทำให้สารประกอบในตัวเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนไป คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลก็จะเปลี่ยนไปด้วยในสภาพงานที่ fluid เป็นสารกัดกร่อน มีความดันสูง หรือในบางโอกาสต้องการถอดตัวเทอร์โมคัปเปิลเพื่อการซ่อมบำรุงโดยไม่รบกวนการทำงานของระบบในกรณีเช่นนี้ Protection Well เป็นตัวกลางที่ช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยมันจะเป็นตัวกลางไม่ให้ fluid สัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิลโดยตรง และปิดกั้นความดันของระบบไม่ให้รั่วออกสู่ภายนอกได้ Protection tube มี 2 แบบ คือ แบบโลหะและอโลหะ แบบโลหะนั้น ในทางปฏิบัติอาจเรียกชื่อต่างกันไป เช่น เทอร์โมเวล (Themowells) หรือ Bulb ซึ่งก็มีความหมายเหมือนกัน โดยทั่วๆ ไป มีอยู่ 4 แบบ ส่วน อโลหะจะเป็นเนื้อเซรามิกส์

3.2.4.1 คาร์บอนสตีล สามารถใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงถึง 700°C (1300°F) เหมาะกับสภาพงานที่เป็น Oxidizing

3.2.4.2 ออสเตนิติค สเตนเลสสตีล (Austenitic Stainless Steel) ที่มีหมายเลขอนุกรม 300 เช่น 304, 305, 310 สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงจาก 900°C (1650°F) ถึง 1039°C (2000°F) และในสภาวะงานที่เป็น reducing ได้ดี

มหาวิทยาลัยราชภัฏวิไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ Rajabhat University

สำนักวิทยบริการสถาบันราชภัฏพิบูลสงคราม

3.2.4.3 เฟอร์ติค สเตนเลสสตีล (Ferritic Stainless Steel) ที่มีหมายเลขอนุกรม 400 เช่น 430, 446 ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 975°C ถึง 1150°C เหมาะกับงานที่มีสภาพเป็น Oxidizing และ Reducing

3.2.4.4 นิเกิลอัลลอย (High Nickel Alloy) นิโครม (Nichrome) และอินโคเนล (Inconel) สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 1150°C ในสภาวะ Oxidizing ได้

3.2.4.5 Protection tube แบบ เซรามิกส์ เหมาะสมกับเทอร์โมคัปเปิลที่มีส่วนผสมของพลาตินัม อุณหภูมิสูงเกินกว่า Protection Tube แบบโลหะจะทนได้ เป็นแก๊สสกปรกที่กัดกร่อน Protection Tube แบบโลหะ

เซรามิกส์ที่ใช้ส่วนใหญ่แล้วจะมี Mullite เป็นส่วนผสมที่สำคัญ ซึ่ง Mullite นี้จะเป็นตัวเสริม คุณสมบัติความแข็งแรงทนทาน ทางเชิงกล (Mechanical) และทางความร้อน (Thermal Shock) ดีมาก สามารถใช้อุณหภูมิได้ถึง 1650°C (3000°F)

ซิลิคอนคาร์ไบด์ใช้เป็น Protection Tube ภายนอกได้ดีในสภาพที่มีเปลวไฟ แต่จะต้องไม่มีแก๊สสกปรก หรือเป็นอันตรายต่อโลหะ เพราะแก๊สเหล่านี้จะรีมผ่านซิลิกอนคาร์ไบด์ได้ อะลูมินาหลอม (Fused Alumina) เป็นสารที่ใช้ทำ Protection Tube ได้ดีทั้งภายนอกและภายใน สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1980 °C (3600 °F) ไม่มีปัญหากับเทอร์โมคัปเปิลที่มีส่วนผสมของพลาตินัม หรือพลาตินัม-โรเดียม Protection Tube แบบเซรามิกส์ ปกติแล้วจะทนความดันของระบบได้ไม่สูงนัก นอกจากแบบพิเศษที่ระบุมา

3.2.5 Extension Wire เนื่องจากในการใช้งานจริง ระยะทางระหว่าง Measuring และ Reference Junction บางครั้งอยู่ห่างกัน สายเทอร์โมคัปเปิลมีราคาแพงมาก จึงต้องหาสายมาต่อในช่วงนี้ที่มีราคาถูกกว่า สายเทอร์โมคัปเปิล และมีคุณสมบัติทางการกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามอุณหภูมิ (Thermoelectric) เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิล ในช่วงอุณหภูมิไม่สูงนักสูงสุดของบรรยากาศ ที่จะเป็นไปได้ สายชนิดนี้เรียกว่า Extension Wire ในที่นี้จะเขียนถึง Extension Wire ที่ใช้กับเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานเท่านั้น สำหรับแบบไม่มาตรฐาน (nonstandard) นั้น จะต้องดูจากคู่มือ Extension Wire มี 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ทำจากสารประเภทเดียวกับตัวเทอร์โมคัปเปิล และแบบที่ 2 ทำจากโลหะต่างชนิดกับตัวเทอร์โมคัปเปิล

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ก
536.52
น37ก11
149441

ตาราง 11 แสดงการเปรียบเทียบ Extension wire สำหรับ Thermocouple แบบมาตรฐาน

เทอร์โมคัปเปิล แบบ	Extension Wire แบบ	Extension Wire		อุณหภูมิใช้งาน F	ค่าผิดพลาด F		ตรวจได้ด้วยแม่เหล็ก		ตามมาตรฐาน ANSI	
		สายบวกทำด้วย	สายลบทำด้วย		แบบมาตรฐาน	แบบพิเศษ	สายบวก	สายลบ	สายบวกสี	สายลบสาย
E	1	NiCr(Chromel)	Constantan	32 ถึง 400	±3	-	-	-	ม่วง , น้ำตาล	แดง
J	1	เหล็ก	Constantan	32 ถึง 400	±4	±3	ได้	-	ขาว , น้ำตาล	แดง
K	1	NiCr(Chromel)	NiAl(Alumel)	32 ถึง 400	±4	-	-	ได้	เหลือง , น้ำตาล	แดง
T	1	ทองแดง	Constantan	-75 ถึง 200	±17	±½	-	-	น้ำเงิน , น้ำตาล	แดง
R	2	ทองแดง	ทองแดง	75 ถึง 400	±12	-	-	-		
S	2	ทองแดง	ทองแดงผสม	75 ถึง 400	±12	-	-	-		
B	2	ทองแดง	ทองแดง	32 ถึง 200	-					

Extension Wire เป็นตัวนำไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกเปลี่ยนแปลงอาจเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำทำให้ค่า mV ที่วัดได้ผิดไป

3.2.6 **ส่วนประกอบอื่นๆ** ส่วนประกอบอื่นๆ ก็มีความสำคัญ ที่อาจก่อให้เกิดค่าผิดพลาดได้ โลหะที่มีปรากฏอยู่ในวงจรเทอร์โมคัปเปิล จะต้องพิจารณาอย่างละเอียดถ่องแท้ และจะต้องเอาใจใส่ในการเลือกใช้วัสดุพวกนี้ให้ถูก เช่น spade luge, ข้อต่อแบบ quick disconnected, ที่เสียบบนแผงแบบ color coded *strip,* selector switch และ terminal block ชุดแผงเสียบ สำหรับเทอร์โมคัปเปิลออกแบบให้สะดวกต่อการใช้งานและติดตั้งง่าย แต่ละชนิดจะมีรหัสสีเหมือนกับ quick disconnected connectors แบบที่กล่าวมานี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องถอดหรือเสียบเข้าใช้งานบ่อยๆ แต่สำหรับงานที่ต้องต่ออย่างถาวรแล้ว ต้องใช้ terminal block ตามรูป ซึ่งโลหะที่เป็นตัวเชื่อมมีให้เลือกใช้เฉพาะกับโลหะแบบต่างๆ ของเทอร์โมคัปเปิล

3.3 **ช่วงเวลาตอบสนองของการวัดอุณหภูมิ (Response time)**

เครื่องมือวัดอุณหภูมิทุกชนิด มีช่วงเวลาหน่วง คือ อุณหภูมิที่ชี้บอกจะช้ากว่าอุณหภูมิจริง เนื่องจากต้องรับ หรือคายความร้อน ความร้อนผ่านตัว Protection tube - Sheath - ฉนวน ก่อนจึงจะถึงตัววัดอุณหภูมิ ความเร็วของการวัดอุณหภูมิขึ้นอยู่กับ First Order Thermal time constant.

$$\tau = \frac{w\ Vc}{hA} \quad \text{..... ... *}$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

เมื่อ τ เป็นค่า time constant มีหน่วยเป็น วินาที , w เป็นค่าน้ำหนักจำเพาะ , V เป็นค่าของปริมาตร , C เป็นค่าความร้อนจำเพาะ, h เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และ A เป็นพื้นที่รับความร้อน

การเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิในระบบ พอจะแบ่งออกเป็น 2 อย่าง คือ แบบเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เป็นสัดส่วนกับเวลา (ramp) และการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (step) เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ ramp อุณหภูมิของตัววัดจะขึ้นช้ากว่าอุณหภูมิจริงในระบบมากกว่า 4τ เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ step อุณหภูมิของตัววัดจะขึ้นช้ากว่าอุณหภูมิจริง และขึ้นในรูปของ Exponential ค่า time constant คือค่าเวลาที่ตัววัดใช้ชี้บอกเมื่อ 63.2 % ของอุณหภูมิจริงในระบบ ตัววัดจะใช้เวลามากกว่า 5τ ในการขึ้นถึงค่า 100 % ของอุณหภูมิจริง ทั้งนี้ปัจจัยของ Response ของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับ ขนาดสายของเทอร์โมคัปเปิล การเชื่อมจุด Measuring Junction bulb or wellส่วนที่เป็นช่องว่าง (ari space) ความเร็วในการไหลของ fluid ความหนาแน่นของ Fluid และการติดตั้งที่ถูกต้อง จะช่วยให้ผลการวัดรวดเร็วและถูกต้องยิ่งขึ้น

3.4 **ความผิดพลาดเนื่องจากการนำความร้อน** (Conduction Errors in TC) ในการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิในช่วงต่ำจาก 0 °C ถึง 150 °C จำเป็นต้องสอดไส้เทอร์โมคัปเปิล เข้าไปสัมผัสอยู่กับ fluid นั้น ลึกพอสมควรเพราะถ้าไม่ลึกพอ จะได้ค่าอุณหภูมิต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากนำความร้อนออกสู่ภายนอกของตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง จากการทดลองวัดอุณหภูมิของอากาศในช่วง 60 °C ถึง 150 °C (อุณหภูมิในช่วงนี้มีการสูญเสียความร้อนของตัวเทอร์โมคัปเปิล เนื่องจากการแผ่รังสีน้อยมาก) ไหลในท่อด้วยความเร็วประมาณ 2.5 เมตรต่อวินาที และ 10 เมตรต่อวินาที ด้วยเทอร์โมคัปเปิลแบบ K และแบบ T ผลที่ได้ตามกราฟในสายเทอร์โมคัปเปิลขนาดเล็กจะให้ผลถูกต้องมากกว่า เพราะมีค่าการนำความร้อนออกน้อยกว่าสายขนาดใหญ่ เทอร์โมคัปเปิลแบบ K จะเกิดค่าผิดพลาด เนื่องจากการนำความร้อนน้อยกว่าแบบ T ที่ขนาดสายเท่ากัน ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดจากการนำความร้อนออกของเทอร์โมคัปเปิลเองควรใช้สายขนาดเล็กและสอดไส้ตัวเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปให้ลึกเกิน 50 mm. ขึ้นไป

ความผิดพลาดในการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล อาจเกิดขึ้นได้หลายแห่ง เช่น extension wire จุดต่อต่างๆ ในการต่อคู่สาย extension wire จะต้องระมัดระวังมิให้ผิดพลาดโดยการสลับสายทั้งที่ตัวเทอร์โมคัปเปิล และอุปกรณ์อ่านค่ามิลลิโวลท์ หรือตัวทรานสมิตเตอร์ สาย Shield รอบ Extension Wire ก็จะต้องได้รับการต่อลง Ground อย่างถูกวิธี เพราะค่าแรงเคลื่อนที่เกิดจากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าน้อยอยู่ในย่านมิลลิโวลท์เท่านั้น และถ้าลากสาย Extension wire ยาว

ขึ้น โอกาสที่จะได้รับการเหนี่ยวนำจากสายไฟฟ้าอื่นๆ ที่มีกระแสสลับไหลอยู่ก็มีมากขึ้นจะทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นได้ ตามจุดต่อต่างๆ ต้องให้มีน้อยจุดที่สุดและเป็นวัสดุที่เลือกตามข้อแนะนำของทางบริษัทผู้ผลิต ถ้าจุดต่อยาว และอุณหภูมิปลายจุดต่อไม่เท่ากัน ความผิดพลาดจะเกิดขึ้น ความผิดพลาดจะเกิดขึ้น เพราะขัดกับกฎของไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อน (Thermoelectric Law) "ข้อโลหะแทรก"

ตาราง 12 แสดงช่วงอุณหภูมิของการสอบเทียบค่าของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานและค่าผิดพลาดที่อยู่ในพิกัด

เทอร์โมคัปเปิลแบบ	ย่านอุณหภูมิ °C	ค่าผิดพลาดในพิกัด		ขนาดสายที่เล็กที่สุด (AWG)
		แบบมาตรฐาน (เอาค่าที่มากกว่า)	แบบพิเศษ (เอาค่าที่มากกว่า)	
B	870 to 1700	±0.5%		24
R&S	0 to 1450	±1.5°C or ±0.25%	±0.6°C or ±0.1%	24
J	0 to 750	±2.2°C or ±0.75%	±1.1°C or ±0.4%	8
K	0 to 1250	±2.2°C or ±0.75%	±1.1°C or ±0.4%	8
T	0 to 350	±1°C or ±0.75%	±0.5°C or ±0.4%	14
E	0 to 900	±1.7°C or ±0.5%	±1°C or ±0.4%	8
	ย่าน < 0°C			
K	-200 to 0	±2.2°C or ±20%		
T	-200 to 0	±1°C or ±1.5%		
E	-200 to 0	±1.7°C or ±1%		

ตามตารางนี้เป็นค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ ค่าผิดพลาดในช่วงอุณหภูมิสูงเกินกว่าย่านอุณหภูมินี้ ค่าผิดพลาดมิได้ระบุไว้

4. **วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองเนื้อดินปั้น**

4.1 **ดินขาว** (Kaolin) หมายถึง ดินที่มีสีขาวหรือขีดจางทั้งในสภาพที่ยังไม่ได้เผาและเผาแล้ว ดินขาวมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ดินกลุ่ม Kaolinite และมีความสัมพันธ์กับมัสโคไวต์ ไมก้า อิลไลต์ ควอตซ์ และอาจมีมอนต์มอริลโลไนต์ (ปรีดา พิมพ์ขำขาว. 2535 : 44)

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ดินขาวมีแหล่งกำเนิดตามบริเวณที่ราบสูง ตามภูเขาที่มีแหล่งแร่หินฟันม้า (Feldspar) เมื่อหินฟันม้าเกิดการผุพังจากความชื้น ก็จะกลายสภาพเป็นดินขาว ปฏิกิริยาการเปลี่ยนสภาพหินฟันม้าเป็นดินขาวเรียกว่า ปฏิกิริยา "Kaolinization" (โกมล รักษ์วงศ์. 2531 : 9) ดินขาวที่เกิดในที่ราบสูง เนื้อดินหยาบมีความทนไฟสูง ถึง 1,800 องศาเซลเซียส นำมาขึ้นรูปโดยตรง ยากแก่การทรงตัวและมีความเหนียวน้อย การนำไปใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผา ต้องนำไปผสมกับวัตถุดิบอื่นๆ เป็นดินที่มีการหดตัวน้อย พบในธรรมชาติเป็นดินสีขาวหม่น ซึ่งประโยชน์ของดินขาวใช้เป็นวัตถุดิบทำอุตสาหกรรมชนิดอื่นๆ อีก เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อาหารสัตว์ อุตสาหกรรมวัตถุทนไฟ และทวี พรหมพฤกษ์ (2523 : 66–67) กล่าวว่า ดินขาวหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง เป็นดินขาวชนิดดี เท่าที่พบแห่งแรกในประเทศไทยมีอะลูมิน่าสูง (Alumina) และมีปริมาณของเหล็ก (Iron Oxide) น้อยเหมาะสำหรับผสมทำเนื้อดินปั้น ที่ต้องการความขาวมาก

กระบวนการเกิดดินขาว (Kaolinization) มีขั้นตอนของปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้ (Singer. 1960 : 12)

1. Hydrolysis $K_2O.Al_2O_3.6SiO_2 + 2H_2O \longrightarrow Al_2O_3.6SiO_2.H_2O + 2KOH$
   Feldspar
2. Desilication $Al_2O_3.6SiO_2.H_2O \longrightarrow Al_2O_3.4SiO_2.H_2O + 2SiO_2$
   Pyrophyllite
3. Desilicate $Al_2O_3.6SiO_2.H_2O \longrightarrow Al_2O_3.2SiO_2.H_2O + 4SiO_2$
4. Hydration $Al_2O_3.2SiO_2.H_2O \longrightarrow Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$
   Kaolinite
5. Desilication $Al_2O_3.2SiO_2.H_2O \longrightarrow Al_2O_3.H_2O + 2SiO_2$
   Diaspore
6. Hydration $Al_2O_3.H_2O + 2H_2O \longrightarrow Al_2O_3.3H_2O$
   Gibbsite

เราสามารถจำแนกดินขาว ตามลักษณะการเกิดได้ 3 แบบด้วยกัน (ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาภาคเหนือ. ม.ป.ป. : 10) คือ

1. แบบที่เกิดอยู่ที่เดิม (Residual Clay) ได้แก่ ดินขาวที่อยู่ในตำแหน่งเดิม ซึ่งมีการผุพังอยู่กับที่ หินเดิมอาจจะเป็น แกรนิต ไรโอไรต์ เพกมาไทต์ อัลไบต์ หรือหินอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ดินขาวจากแหล่งแร่ดีบุกทางภาคใต้

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

2. แบบที่ถูกพัดพาไปจากแหล่งกำเนิด (Transported Clay) เกิดจากดินขาวในแบบแรกและถูกกระแสน้ำพัดพาไปสะสมตัวยังแหล่งใหม่

3. แบบที่ได้มาจากการแทนที่ด้วยน้ำร้อน (Hydrothermal Replacement) ได้แก่ ดินขาว ที่พบบริเวณแหล่งน้ำแร่แบบน้ำร้อน

คุณสมบัติทางกายภาพของแร่ดินขาว การทราบ คุณสมบัติทางกายภาพของแร่ดินขาว จะช่วยทำให้เราสามารถ ทำนายคุณสมบัติของเนื้อดินปั้น ซึ่งมีแร่ดินเหล่านั้นผสมอยู่ได้ดีพอสมควร คุณสมบัติที่เราควรจะได้ศึกษา (ปรีดา พิมพ์ขาวรำ. 2535 : 53-54) คือ ขนาด (Particle Size) คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากอันหนึ่ง เพราะว่ามันเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางด้านความเหนียว (Plasticity) ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Dry Strength) ความสามารถแลกเปลี่ยนอนุมูล และการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) กล่าวโดยทั่วไป ดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าดินเม็ดหยาบ

รูปร่าง (Particle Shape) ของแร่ Kaolinite อนุภาคของมันมีรูปร่างเป็น แผ่นหกเหลี่ยม มีขนาดจาก 0.05 ถึง 10 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base Exchange Capacity) คุณสมบัติข้อนี้สำหรับแร่ Kaolinite มีน้อยมาก

คุณสมบัติเมื่อแห้ง (Drying properties) การหดตัวเมื่อแห้งของแร่ดินล้วนๆ เราไม่ค่อยสนใจ เพราะว่าเนื้อดินปั้นมักประกอบด้วยแร่หลายอย่าง แต่อาจกล่าวได้กว้างๆ ว่าดินที่ละเอียดกว่า มีการหดตัวมากกว่าดินหยาบเมื่อปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง

ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Green Strength) คุณสมบัตินี้สำคัญมากโดยเฉพาะเมื่อจะนำแร่ดินขาวไปใช้ในเนื้อดินปั้น ซึ่งไม่มีดินเหนียวอยู่เลย เพราะว่า ดินขาวเท่านั้นที่จะเป็นตัวช่วยให้ผลิตภัณฑ์ดิบมีความแข็งแรงมากน้อยเพียงไร

คุณสมบัติหลังจากเผา (Firing Properties) แร่ดินขาว มีการหดตัวมากหลังการเผา ไม่ควรใช้แร่ดินขาวล้วนเป็นเนื้อดินปั้น แร่ดินขาว เมื่อเผาแล้วจะหดตัวประมาณ 20%

แหล่งดินขาวในประเทศไทย ทวี พรหมพฤกษ์ (2523 : 66-68) ได้รวบรวมแหล่งดินขาวที่สำคัญ ในประเทศไทย ที่นิยมใช้กันในวงการอุตสาหกรรมเซรามิกส์ พร้อมทั้งรายละเอียดต่างๆ ไว้ดังนี้

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

1. ดินขาวลำปาง จากการสำรวจพบว่า เป็นดินขาวที่เกิดจากการผุพัง สลายตัวของแร่เฟลด์สปาร์ แต่การสลายตัวยังไม่สมบูรณ์ ทำให้ปริมาณของหินแข็งปะปนอยู่มาก แต่เป็นดินขาวที่สามารถขึ้นรูปทรงได้ โดยไม่ต้องผสมกับวัตถุดิบชนิดอื่น เป็นดินที่ได้จากเขาปางขาม อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง ซึ่งมีจุดสุกตัวที่อุณหภูมิ 1690 องศาเซลเซียส (3074 องศาฟาเรนไฮต์)

2. ดินขาวระนอง พบในบริเวณเหมืองดีบุก เกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิตมาเป็นดินขาวปะปนอยู่กับหินควอตซ์ หินแกรนิตและแร่ดีบุก ผู้ผลิตดินขาวแหล่งนี้เป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองแร่ดีบุก ในขณะฉีดน้ำ เพื่อแยกแร่ออกจากหิน ตามภูเขา ดินขาว จะละลายออกมากับดีบุก ไหลตามน้ำมาด้วย จะตกอยู่ตามราง ที่น้ำไหลผ่าน แล้วแยกดินขาว ออกจากหินและทราย ที่ติดมาโดย ใช้เครื่องมือ ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ปล่อยให้ดินจมตัวอยู่ในบ่อพัก แล้วสูบเข้าเครื่องอัดดินเป็นแผ่นใช้งานต่อไป ดินขาวชนิดนี้เป็นดินขาวชนิดดีเท่าที่พบแห่งแรกในประเทศไทยมีอะลูมินาสูงและมีปริมาณของเหล็กน้อย เหมาะสำหรับผสมทำเนื้อดินปั้นและน้ำเคลือบได้ดีมีจุดสุกตัวที่อุณหภูมิ 1780 องศาเซลเซียส (3245 องศาฟาเรนไฮต์) ซึ่งผู้วิจัยใช้ดินขาวระนอง บริษัทเซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด เป็นวัตถุดิบในการทำวิจัยครั้งนี้ มีผลวิเคราะห์ทางเคมี คือ

