



## รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเกิดเฟส  $C_3S$

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Predictive Model for  $C_3S$  Formation in Portland Clinker

นายนราวิชญ์ คงแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเกิดเฟส  $C_3S$  ในปูนซีเมนต์

पोर्टแลนด์

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายนราวิชญ์ คงแก้ว

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

ชื่อสกุล ผู้นิเทศงาน คุณประเมษฐ์ ใจบุญ

สถานประกอบการ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด (มหาชน)

### บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมซีเมนต์มีการควบคุมค่าเฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ด ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในอุตสาหกรรมซีเมนต์ เพราะเป็นค่าที่ให้กำลังอัดของปูนเม็ดสูงภายในระยะเวลาอันสั้น โดย ณ ปัจจุบันทางโรงงานปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ทางส่วนผลิตได้มีการควบคุมเฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ด โดยใช้เกณฑ์ในการวัดสองค่าคือ LSF (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ดทั้งหมด) และค่า free CaO (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ดที่ไม่ถูกเผา) เนื่องจากเป็นค่าที่ง่ายต่อการควบคุม แต่ยังมีปัญหาเป็นอย่างมาก เพราะบางครั้งค่า LSF และค่า free CaO อยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่ค่าเฟส  $C_3S$  ไม่ได้อยู่ในค่าที่เหมาะสม หากเฟส  $C_3S$  ลดลง 2% จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง 5% ซึ่งจะมีผลต่อค่าใช้จ่ายของปูนซีเมนต์पोर्टแลนด์ประมาณ 20 ล้านบาทต่อปี

ดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงมีความประสงค์ที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายการเกิดเฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ดเพื่อจะได้ทราบว่า มีตัวแปรใด ณ ปัจจุบัน ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส  $C_3S$  จากนั้นจะนำตัวแปรเหล่านั้นมาใช้เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจในอนาคต

คำสำคัญ : ปริมาณ CaO ในปูนเม็ดทั้งหมด เฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ด ปริมาณ CaO ในปูนเม็ดที่ไม่ถูกเผา

|

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Co-operative Title:** Predictive Model for  $C_3S$  Formation in Portland Clinker

**Student Intern Name:** Mr. Narawit Kongkaew

**Faculty:** Engineering **Department:** Chemical Engineering

**Advisor name:** Assoc. Dr. Kriangsak Kraiwattanawong

**Mentor name:** Mr. Poramet Jaiboon

**Company:** Siam Cement (Kaeng Khoi) Co., Ltd.

## ABSTRACT

In the cement industry,  $C_3S$  has been controlled, the most important variable in the cement industry. Because it is a value that provides a high compressive strength of clinker within a short time. At present, the Siam Cement (Kaeng Khoi) Co., Ltd. has controlled  $C_3S$  using two modules are LSF (CaO content in clinker) and free CaO (unburned CaO content in clinker) values because it is easy to control. But it still has a lot of problems. Sometimes LSF and free CaO are in the control range, but  $C_3S$  is still not in the control range. If the  $C_3S$  decreases by 2%, the compressive strength will be reduced by 5 % and it will affect the cost of cement mortar approximately 20 million baht per year.

Therefore, the researcher wishes to find a mathematical model to predict  $C_3S$  to know that there are some variables are currently affecting  $C_3S$  and then use those variables to help with future decisions.

**Keywords :** LSF (lime saturation factor)  $C_3S$  (tricalcium silicate) free CaO

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำแนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด รวมถึงช่วยแก้ปัญหาทางที่เกิดขึ้นจนรายงานเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณปรเมษฐ์ ใจบุญ ผู้นิเทศงานวิศวกร ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมาตลอดระยะเวลา 4 เดือนที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่โอเพอร์เรเตอร์และทางแลป บริษัทปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการรายงานและให้คำปรึกษาเรื่องการใช้ชีวิตในโรงงาน

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่คอยอบรมสั่งสอนและให้ความรู้วิชาการ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆวิศวกรรมเคมีที่คอยให้คำปรึกษาต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