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	LOI
44.85	0.07	37.98	0.97	0.06	0.12	1.23	0.04	13.94

3. ดินขาวระยอง พบบริเวณเนินเขา ตำบลบ้านนา อำเภอแกลง จังหวัดระยอง ดินขาวแหล่งนี้มีปริมาณธาตุเหล็กน้อยแต่มีความเหนียวน้อยการนำมาขึ้นรูปทำได้ยากมักแตกเสียหายมาก

4. ดินขาวสุราษฎร์ เกิดในบริเวณเหมืองดีบุก ตำบลพรุพลี อำเภอบ้านนาสาร ดินขาวแหล่งนี้มีโรงงานนำมาทำเครื่องปั้นดินเผา มีความเหนียวดี ขึ้นรูปง่าย แตกหักเสียหายน้อย แต่เนื่องจากมีปริมาณของธาตุเหล็กสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่ขาวเท่าที่ควร จึงหมดความนิยมที่จะนำมาทำผลิตภัณฑ์ ได้มีโรงงานโอ่งเคลือบจังหวัดราชบุรี ใช้ดินขาวจากแหล่งนี้มาตกแต่งลายมังกรและลวดลายต่างๆ อยู่ในปัจจุบัน

5. ดินขาวชลบุรี เป็นดินขาวจำพวกหินดินดาน (Shale) เกิดบนไหล่เขาริมชายทะเล ตำบลหาดยาว ตำบลหาดสอ และตำบลทุ่งโปร่ง อำเภอสัตหีบ เมื่อเผาแล้วเนื้อดินจะเป็นสีน้ำตาลไม่ขาว และไม่มีความเหนียวต้องนำไปผสมดินเหนียวจึงจะขึ้นรูปได้

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี@สงฆ์ศาสตร์ Phetchaburi Rajabhat University

นอกจากนี้กรมทรัพยากรธรณี (2526 : 213) ได้สรุปแหล่งดินขาวในประเทศไทยว่าพบที่ เชียงราย เชียงใหม่ ลำปาง แพร่ ตาก สุโขทัย อุตรดิตถ์ พิจิตร ชลบุรี ชุมพร ระนอง พังงา ภูเก็ต สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา ยะลา และนราธิวาส

4.2 อะลูมินา (Alumina)

อะลูมินา เป็นวัตถุดิบที่ใช้มากในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ อะลูมินาบริสุทธิ์ จะได้จาก คอรันดัม (Corundum) นอกจากนี้จะได้จากบอกไซต์ (Bauxite) ไดอะสปอร์ (Diaspor) ยิบไซต์ (Gibbsite) และการเผาอะลูมิเนียมไฮเดรต (Aluminium Hydrate) สูตรทางเคมีของ อะลูมินา คือ Al_2O_3 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 102 (Nelson. 1960 : 305) อะลูมินา จะมีจุดหลอม ละลายประมาณ 2050 องศาเซลเซียส (3722 องศาฟาเรนไฮต์) อะลูมินาเป็นสารทนความร้อน (Refractory) ใช้มากในอุตสาหกรรมวัตถุทนไฟ ปกติอะลูมินาจะมีความแข็งในระดับ 8 สามารถ นำไปใช้ทำวัตถุขัดถู (Abrasive) โดยเฉพาะผลึกที่อยู่ในรูปของ คอรันดัม ซึ่งในธรรมชาติคอรันดัม มีความแข็งแรงมาก อาจอยู่ในรูปของพลอย (Gem Stone) และพลอยเทียมมีออกไซด์อื่นๆ ผสม อยู่เพียงเล็กน้อย การนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาจะบดให้เป็นผงสีขาว ซึ่งมีจุดหลอม ตัวสูงถึง 2050–2240 องศาเซลเซียส (3722–4064 องศาฟาเรนไฮต์) อะลูมินาเป็นสารที่มี ความเฉื่อย (Inert) และทนต่อปฏิกิริยาของกรดและด่าง อีกทั้งเป็นวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง ชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ โดยจะมีส่วนผสมอื่นๆ บ้างเล็กน้อย เช่น โซเดียมออกไซด์ ร้อยละ 0.1 – *0.2* แคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 0.1 นอกจากนี้ยังมีเหล็กออกไซด์อยู่เพียงเล็กน้อย (โกมล รักษ์วงศ์. 2531 : 30) ซึ่งผู้วิจัยใช้ อะลูมินา ของบริษัท เซอรันิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด เป็นวัตถุดิบในการทำวิจัยครั้งนี้ มีผลวิเคราะห์ทางเคมี คือ

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	LOI
99.60	0.02	0.02	0.35	0.10

สารที่ให้อะลูมินา (สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์. 2531 : 11–2) ได้แก่

อะลูมิเนียมไฮเดรต (Aluminium Hydrate) สูตรทางเคมี คือ $Al(OH)_3$ เมื่อผ่านการเผา (Calcine) แล้วจะได้อะลูมินา สารประกอบทั้งสองรูปนี้มีความบริสุทธิ์สูง แต่นิยมใช้ในรูปของ อะลูมิเนียมไฮเดรตมากกว่า เพราะมีคุณสมบัติทำให้เคลือบลอยตัวได้ดี และการเกาะติดผิวผลิต ภัณฑ์ก็ดีด้วย แต่อาจทำให้เกิดผิวเคลือบทึบหรือเป็นเคลือบด้านได้

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ดิน (Clay) มีสูตรทางเคมี คือ $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ ดินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในน้ำเคลือบ เพราะว่าช่วยทำให้เคลือบลอยตัวไม่ตกตะกอนง่าย ช่วยให้น้ำเคลือบเกาะติดกับผิวผลิตภัณฑ์ได้ดี ช่วยควบคุมการหดตัวของน้ำเคลือบบนผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้เผา และเป็นตัวให้อะลูมินาและซิลิกา (SiO_2) แก่น้ำเคลือบตัวหนึ่ง ดินที่นิยมใช้ ได้แก่ ดินขาว

อะลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นสารประกอบที่มีอยู่ในธรรมชาติทั้งในลักษณะสารประกอบเดี่ยว และสารประกอบแร่ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและนับวันจะมีบทบาทมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในงานเซรามิกส์ยุคใหม่ อะลูมินาได้ชื่อว่าเป็นวัสดุมหัศจรรย์ที่เดียว ทั้งนี้ด้วยคุณสมบัติที่พิเศษหลายประการ เช่น ทนความร้อนสูง มีความแข็งแรงมาก ความแข็งอยู่ในระดับสูง เป็นต้น จึงใช้มากในอุตสาหกรรมวัตถุทนไฟ (Refractory) วัสดุขัดถู (Abrasive) และเป็นส่วนประกอบหลักของเนื้อดินปั้นทุกชนิดที่มีดิน หรือ เฟลด์สปาร์เป็นวัตถุดิบของส่วนผสม เนื่องจากวัตถุดิบทั้งสองชนิดนี้มีอะลูมินาเป็นสารประกอบหลัก ดังนั้นในผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาทุกประเภทจึงมีอะลูมินาอยู่ด้วยเสมอ เนื้อเซรามิกส์บางชนิดใช้อะลูมินามากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมักจะเรียกว่า เนื้อดินปั้น ไฮ-อะลูมินา (High Alumina Body)

โครงสร้างของอะลูมินา (Structure of Alumina)

สูตรทางเคมีของอะลูมินาคือ Al_2O_3 มีน้ำหนักโมเลกุล 101.94 ซึ่งในธรรมชาติเป็นสารประกอบเดี่ยว ของคอรันดัม (Corundum) และเป็นสารประกอบไฮเดรตของบอกไซต์ (Bauxite) ไดอะสปอร์ (Diaspore) ยิบบ์ไซต์ (Gibbsite) ในโครงสร้างของอะลูมินาจะมีรูปผลึกอยู่ 2 ลักษณะใหญ่ คือ α-Al_2O_3 และ γ-Al_2O_3 ในบางครั้งอาจเป็น β-Al_2O_3 ได้ เมื่อผสมกับโซเดียมออกไซด์เป็น Na_2O. 11-12 Al_2O_3 ซึ่งเป็นอะลูมินาเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วๆ ไป (Commercial Grade) α-Al_2O_3 เป็นรูปผลึกของอะลูมินาที่มีคุณสมบัติคงที่ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนไป ส่วน γ-Al_2O_3 นั้น มักจะเป็นพวกสารประกอบไฮเดรตซึ่งถ้าได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะสูญเสียน้ำในโครงสร้างและเมื่อเพิ่มความร้อนถึงอุณหภูมิ 1150-1200 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนรูปร่างเป็น α-Al_2O_3

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 13 แสดงการเปลี่ยนรูปผลึกของอะลูมินาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

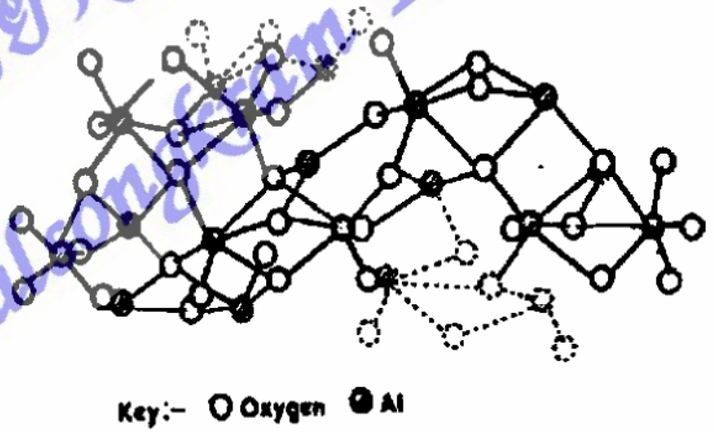
(Sonja S. Singer. 1960 :114)

γ-Series (Low Temperature)	Composition	α-Series (High Temperature)
Gibbsite, Hydraygillite	$Al_2O_3. 3H_2O$	Bayerite
Bauxite	$Al_2O_3. H_2O$	Diaspore
γ-Alumina	Al_2O_3	Corundum

ตาราง 14 รูปผลึกของแร่ต่างๆ เป็นสารประกอบอะลูมินาและอะลูมินาไฮเดรต

(Sonja S. Singer. 1960 :114)

สูตรทางเคมี	ชื่อแร่	สัญลักษณ์ของอังกฤษ	สัญลักษณ์ของอเมริกา
Al_2O_3	Corundum	a	α
Al_2O_3		γ	γ
$Al_2O_3. H_2O$	Boehmite	γ	α
$Al_2O_3. H_2O$	Diaspore	α	β
$Al_2O_3. 3H_2O$	Gibbsite	γ	α
$Al_2O_3. 3H_2O$	Bayerite	α	β



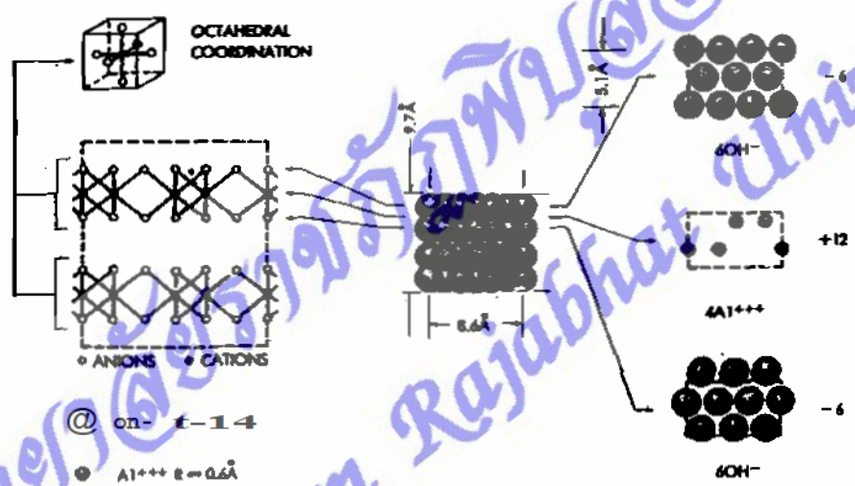
ภาพประกอบ 2 แสดงโครงสร้างของแร่ α-Al_2O_3 จากแร่คอรันดัม (W.E. Worrall. 1964 : 92)

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 15 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของอะลูมินาทั้งชนิด γ-Al_2O_3 และ α-Al_2O_3

(Sonja S. Singer. 1960 : 115)

คุณสมบัติ	γ-Alumina	α-Alumina
ความถ่วงจำเพาะ (S.G.)	3.5-3.9	4.0
รูปผลึก (Crystalline From)	เฮกซะโกนอล	ไตรโกนอล
น้ำหนักโมเลกุล (M.W.)	101.94	101.94
จุดหลอมละลาย (M.P.)	2050°C	2050°C
จุดเดือด (B.P.)	2250°C	2250°C
ละลายที่อุณหภูมิ 29°C	0.000098	0.000098



ภาพประกอบ 3 แสดงโครงสร้างหนึ่งหน่วยเซลล์ของยิบบ์ไซต์ γ $[Al(OH)_3]3$

(F.H. Norton. 1952 : 14)

วัตถุดิบที่มีอะลูมินาเป็นสารประกอบ

1. **แร่คอรันดัม หรือกะรุน** (Corundum) สูตรทางเคมี คือ Al_2O_3 มีรูปผลึกระบบเฮกซะโกนอล เป็นรูปหกเหลี่ยม มีหลายสี ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นเครื่องประดับ เช่น สีแดงหรือสีม่วงจะเรียกว่าทับทิม (Ruby) สีฟ้าหรือน้ำเงิน เรียกว่า เซปไฟร์ (Sapphire) เป็นต้น มีความแววววา

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

คล้ายกับเพชร ความแข็งระดับ 9 ความถ่วงจำเพาะ 4.0-4.1 มีทั้งโปร่งแสงและโปร่งใส ส่วนมากจะพบในหินแปร เช่น หินปูนที่เป็นผลึกหรือหินเปกมาไทต์ ในประเทศไทยพบแร่นี้เกิดในหินบะซอลต์ ที่จันทบุรี ตราด กาญจนบุรี แพร่ เพชรบูรณ์ และศรีสะเกษ ต่างประเทศพบมากที่พม่า ศรีลังกา ออสเตรเลีย สหรัฐอเมริกา กรีซ และอาฟริกาใต้ เป็นต้น

2. **หินบอกไซต์** (Bauxite) เป็นชื่อเรียกตามแหล่งที่พบ คือ เมืองบอกซ์ (Baux) ในประเทศฝรั่งเศส เป็นสารผสมลักษณะเม็ดกลมๆ ขนาดเท่าเม็ดถั่วเรียวถึงผลส้ม เนื้อสมานแน่นเหมือนกับดิน มีความแข็งระดับ 1 ความถ่วงจำเพาะ 2-2.5 มีสีขาว เทา เหลืองและแดง ปกติสีจะคล้ายสนิมเหล็ก มักเกิดในแถบภูมิอากาศเขตร้อน โดยมีการผุสลายของซิลิกา หรืออัลคะไลส์ที่ปะปนอยู่ออกไป ซึ่งอาจเกิดจากแร่ดินหรือเฟลด์สปาร์ก็ได้ หินบอกไซต์นี้ใช้เป็นวัตถุดิบที่มี Al_2O_3 อยู่ระหว่าง 60-80 เปอร์เซ็นต์ สิ่งเจือปนที่มักพบในบอกไซต์ คือ SiO_2, Fe_2O_3 และ TiO_2 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่พบ ในหินบอกไซต์ประกอบด้วยแร่ยิบบ์ไซต์ แร่เบอห์ไมต์ และไดอะสปอร์ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้ง 3 ชนิด

ตาราง 16 แสดงคุณสมบัติของแร่ประกอบหินบอกไซต์
(อุบลศรี ชัยสาม และเยาวลักษณ์ นิสสภา. 2526 : 28)

ชนิดของแร่ประกอบหินบอกไซต์	เปอร์เซ็นต์ Al_2O_3	เปอร์เซ็นต์ H_2O	ระดับความแข็ง	ความถ่วงจำเพาะ
แร่ยิบบ์ไซต์ ($Al_2O_3 . 3H_2O$)	65.4	34.6	2.3-3.5	2.3-2.4
แร่เบอห์ไมต์ ($Al_2O_3 . H_2O$)	85.0	15.0	3.5-5.0	3.01-3.06
แร่ไดอะสปอร์ ($Al_2O_3 . H_2O$)	85	15	6.5-7	3.3-3.5

ตาราง 17 แสดงคุณสมบัติของบอกไซต์ที่ผลิตจำหน่ายจากแหล่งต่างๆ (อุบลศรี ชัยสาม และเยาวลักษณ์ นิสสภา. 2526 : 29-30)

แหล่ง	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	H_2O	S.G.
China	89.0	6.0	3.3	1.2	0.05	3.15
USA	70.5	25.3	2.7	1.4		2.85
Guyana	88.3	6.5	3.2	1.8	0.25	3.1
Vietnam	36-39	5-9	4-9	25-29		

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

อะลูมินาที่นำมาใช้งานทั่วๆ ไปนั้น ได้มาจากการสกัดหินบอกไซต์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กระบวนการเบเยอร์ (Sayer Method) คือ เป็นการนำบอกไซต์มาสลายตัวด้วยสารประกอบโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ (NaOH) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิประมาณ 160-170 องศาเซลเซียส จะได้โซเดียมอะลูมิเนต ดังสมการ

$$Al_2O_3 + NaOH \text{ ---------> } 2NaAlO_2 + H_2O$$

Sodium Aluminate

หลังจากนั้นนำโซเดียมอะลูมิเนตมาทำปฏิกริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เนื่องจากโซเดียมอะลูมิเนตเป็นสารที่ไม่คงตัว (Unstable) จึงสามารถทำปฏิกิริยากับ CO_2 ได้ง่าย และเมื่อละลายในน้ำจะสามารถแยกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ [$2Al(OH)_3$] ออกมาได้

$$2NaAlO_2 + CO_2 + 3H_2O \text{ --------> } Na_2CO_3 + 2Al(OH)_3$$

Aluminium Hydroxide

เมื่อได้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์แล้ว ก็ไม่เป็นการยากที่จะทำให้เหลือเป็น Al_2O_3 อย่างเดียว เพียงแต่นำอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส บางครั้งเผาสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส ก็จะสามารถสกัดเอา Al_2O_3 จากหินบอกไซต์มาใช้งานได้

$$2Al(OH)_3 \xrightarrow{1000^\circ C} Al_2O_3 + 3H_2O$$

การสกัดอะลูมินาจากบอกไซต์ ตามวิธีการเบเยอร์นี้จะสามารถนำอะลูมินามาใช้งานได้ 2 ลักษณะตามความเหมาะสม คือ อะลูมินาไฮเดรต และอะลูมินาแคลไซน์

อะลูมินาไฮเดรต (Alumina Hydrate) มีน้ำอยู่ในส่วนประกอบ 3 โมเลกุลหรือประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โครงสร้างเป็นรูปผลึกแบบยิบบ์ไซต์ ความแข็งเพียง 2.4-3.0 ความถ่วงจำเพาะ 2.4 เป็นเกรดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ทั่วๆ ไป

อะลูมินาแคลไซน์ (Calcined Alumina) ซึ่งได้จากการนำอะลูมินาไฮเดรตมาเผาที่อุณหภูมิ 1000-1200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของวิธีการเบเยอร์นั่นเอง จะได้อะลูมินา 98-99 เปอร์เซ็นต์ โดยโครงสร้างจะมีรูปผลึกแบบ α ความถ่วงจำเพาะ 3.3-3.9 จะใช้ในงานที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง เช่น ผลิตภัณฑ์อะลูมินา นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเพิ่มเติมในเคลือบและแก้ว เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสามารถนำอะลูมินามาใช้ได้อีก 2 ลักษณะ คืออะลูมินาแทบูลาร์ (Tabular Alumina) ซึ่งเป็นอะลูมินาความหนาแน่นสูง มีปริมาณ α - Al_2O_3 มากกว่า อะลูมินาแคลไซน์

เนื่องจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1650 องศาเซลเซียส นิยมนำมาใช้ผสมวัตถุทนไฟ และอีกลักษณะหนึ่งคือ อะลูมินาฟิวด์ (Fused Alumina) เป็นการหลอมอะลูมินาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 2000 องศาเซลเซียส รูปผลึกจะเป็น α ที่สมบูรณ์ นำมาใช้เป็นสารขัดถู (Abrasive)

การลดัดบอกไซต์เพื่อให้ได้อะลูมินานั้นยังไม่สามารถสร้างอะลูมินาบริสุทธิ์ได้ มักจะมีโซเดียมออกไซด์ปะปนอยู่ ซึ่งจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์อะลูมินาอย่างมาก ในปัจจุบันสามารถสร้าง Al_2O_3 บริสุทธิ์กว่าวิธีการเบเยอร์ คือ ใช้กระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าอลัม (Alum) อาศัยหลักการละลาย และตกผลึกซ้ำ โดยใช้แอมโมเนียมซัลเฟต $(NH_4)SO_4$ ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมซัลเฟต $[Al_2(SO_4)_3]$ ไฮเดรต ดังสมการ

$$(NH_4)_2SO_4 + Al_2(SO_4)_3\ 18H_2O + 6H_2O \longrightarrow \underset{\text{Alum}}{(NH_4)_2SO_4\ Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O}$$

จากนั้นนำอลัมที่บริสุทธิ์มาให้ความร้อน จะเกิดการสลายตัวเป็นอลูมินาไฮเดรต และถ้าอุณหภูมิสูงถึง 1000-1200 องศาเซลเซียส จะได้ a อะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ถึง 99.995 เปอร์เซ็นต์

3. แร่กลุ่มซิลลิมาไนต์ (Sillimanite Group) เป็นแร่ที่ประกอบด้วยอะลูมินาและซิลิกา ($Al_2O_3.SiO_2$) ในธรรมชาติจะมีแร่อยู่ 3 ชนิดที่มีส่วนประกอบเหมือนกัน จะมีความแตกต่างกันที่คุณสมบัติเฉพาะ ได้แก่

3.1 ซิลลิมาไนต์ (Sillimanite) มีรูปผลึกระบบออร์โทรอมบิก มีลักษณะเป็นแท่งเล็กยาว ความแข็งระดับ 6-7 ความถ่วงจำเพาะ 3.23 แววววาวคล้ายแก้ว มีสีน้ำตาล เขียวอ่อน ขาว โปร่งใสถึงโปร่งแสง ไม่ละลายในกรด นับเป็นแร่ที่หายาก พบอยู่ในหินแปร พวกไนส์และชีสต์ มักเกิดร่วมกับพวกคอรันดัม ในประเทศไทยพบบริเวณภาคเหนือ ส่วนต่างประเทศที่มีคุณภาพดีจะพบที่อินเดีย สหรัฐอเมริกา โบฮีเมีย บาวาเรีย บราซิลและอาฟริกาใต้

3.2 ไคยาไนต์ (Kyanite) เป็นรูปผลึกระบบไตรคลินิก มีลักษณะยาว แบน เป็นแผ่นคล้ายใบมีด ความแข็งระดับ 5-7 ความถ่วงจำเพาะ 3.55-3.66 แววววาวคล้ายแก้วหรือมุก มีสีน้ำเงิน ขาว เทาหรือเขียว พบในหินแปรพวกไนส์ และชีสต์ มักเกิดร่วมกับการ์เนต (Garnet) สตอโรไลต์ (Staurolite) และคอรันดัม ในประเทศไทยจะพบในแถบภาคใต้และภาคเหนือทั่วๆ ไป แหล่งสำคัญในต่างประเทศ คือ สวิตเซอร์แลนด์ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา (ที่รัฐคาโรไลนา และเวอร์จิเนีย) อาฟริกา รัสเซียและเคนยา

3.3 แอนดาลูไซต์ (Andalusite) เป็นชื่อของเมืองแอนดาลูเซียในประเทศสเปน รูปผลึกระบบออร์โทรอมบิก (Orthorhombic) ความแข็งระดับ 7.5 ความถ่วงจำเพาะ 3.16-3.20

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

แววววาวคล้ายแก้ว มีสีแดงเข้ม สีน้ำตาล หรือสีเขียวมะกอก โปร่งแสงถึงโปร่งใส เกิดจากการแปรสภาพของหินดินดาน (Shale) หรือหินชนวน (Slate) ที่มีอะลูมิเนียมสูง ในประเทศไทยจะพบตามบริเวณที่หินแปรถูกเปลี่ยนสภาพมาจาก หินแกรนิต แถบจังหวัดพังงา ภูเก็ต และระนอง สำหรับในต่างประเทศแหล่งที่สำคัญคือ สเปน ออสเตรเลียทางตอนใต้ บราซิล สวีเดน ฝรั่งเศส รัสเซีย เยอรมนี และที่ รัฐเนวาดา แคลิฟอร์เนียและแมสซาชูเซตของสหรัฐอเมริกา

นอกจากแร่ทั้ง 3 ชนิดในกลุ่มซิลลิมาไนต์แล้ว ยังมีวัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นสารประเภทอะลูมิโนซิลิเกตเช่นเดียวกัน เพียงแต่มีความแตกต่างกันที่สัดส่วนของ Al_2O_3 : SiO_2 เป็นสารสังเคราะห์ที่มีชื่อว่ามูลไลต์ (Synthetic Mullite) ได้จากการนำอะลูมินาและซิลิกาบริสุทธิ์มาผสมกัน แล้วเผาที่อุณหภูมิ 1800 องศาเซลเซียส จะได้อะลูมิโนซิลิเกตที่มีความบริสุทธิ์มาก สูตรเคมีของมูลไลต์ คือ $3Al_2O_3$. $2SiO_2$ มีความถ่วงจำเพาะ 3.16

3.4 โทแปซ (Topaz) มีสูตรทางเคมีคือ $Al_2(SiO_4)$ (F, OH), เป็นชื่อมาจากเกาะโทปาเซียน (Topazion) ในทะเลแดง เป็นแร่ที่มีรูปผลึกแบบออร์โทรอมบิก มีลักษณะเป็นมวลเมล็ด เนื้อสมานแน่น ความแข็งระดับ 8 ความถ่วงจำเพาะ 3.4-3.6 แววววาวคล้ายแก้ว มีทั้งไม่มีสีมีสี เช่นสีเหลือง ชมพู น้ำเงินและเขียว ซึ่งชนิดสีเหลืองหมายถึงรัตนชาติบุษราคัม มักเกิดปะปนกับแร่ตีบุก ธะพาไทต์ ควอตซ์ ไมกาและเฟลด์สปาร์ ในประเทศไทยพบที่อำเภอถลาง จังหวัดภูเก็ต หาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ตำบลคลองจังและร่อนพิบูล จังหวัดนครศรีธรรมราช สำหรับในต่างประเทศนั้นแหล่งที่สำคัญได้แก่ รัสเซีย เทือกเขาอูราลในบราซิล ญี่ปุ่น ศรีลังกา เม็กซิโก อาฟริกาใต้ และที่เซาต์คาโรไลนา แคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา

ตัวอย่างผลวิเคราะห์ส่วนประกอบและคุณสมบัติบางประการของโทแปซจากแหล่งเซาต์คาโรไลนา (Sonja S. Singer. 1960 : 113)

SiO_2	37.2 %
	53.2 %
Fe_2O_3	0.4 %
F	14.1 %
LOI	0.9 %

ความแข็งระดับ 8 ความถ่วงจำเพาะ 3.4 - 3.6

ตามปกติโทแปซที่ผสมในเนื้อดินปั้นนั้นจะเริ่มเปลี่ยนแปลงผลึกที่อุณหภูมิ 815 องศาเซลเซียส และซิลิกาจะเริ่มกลายเป็นแก้วพร้อมกับเกิดมูลไลต์ที่อุณหภูมิ 1090-1260 องศา

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

เซลเซียส โดยจะเกิดผลึกมูลไลต์ที่สมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะจะลดลงเหลือ 3.1 มี Al_2O_3 ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และ ซิลิกา ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

3.5 **ดูมอริเทอไรต์ (Dumoriterite)** เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้ คือ $8Al_2O_3.\ 6SiO_2.\ B_2O_3.\ H_2O$ ซึ่งจัดว่าเป็นมูลไลต์อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 1230 องศาเซลเซียส) มีความถ่วงจำเพาะ 3.2-3.3 ความแข็งอยู่ในระดับ 7 พบที่เนวาดา สหรัฐอเมริกา

อะลูมินานั้นยังปรากฏอยู่ในส่วนประกอบของแร่อีกหลายชนิดในปริมาณที่แตกต่างกันไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นสารประกอบหลักของแร่ดิน ($Al_2O_3.\ 2SiO_2.\ 2H_2O$) แร่เฟลด์สปาร์ ($KNaO.\ Al_2O_3.\ 6SiO_2$) และไพโรฟิลไลต์ ($Al_2O_3.\ 4SiO_2.\ H_2O$) ซึ่งเป็นแร่ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานด้านเซรามิกส์ รายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทต่อๆ ไป ส่วนแร่อื่นๆ ที่มีอะลูมินาอยู่ในส่วนประกอบนั้นมีหลายชนิด เช่น สตอโรไลต์ (Staurolite) $Fe_2Al_9O_7(SiO_4)_4(OH)$ เอปิโดต (Epidote) $Ca_2(Al, Fe)Al_2O(SiO_4)(Si_2O_7)(OH)$ เบริล (Beryl) $Be_3Al_2(Si_6O_{18})$ การ์เนต (Garnet) $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ และลาซูไลต์ (Lazulite) $Al_2(PO_4)_2(OH)_2$ ซึ่งเป็นที่ไม่นิยมนำมาใช้ในงานด้านนี้

บทบาทของอะลูมินาในผลิตภัณฑ์เซรามิกส์

นอกจากผลิตภัณฑ์ที่มีดินเป็นวัตถุดิบ เช่น ในเนื้อดินปั้นและเคลือบของเครื่องปั้นดินเผา หรือวัตถุทนไฟ ที่รู้จักกันดีนั้น บางครั้งจะใช้อะลูมินาเป็นสารตัวเติม และสารตั้งต้นโดยใช้อะลูมินาไฮเดรต [$2Al(OH)_3$] หรืออะลูมินาแคลไซน์ (Al_2O_3) ตามความเหมาะสม ในปัจจุบันอะลูมินามีบทบาทไม่น้อยในการสร้างส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันไป เช่น

1. **ผลิตภัณฑ์ ไฮ-อะลูมินา (High-Alumina Ceramics)** เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่มีอะลูมินาอยู่ในส่วนผสมมากกว่า80-90 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่าผลิตภัณฑ์ออกไซด์เซรามิกส์ชนิดอื่นๆ ซึ่งนิยมใช้ทำพวกวัสดุขัดถู (Alumina Abrasive) เครื่องมือตัด (Cutting Tool) หัวเทียน (Alumina Sparking Plug) ลูกบด (Alumina Ball) กระสวยนำร่องเส้นด้าย (Alumina Taxtite Treadguide) ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ แผ่นรองวงจรอิเล็กทรอนิก(Alumina Substrates) หลอดไฟโซเดียม (Sodium Vapor Lamp) ท่อกรองน้ำ (Alumina Filter) ครูซิเบิล (Alumina Crucible) เป็นต้น ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ ไฮอะลูมินาแบ่งได้เป็น 12 กลุ่ม ตามปริมาณของอะลูมินา ดังแสดงในตาราง 18

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี@สงฆราช Phetchaburi Rajabhat University

ตาราง 18 แสดงผลิตภัณฑ์อะลูมินาทั้ง 12 กลุ่ม ที่เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะแตกต่างกัน (R. Morrell. 1987 : 3)

Group	Al_2O_3 content, %	Grain size**	Porosity	IEC class	Type of *product* and application
Fine-grained, dense, impervious materials:					
A1	>99.6	fine	dosed	799	Electrical, engineering, biomedical
A2	>99.8	fine-medium	ctosed (very low)	-	Translucent materials, high-pressure sodium vapour lamps, other optical aplications
A3	>99.5	v. fine medium	closed		Hot-pressed, limited engineering use. sush as machine-tool tips
A4	>99.6	medium	nominally closed	799 (if gas tight)	'Recrystallized' materials, high-temperature uses
A5	99-99.6	fine	closed	799	Sintered, general electrical and engineering
A6	96.5-99	fine	closed	795	Sintered, general electrical and engineering
A7	94.5-96.5	fine	closed	786, 795	Sintered, general electrical and engineering
A8	86-94.5	fine	closed	786	Sintered, general electrical and engineering
A9	80-86***	fine	closed	780	Sintered, general electrical and engineering

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 18 (ต่อ)

Group	Al_2O_3 content, %	Grain size**	Porosity	IEC dass	Type of product and application
Fine-to coarse-grained, open-porous materials:					
A10	>99.6	fine coarse	open	530 (?)	Sintered, refractory material, fine-grained versions have electrical and electronic uses
A11	90-99.6	fine-coarse	open	530(?)	Sintered, controlled porosity, refractory uses, filter media
A12	80-90	medium-coarse	open	530(?)	Sintered, refractory uses, filter media, abrasive media

ตาราง 19 แสดงข้อมูลสำหรับเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานผลิตภัณฑ์ไฮ-อะลูมินาและผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดอื่นๆ (R. Morrell, 1987 : 11)

Requirement	Critertoin	Type of high-alumina ceramic* Best	Alternative	Avoid	Other type of ceramic**
Properties:					
Thermal Expantion	high	***		-	ZrO_2, forsterite, glass-ceramics
	low	***	A9 (high mullite)	-	Cordierite, SiC, Si_3N_4, mullite, glass-ceramics
Thermal conductivity	high	A1, A2, A3	A5	A8-A12	BeO, SiC, WC
	low	A8-A12	-	A1-A6	ZrO_2, most silicates
Elastic moduli	high	A1-A3	A5	A4, A9-A12	SiC, WC
	low	A9-A12	A8	A1-A7	ZrO_2, most silicates

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 19 (ต่อ)

Requirement	Critertoin	Type of high-alumina ceramic*			Other type of ceramic**
		Best	Alternative	Avoid	
Strength,25°C	high	A1, A3	A5	A4, A8-A12	ZrO_2, Al_2O_3/ZrO_2, HPSN, sialons
	low	A10-A12		A1-A9	Porous alumino-silicates
Strength, high temperatures	high	AI-A4	A5	A7-A9	SiC, RBSN, some sialons
Fracture toughness	high	A1, A3	A7 (1)	A7 (2)	Al_2O_3/ZrO_2, ZrO_2
Static Fatigue resistance	high	A1	A2, A3	A6-A9	Non-oxides
Creep resistance	high	A2, A4	A5	A8, A9	SSC, RBSN
Hardness	high	A1-A3	A5	A4, A9-A12	SiC, B4C, Si_3N_4
Wear resistance	abrasion	most			SiC, B_4C, Si_3N_4
	sliding	A1, A5-A7	A8		SiC, Si_3N_4, ZrO_2
	impact	A1, A5-A7		A7 (2)	ZrO_2, SiC, Si_3N_4, WC
Thermal shock resistance	high	***	-		SiC, RBSN, HPSN, glass-ceramics, mullite, cordierite
Thermal shock resistance	high	***			SIC, RBSN. HPSN, glass-ceramics, mullite, cordierite

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 19 (ต่อ)

Requirement	Critertoin	Type of high-alumina ceramic'			Other type of ceramic**
		Best	Alternative	Avoid	
	low		A9	A1-A8	SiC, TiO_2,*** WC, some glass, carbon
Permittivity	high	A1, A5	-	A8, A9	TiO_2, titanates
	low	A8, A9	-	A1-A7	Silicates
Dielectric loss	low	A1, A2, A5	A6	A8-A9	BeO
Dielectric loss	low	A1, A2, A5	A6	A8-A9	BeO
Dielectric breakdown resistance	high	A1, A2	A5-A9	A4	BeO, porcelains
Translucence		A2	-	most	Glasses, sapphire, glass-ceramics, quartz
Coloration		A6-A9		A1	-
Corrosion resistance	acids	A1, A2, A7 (2)	-	many	RBSC, SSC
	alkalis	-	A1, A2	most	SSC, some zirconias
	reactive metals	A4 (for some)	A10-A12	A6, A7	ZrO_2, ThO_2, carbon
	hot gases	A1, A2, A4	-	A6-A9	
	melts	A1, A4	-	most	Carbon

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 19 (ต่อ)

Requirement	Critertoin	Type of high-alumina ceramic" Best	Alternative	Avoid	Other type of ceramic""
Processing characteristics:					
Size	large	A4-A6	A7-A12	A1-A3	Porcelains
	small	most			-
Green shape	good	A7-A9	A6	A1-A5	Steatites, Porcelains
Complexity					
Grindability	good	A7-A9	A6	A1, A3	
Metallizing	good	A1, A5. A6	A7-A9	A3, A4. A10-A12	
Cost/unit	low	A7-A9	A4, A6	A1-A3	-

2. ผลิตภัณฑ์มูลไลต์ (Mullite Porcelain Ware) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสารประกอบคล้ายกับซิลลิมาไนต์ คือ $3Al_2O_3.2SiO_2$ สามารถทนความร้อนได้สูงและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อย่างดี จุดสุกตัว 1500 องศาเซลเซียสขึ้นไป หรือบางครั้งสูงมากกว่า 1700 องศาเซลเซียส นิยมนำมาผลิตหม้อบดและลูกบดความเร็วสูง (Centifugal) หม้อเผา (Crucible) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในเตาเผา (Thermocouple Insulation) เป็นต้น

3. บทบาทของอะลูมินาในเคลือบ รูดส์ (Rhodes. 1972 : 65) กล่าวว่าอะลูมินามีความสำคัญในเคลือบเกือบทุกชนิด จะมีเพียงเคลือบผลึกเท่านั้นที่ใช้เพียงเล็กน้อย เราจะใช้อะลูมินาเป็นสารช่วยเพิ่มความหนืดให้เคลือบ ช่วยชะลอหรือขัดขวางการเจริญหรือโครงสร้างผลึกใหญ่ๆ และในทางตรงข้ามการใช้อะลูมินาในปริมาณมากในเคลือบจะส่งเสริมให้เกิดการเจริญของผลึกเล็กๆ ซึ่งจะช่วยทำให้เกิดเป็นเคลือบด้าน (Matt Glazes) ส่วนในเคลือบที่มันวาวนั้น อะลูมินาจะเป็นตัวควบคุมการไหลตัวเมื่อเผาถึงจุดหลอมละลายให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความแข็งแกร่ง ช่วยลดปัญหาการราน บางครั้งยังมีผลต่อการเกิดสีของเคลือบอีกด้วย

4. บทบาทของอะลูมินาในสีสำเร็จรูป (Stain) โดยทั่วไปสีสำเร็จรูปจะอยู่ในรูปผลึกสไปเนล (Spinel) ซึ่งเป็นสารประกอบ RO. R_2O_3 สารตัวหลักในกลุ่ม R_2O_3 นอกจาก Sb_2O_3, B_2O_3

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

และ Fe_2O_3 แล้ว อีกตัวที่มีบทบาทสำคัญก็คือ Al_2O_3 นั่นเอง เช่น สีน้ำเงิน (CoO, ZnO, Al_2O_3) สีน้ำตาล (Fe_2O_3, Cr_2O_3, Al_2O_3, ZnO) สีชมพู (Cr_2O_3, ZnO, Al_2O_3) เป็นต้น

5. การวิเคราะห์สมบัติของเนื้อดินปั้น

5.1 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) การดูดซึมน้ำเป็นสมบัติที่จะช่วยให้เราทราบว่า เนื้อดินที่เรานำมาใช้นั้น เผาจนถึงจุดสุกตัวหรือไม่ หรือทำให้เราพิจารณาได้ง่ายขึ้น เนื้อดินปั้นมีจุดสุกตัวสูงต่ำเพียงใด (Griffiths and Radford. 1965 : 38) ดนัย อารยะพงษ์ (2538 : 18) กล่าวว่า น้ำหนักของการดูดซึมน้ำจะสัมพันธ์กับความพรุนตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์ ในการดูดซึมน้ำมาก หรือน้อยนั้นสามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิการเผาผลิตภัณฑ์ขณะนั้นได้ว่าสูงหรือต่ำโดยการหาน้ำหนักของการแทนที่น้ำเข้าไปในรูพรุนทำให้รูพรุนที่เปิดอิ่มตัวไปด้วยน้ำทำการแช่ไว้ระยะหนึ่งจนอิ่มตัว แล้วจึงนำไปชั่งหาน้ำหนัก การคำนวณหาปริมาณการดูดซึมน้ำทำได้ดังนี้ คือ (Rhodes. 1974 : 311) ทำชิ้นทดลอง ให้มีขนาด 2 × 5 × 1.5 เซนติเมตร เผาชิ้นทดลองในอุณหภูมิที่กำหนด โดยนำชิ้นทดลองที่เผาแล้วมาชั่งกำหนดและจดบันทึกไว้เป็นน้ำหนักดินที่แห้ง นำชิ้นทดลองที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมง นำชิ้นทดลองขึ้นมาเช็ดที่ผิวให้แห้งด้วยผ้าหมาด แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง จดบันทึกไว้เป็นน้ำหนักดินที่อิ่มตัว คำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ โดยใช้สูตร

$$\text{ร้อยละของการดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักของดินที่อิ่มตัว} - \text{น้ำหนักดินที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักดินที่แห้ง}} \times 100$$

5.2 การหดตัวภายหลังการเผา (Firing Shrinkage) การหดตัวเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลิตภัณฑ์ให้เล็กลง การหดตัวของดินมีอยู่ 2 ระยะด้วยกัน คือ การหดตัวหลังจากการผึ่งแห้ง และการหดตัวภายหลังการเผา การหดตัวภายหลังการเผามีความสำคัญมาก เป็นคุณสมบัติที่ต้องทราบเพื่อจะนำมาใช้ในการผลิตว่าจะต้องเพิ่มหรือขยายแบบอีกเท่าไรจึงจะได้ขนาดตามที่ต้องการ (มนูญ ประชันคดี. ม.ป.ป. : 20) และถ้าดินมีการหดตัวมากจำเป็นต้องเผาอย่างช้าๆ และควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ มิฉะนั้นแล้วผลิตภัณฑ์จะบิดเบี้ยวหรือแตกหักเสียหายได้ (กาญจนะ แก้วกำเนิด. 2532 : 65) ตามปกติการหดตัวของผลิตภัณฑ์ เมื่อเผาเคลือบประมาณร้อยละ 10 – 20 ในส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่มีหินฟันม้า และหินเชี้ยวหนุมานอยู่ด้วย

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

อาจจะหดตัวน้อยกว่านี้ก็ได้ (Nelson. 1984 : 13) วิธีการหาค่าการหดตัวภายหลังการเผา ทำได้ดังนี้ คือ (Rhodes. 1974 : 311)

1. ทำชิ้นทดลองให้มีขนาดดังนี้ ความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 5 เซนติเมตร ความสูง 1.5 เซนติเมตร ขีดเส้นยาว 4 เซนติเมตร เป็นความยาวดินเปียก

2. นำชิ้นทดลองไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3. นำชิ้นทดลองไปเผาในอุณหภูมิที่กำหนดไว้

4. เมื่อเผาแล้ววัดความยาวของเส้นที่ขีดไว้ บนชิ้นทดลองอีกครั้ง จดบันทึกเป็นความยาวของดินที่เผาแล้ว

5. คำนวณการหดตัวของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผา โดยใช้สูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัวตามเส้น} = \frac{\text{ความยาวก่อนเผา} - \text{ความยาวหลังเผา}}{\text{ความยาวก่อนเผา}} \times 100$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

1. กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้มาจาก การสุ่มแบบเจาะจง (Purposive sampling) จำนวน 21 ตัวอย่าง จากสัดส่วนของอะลูมินาต่อซิลิกา (Al_2O_3 : SiO_2) ดังตาราง 20

ตาราง 20 แสดงกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างที่	Al_2O_3	SiO_2
1	Al_2O_3	SiO_2
2	Al_2O_3	$1.5SiO_2$
3	Al_2O_3	$2SiO_2$
4	Al_2O_3	$2.5SiO_2$
5	Al_2O_3	$3SiO_2$
6	$1.5Al_2O_3$	SiO_2
7	$1.5Al_2O_3$	$2SiO_2$
8	$1.5Al_2O_3$	$2.5SiO_2$
9	$1.5Al_2O_3$	$3SiO_2$
10	$2Al_2O_3$	SiO_2
11	$2Al_2O_3$	$1.5SiO_2$
12	$2Al_2O_3$	$2.5SiO_2$
13	$2Al_2O_3$	$3SiO_2$
14	$2.5Al_2O_3$	SiO_2
15	$2.5Al_2O_3$	$1.5SiO_2$
16	$2.5Al_2O_3$	$2SiO_2$
17	$2.5Al_2O_3$	$3SiO_2$
18	$3Al_2O_3$	SiO_2
19	$3Al_2O_3$	$1.5SiO_2$
20	$3Al_2O_3$	$2SiO_2$
21	$3Al_2O_3$	$2.5SiO_2$

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

2. **ตัวแปรที่ศึกษา** การวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาตัวแปรจากคุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิ คือ

2.1 การหดตัว

2.2 การดูดซึมน้ำ

2.3 ความแข็งแรงหลังเผา

2.4 ความทน Thermal Shock

2.5 ประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิ

3. **วัสดุเครื่องมืออุปกรณ์ในการวิจัย**

3.1 **วัสดุ** ได้แก่

3.1.1 ดินขาว

3.1.2 อะลูมินา

3.1.3 ลวด PR Type R

3.1.4 ปูนปลาสเตอร์

3.1.5 ชุดวัดอุณหภูมิมาตรฐาน

3.2 **อุปกรณ์** ได้แก่ ครุภัณฑ์เซรามิกส์ ตามโครงการของ พวส. ดังนี้

3.2.1 หม้อบดความเร็วสูง

3.2.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง 1700 °C

3.2.3 เครื่อง MOR

3.2.4 เตาเผาอุณหภูมิ 1300 °C

4. **ขั้นตอนการวิจัย**

แผนการดำเนินการวิจัย มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ผสมเป็นเนื้อดินปั้นทั้ง 21 ตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 2 ชั่งบดส่วนผสม

ขั้นตอนที่ 3 ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 4 เผา-ทดสอบทางกายภาพ

ขั้นตอนที่ 5 ประกอบชุด Thermocouple Pyrometer

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิ

ขั้นตอนที่ 7 จัดพิมพ์รายงานการวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

5. **การวิเคราะห์ข้อมูล**

ภายหลังเผาทดลองเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา สำหรับเป็นฉนวน ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสแล้วจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

5.1 การหดตัวการหดตัวหลังจากเผา(Firing Shrinkage or Burning Shrinkage) ใช้วิธีการเช่นเดียวกับการหาค่าความหดตัวเมื่อแห้ง ทั้งหดตัวตามปริมาตรและหดตัวตามเส้น เป็นวิธีที่จะช่วยให้เราทราบว่าควรจะสร้างต้นแบบของผลิตภัณฑ์เท่าใด จึงจะได้ขนาดหลังเผาตามต้องการ โดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัวตามเส้น} = \frac{\text{ความยาวก่อนเผา} - \text{ความยาวหลังเผา}}{\text{ความยาวก่อนเผา}} \times 100$$

5.2 การหาค่าความดูดซึมน้ำ ใช้วิธีการคำนวณหาค่าความดูดซึมน้ำ (Daniel Rhoder. 1972 : 200)

$$A = \frac{W - D}{D} \times 100$$

โดย A = ร้อยละของการดูดซึมน้ำ

W = น้ำหนักดินที่อิ่มตัว

D = น้ำหนักดินที่แห้ง

5.3 ความแข็งแรงหลังเผา คำนวณหาค่าความแข็งแรงตามสูตร

$$m = \frac{3pl}{2bd^2}$$

โดย m = ค่าความแข็งแรง (MOR) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม/ตารางเซ็นติเมตร ($kg./cm^2$)
หรือ ปอนด์/ตารางนิ้ว (lbs/in^2)

p = น้ำหนักที่ทำให้แท่งทดลองหัก

l = ความยาวระหว่างคานทั้งสอง

b = ความกว้างของแท่งทดลอง

d = ความหนาของแท่งทดลอง

5.4 ความทน Thermal Shock วิเคราะห์จากการสังเกตชิ้นตัวอย่างว่าสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้หรือไม่

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

5.5 **ประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิ** ได้จากการคัดเลือกตัวอย่างที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ แล้วนำมาผลิตเป็น Tube ประกอบกับลวด PR และชุดข้อต่อโครงโลหะ ทำการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐานในอัตราเร่ง 20°C ต่อชั่วโมง และ อัตราเร่ง 150°C ต่อชั่วโมง โดยใช้วัดอุณหภูมิในเตาเผาเดียวกันและตำแหน่งเดียวกัน ทำการบันทึกผลการวัดอุณหภูมิทุก ๆ 10 °C เริ่มบันทึกตั้งแต่อุณหภูมิ 600 °C – 1300 °C

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
Pibulsongkram Rajabhat University

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. **ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา** หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1600°C สามารถสรุปผลการวิจัยตามตัวแปรที่ศึกษาที่เกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของกลุ่มตัวอย่างทั้ง 21 ตัวอย่างได้ดังตาราง 21

ตาราง 21 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C

กลุ่มตัวอย่าง	ความหดตัว (%)	ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	ค่าความแข็งแรง (Kg/cm^2)	ความทน Termal shock
1	11	23.20	116.5	ทนได้
2	20	0.64	54.43	ทนได้
3	23	0.58	228.75	ทนได้
4	18	0.314	83.50	ทนได้
5	17	2.54	87.27	ทนได้
6	3	38.54	68.04	ทนได้
7	20	14.59	172.50	ทนได้
8	22	5.47	90.61	ทนได้
9	23	4.52	95.12	ทนได้
10	2	36.20	34.17	ทนได้
11	4	34.57	44.40	ทนได้
12	15	17.63	72.12	ทนได้
13	11	9.71	116.60	ทนได้
14	5	37.17	59.60	ทนได้
15	3	43.00	42.06	ทนได้
16	1	32.60	54.85	ทนได้
17	14	17.75	82.99	ทนได้
18	0	35.17	33.40	ทนได้
19	1	38.92	68.04	ทนได้
20	6	30	53.94	ทนได้
21	3	33.01	53.93	ทนได้

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

2. **ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิ** ภายหลังการคัดเลือกตัวอย่างที่เหมาะสมแล้วสร้างเป็นฉนวนความร้อนนำมาประกอบกับลวด PR แล้วทำการทดสอบวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบกับชุดวัดอุณหภูมิมาตรฐาน

2.1 ประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิที่อัตราเร่ง 20 °C ต่อชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงในตาราง 22

ตาราง 22 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิที่อัตราเร่ง 20 °C ต่อชั่วโมง (หน่วย : °C)

มาตรฐาน	ทดลอง	ผลต่าง	มาตรฐาน	ทดลอง	ผลต่าง	มาตรฐาน	ทดลอง	ผลต่าง
600	601	1	840	841	1	1080	1079	1
610	611	1	850	850	0	1090	1089	1
620	621	1	860	860	0	1100	1099	1
630	631	1	870	871	1	1110	1109	1
640	640	0	880	881	1	1120	1119	1
650	651	1	890	890	0	1130	1129	1
660	660	0	900	900	0	1140	1139	1
670	670	0	910	911	1	1150	1149	1
680	680	0	920	921	1	1160	1159	1
690	690	0	930	931	1	1170	1169	1
700	699	1	940	941	1	1180	1180	0
710	710	0	950	950	0	1190	1190	0
720	720	0	960	961	1	1200	1200	0
730	730	0	970	971	1	1210	1210	0
740	740	0	980	981	1	1220	1220	0
750	750	0	990	991	1	1230	1230	0
760	761	1	1000	999	1	1240	1239	1
770	771	1	1010	1009	1	1250	1249	1
780	781	1	1020	1019	1	1260	1259	1
790	789	1	1030	1029	1	1270	1270	0
800	801	1	1040	1039	1	1280	1280	0
810	810	0	1050	1049	1	1290	1290	0
820	820	0	1060	1059	1	1300	1300	0
830	830	0	1070	1069	1			

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

2.2 ประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิที่อัตราเร่ง 150°C ต่อชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงในตาราง 23

ตาราง 23 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิอัตราเร่ง 150°C ต่อชั่วโมง (หน่วย : °C)

มาตรฐาน	ทดลอง	ผลต่าง	มาตรฐาน	ทดลอง	ผลต่าง	มาตรฐาน	ทดลอง	ผลต่าง
600	599	1	840	842	2	1080	1082	2
610	609	1	850	852	2	1090	1092	2
620	620	0	860	862	2	1100	1102	2
630	630	0	870	872	2	1110	1112	2
640	641	1	880	882	2	1120	1122	2
650	651	1	890	892	2	1130	1131	1
660	661	1	900	902	2	1140	1141	1
670	670	0	910	912	2	1150	1150	0
680	678	2	920	922	2	1160	1160	0
690	688	2	930	932	2	1170	1170	0
700	699	1	940	942	2	1180	1180	0
710	710	0	950	952	2	1190	1190	0
720	720	0	960	962	2	1200	1200	0
730	732	2	970	972	2	120	1210	0
740	742	2	980	982	2	1220	1220	0
750	752	2	990	992	2	1230	1230	0
760	762	2	1000	1002	2	1240	1240	0
770	772	2	1010	1012	2	1250	1249	1
780	782	2	1020	1022	2	1260	1259	1
790	792	2	1030	1032	2	1270	1269	1
800	802	2	1040	1042	2	1280	1279	1
810	812	2	1050	1052	2	1290	1290	0
820	822	2	1060	1062	2	1300	1300	0
830	832	2	1070	1072	2			

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ตาราง 24 สรุปค่าเฉลี่ยผลต่างซึ่งแสดงค่าผิดพลาดในการวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่ใช้อัตราเร่ง	ค่าเฉลี่ยผลต่าง	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าผลต่างสูงสุด
อัตราเร่ง 20 °C	0.606	0.492	1.00
อัตราเร่ง 150 °C	1.479	1.329	2.00

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินาที่ใช้เป็นฉนวนความร้อน
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของ Thermocouple Pyrometer ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา

วิธีดำเนินการวิจัย

ขอบเขตการวิจัย

1. **เป้าหมายการทดลอง**

1.1 **เป็นการทดลองประดิษฐ์** Thermocouple Pyrometer **เฉพาะที่ใช้ในการวัด**อุณหภูมิของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ประเภทเครื่องปั้นดินเผา

1.2 **ช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบระหว่าง** 600 °C – 1300 °C

2. **กลุ่มตัวอย่าง** กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้มาจาก การสุ่มแบบเจาะจง (Purposive **sampling) จำนวน** 21 ตัวอย่าง จากสัดส่วนของอะลูมินาต่อซิลิกา (Al_2O_3 : SiO_2)

3. **ตัวแปรที่ศึกษา** การวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาตัวแปรจากคุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิ คือ

3.1 การหดตัว

3.2 การดูดซึมน้ำ

3.3 ความแข็งแรงหลังเผา

3.4 ความทน Thermal Shock

3.5 ประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิ

4. **วัสดุเครื่องมืออุปกรณ์ในการวิจัย**

4.1 วัสดุ ได้แก่

4.1.1 ดินขาว

4.1.2 อะลูมินา

4.1.3 ลวด PR Type R

4.1.4 ปูนปลาสเตอร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

4.1.5 ชุดวัดอุณหภูมิมาตรฐาน

4.2 อุปกรณ์ ได้แก่ ครุภัณฑ์เซรามิกส์ ตามโครงการของ ma. ดังนี้

4.2.1 หม้อบดความเร็วสูง

4.2.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง 1700 °C

4.2.3 เครื่อง MOR

4.2.4 เตาเผาอุณหภูมิ 1300 °C

5. ขั้นตอนการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัย มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ผสมเป็นเนื้อดินปั้นทั้ง 21 ตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 2 ชั่งบดส่วนผสม

ขั้นตอนที่ 3 ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 4 เผา-ทดสอบทางกายภาพ

ขั้นตอนที่ 5 ประกอบชุด Thermocouple Pyrometer

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิ

ขั้นตอนที่ 7 จัดพิมพ์รายงานการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C สามารถสรุปผลการวิจัยตามตัวแปรที่ศึกษาที่เกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของกลุ่มตัวอย่างทั้ง 21 ตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่างที่ 18 มีการหดตัวต่ำที่สุดคือ 0.00 % ตัวอย่างที่ 3 มีการหดตัวสูงที่สุดคือ 23.00 % ตัวอย่างที่3 ดูดซึมน้ำต่ำที่สุดคือ 0.58 % ตัวอย่างที่ 11 ดูดซึมน้ำสูงที่สุดคือ 34.57 % ตัวอย่างที่18 มีความแข็งแรงหลังเผาต่ำสุดคือ 33.40 Kg/cm^2 ตัวอย่างที่ 3 มีความแข็งแรงหลังเผาสูงสุดคือ 228.75 Kg/cm^2 และทั้ง 21 ตัวอย่าง สามารถทน Thermal shock ได้

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิ ภายหลังการคัดเลือกตัวอย่างที่เหมาะสมแล้วสร้างเป็นฉนวนความร้อนนำมาประกอบกับลวด PR เพื่อเป็นชุดวัดอุณหภูมิแล้วทำการทดสอบวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบกับชุดวัดอุณหภูมิมาตรฐาน

2.1 ประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิที่อัตราเร่ง 20 °C ต่อชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าค่าเฉลี่ยผลต่าง 0.606 °C ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.492 ค่าผลต่างสูงสุด 1.00 °C

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

2.2 ประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิที่อัตราเร่ง 150 °C ต่อชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าค่าเฉลี่ยผลต่าง 1.479 °C ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.329 ค่าผลต่างสูงสุด 2.00 °C

อภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลมีจุดสนใจที่สามารถอภิปรายผลได้ 2 ประเด็นหลัก คือ ข้อมูลเกี่ยวกับเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา และผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิ ดังนี้

1. เกี่ยวกับเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา มีจุดสนใจคือในตัวอย่างที่ 18 ไม่มีการหดตัวคือมีค่า 0.00% นั้นเมื่อพิจารณาส่วนผสม มี $3Al_2O_3 : SiO_2$ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีปริมาณอะลูมินามากที่สุด คิดเป็น 83.61% และมีซิลิกาเพียง 16.39 % ซึ่งแสดงว่ามีปริมาณดินขาวในส่วนผสมน้อยมาก ดังนั้นการหดตัวหลังเผาจึงมีน้อยด้วยเช่นกัน ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของส่วนผสมที่ 18 นี้ มีค่าต่ำสุดด้วย เนื่องจากอะลูมินาเป็นสารที่มีความทนไฟสูงถึง 2050°C เมื่อมีปริมาณมากจุดสุกตัวก็สูง การหลอมเหลวจึงมีน้อย จึงมีความเปราะมากนั่นเอง

2. เกี่ยวกับประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิภายหลังการทดสอบการวัดอุณหภูมิ ในอัตราเร่ง 20°C ต่อชั่วโมงนั้นมีความแม่นยำมากกว่า ในอัตราเร่ง 150°C ต่อชั่วโมง แสดงว่าประสิทธิภาพของเนื้อดินปั้นไฮ-อะลูมินา จะมีความสม่ำเสมอในการนำความร้อนได้ดีเมื่ออัตราเร่งต่ำ แต่เมื่ออัตราเร่งสูงขึ้นผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จากชุดทดลองกับชุดมาตรฐานในช่อง 7.30 °C -1120 °C ชุดทดลองจะนำความร้อนได้ดีกว่าคือมีค่าสูงกว่าชุดมาตรฐาน 2°C แต่เมื่อ 1130°C - 1300°C กลับมีค่าเท่ากันหรือห่างกันเพียง 1°C แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1130 °C - 1300 °C นั้น เนื้อดินปั้นไฮอะลูมินาจะมีการนำความร้อนที่มีค่าใกล้เคียงกัน

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลงานวิจัยไปใช้

1.1 ควรมีการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมเนื้อดินปั้นไฮอะลูมินา รวมทั้งควบคุมกระบวนการ ขั้นตอนการขึ้นรูป และการเผาให้คงที่เพื่อให้เนื้อดินปั้นมีคุณสมบัติที่คงที่

1.2 จุดเชื่อมต่อต้องแน่นและสายตัวนำต้องเป็นสายที่ได้มาตรฐาน เพื่อป้องกันการผิดพลาดของค่าอุณหภูมิ

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

1.3 ตำแหน่งการวาง Thermocouple ในเตาเผาเครื่องปั้นดินเผา ควรเป็นตำแหน่งที่คาดว่าอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละเตาเผา เพื่อเป็นการป้องกันการเผาอุณหภูมิเกิน ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายได้

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

2.1 อาจมีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบที่ใช้ในการทำเนื้อดินปั้นบ้าง ซึ่งอาจได้วัสดุที่มีราคาถูกกว่าและสามารถลดต้นทุนการผลิตได้

2.2 อาจมีการเปลี่ยนอัตราเร่งและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิให้หลากหลายนั้น เพื่อจะได้ประยุกต์ใช้งานวัดอุณหภูมิได้กว้างขวางยิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

บรรณานุกรม

กาญจนะ แก้วกำเนิด. **น้ำเคลือบ**. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเซรามิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่, 2532.

โกมล รักษ์วงศ์. **วัตถุดิบที่ใช้ในงานเครื่องปั้นดินเผาและเนื้อดินปั้น**. นนทบุรี : สำนักพิมพ์โรงเรียนมารดานุเคราะห์, 2531.

ดนัย อารยพงษ์. **การเตรียมและการประเมินคุณสมบัติของน้ำดินในการหล่อแบบ**. เอกสารประกอบการฝึกอบรมการวัดสมบัติวัสดุเซรามิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : กรุงเทพฯ, 2538.

ทวี พรหมพฤกษ์. **เตาและการเผา**. กรุงเทพฯ : หน่วยศึกษานิเทศก์ กรมการฝึกหัดครู, 2525.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. **เซรามิกส์**. ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

มนูญ ประชันคดี. **อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา**. กรมวิทยาศาสตร์ กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : มปป.

สมศักดิ์ กีรติวุฒิเศรษฐ์. **หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**. ครั้งที่ 5, กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์, 2534.

สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์. **น้ำเคลือบเครื่องปั้นดินเผา**. ไทยวัฒนาพานิช : กรุงเทพฯ, 2531.

อุบลศรี ชัยสาม และเยาวลักษณ์ นิสสภา. **คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานการใช้งานและมาตรฐานการซื้อขายในตลาดแร่**. ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, 2537.

Griffiths, R. and Radford. **Calculation in Ceramic**. Maclaren and Sons : London, 1965.

Morrel R. **Handbook of Properties of Technical and Engineering Ceramics**. London : Hermajesty's Stationery Office, 1987.

Nelson. **Ceramic**. Holt Rientiortand winston Inc. : New York, 1984.

Norton, F.It. **Element of Ceramics**. Addison wesley Publishing Company Inc. : U.S.A., 1952.

Rhodes, daniel. **Clay snd Glazes for The Potter**. 4 th, Pitman Publishing : Greal Britain, 1972.

Singer S. **Industrial Ceramic**. New York : Chemical Publishing Company, 1960.

Worrall W.E. **Raw Materials**. London : Maclaren and Sons LTD., 1964.

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
Pibulsongkram Rajabhat University

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
Pibulsongkram Rajabhat University

ภาพประกอบ 4 แสดง Thermocouple Tube ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
Pibulsongkram Rajabhat University

ภาพประกอบ 5 แสดง Thermocouple Tube ที่ผ่านการทดสอบการใช้งานมาระยะหนึ่ง

ภาพประกอบ 6 ลวด PR พร้อมฉนวนเซรามิกส์

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
Pibulsongkram Rajabhat University

ภาพประกอบ 7 เตาเผาอุณหภูมิสูง (1800 °C)

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ภาพประกอบ 8 หม้อบดความเร็วสูงที่ใช้บดผสมเนื้อดินปั้นกลุ่มตัวอย่าง

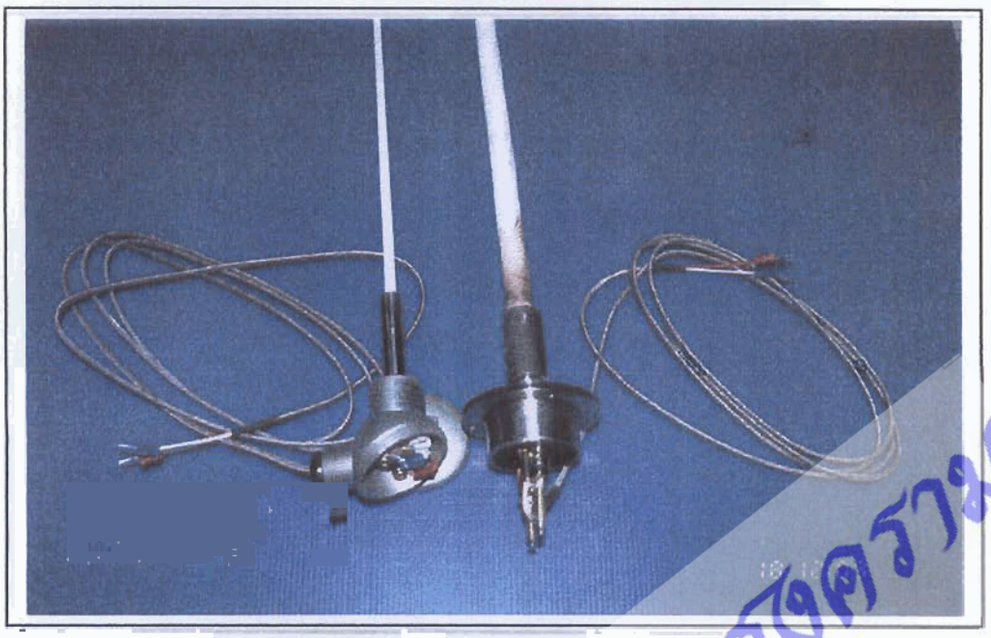
ภาพประกอบ 9 Thermocouple ที่ได้จากการทดลองวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
Pibulsongkram Rajabhat University

ภาพประกอบ 10 แสดงขั้วต่อสายตัวนำของ Thermocouple ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา

ภาพประกอบ 11 ชุดแสดงผลการวัดอุณหภูมิขณะทดสอบประสิทธิภาพของ Thermocouple

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
Pibulsongkram Rajabhat University



ภาพประกอบ 12 แสดง Thermocouple มาตรฐานและ Thermocouple ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา ประกอบสายตัวนำพร้อมใช้งาน

ภาพประกอบ 13 แสดงตำแหน่งการทดสอบการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง Thermocouple มาตรฐานและ Thermocouple ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาภายในเตาเผาเซรามิกส์

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นายนิวัตร พัฒนะ

ประวัติการศึกษา

2519 ประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดโขดเขมาราม อ.บางประหัน จ.พระนครศรีอยุธยา

2523 มัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย

2528 คบ.อุตสาหกรรมศิลป์ (เครื่องปั้นดินเผา) จากวิทยาลัยครูพระนคร

2534 กศ.ม.อุตสาหกรรมศิลป์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

2542 กำลังศึกษาระดับปริญญาเอก ครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิชาการบริหาร อาชีวศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการทำงาน

2528 อาจารย์ 1 ระดับ 3 วิทยาลัยครูพิบูลสงคราม จ.พิษณุโลก

2535 - 2540 หัวหน้าภาควิชาหัตถศึกษาและอุตสาหกรรมศิลป์ วิทยาลัยครูพิบูลสงคราม จ.พิษณุโลก

2540 - 2546 ประธานโปรแกรมวิชาเทคโนโลยีเซรามิกส์ และรักษาการรองคณบดีโครงการจัดตั้งคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏพิบูลสงคราม

2546 รักษาการคณบดีโครงการจัดตั้งคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏพิบูลสงคราม

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม Pibulsongkram Rajabhat University