นราวิชญ์ คงแก้ว

# สารบัญ

หน้า

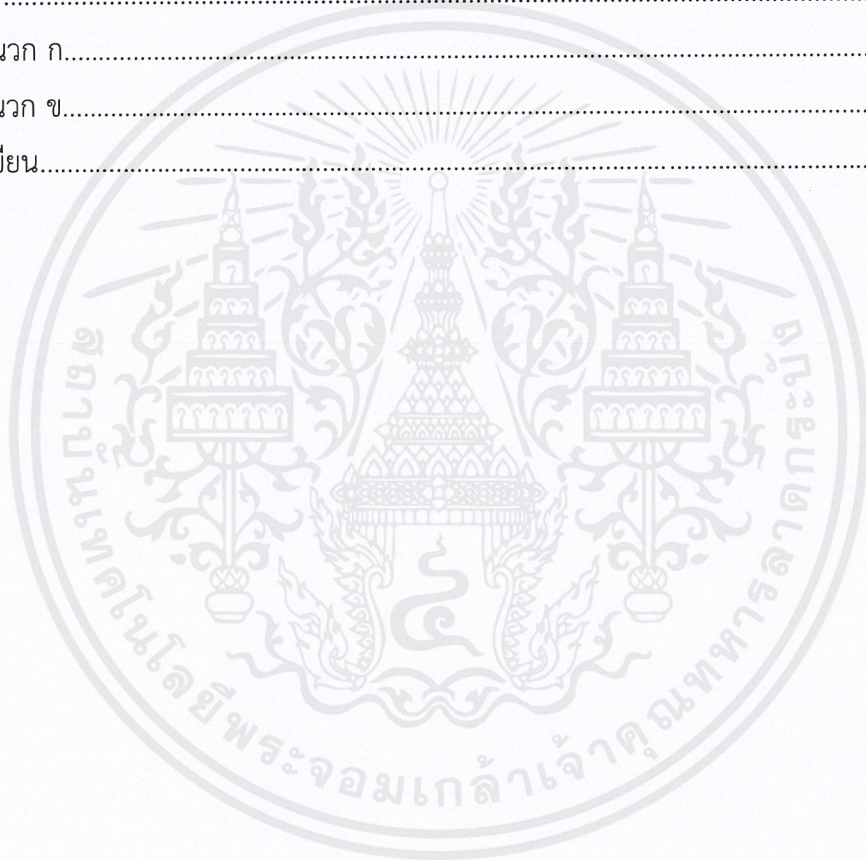
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยย่อ.....	3
2.1.2 ทฤษฎีหม้อเผา.....	4
2.1.3 ปูนเม็ด.....	5
2.1.4 เครื่องมือในการควบคุมคุณภาพปูนเม็ด.....	6
2.1.5 การควบคุมคุณภาพปูนเม็ด.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2.1 ผลกระทบของอัลคาไลต์ต่อปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ในการทำปฏิกิริยากับน้ำ.....	11
2.2.2 แบบจำลองการทำปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลต์และซิลิกาในคอนกรีต.....	12
2.2.3 ผลกระทบของแมกนีเซียมออกไซด์และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในปูนเม็ด.....	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	15
3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	16
3.2.1 ตัวอย่างข้อมูลจากทางแลปควบคุมคุณภาพ.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 ตัวอย่างข้อมูลพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา.....	17
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	17
3.3.1 การปรับแก้ข้อมูลที่หายไป.....	18
3.3.2 การปรับข้อมูลให้เป็นมาตรฐาน.....	19
3.3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	21
3.4 วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ .....	24
3.4.1 LSF avg clinker.....	25
3.4.2 Free CaO.....	25
3.4.3 Preheat calciner และ Burner.....	25
3.4.4 $SiO_2$ .....	27
3.4.5 Kiln feed.....	27
3.4.6 Cooling rate.....	28
3.4.7 $Al_2O_3$ .....	29
3.4.8 $K_2O$ .....	29
3.4.9 Free CaO clinker.....	30
3.4.10 Fuel coal.....	31
3.4.11 $SO_3$ .....	31
3.4.12 Biomass.....	32
3.4.13 NOX.....	32
3.4.14 $O_2$ .....	32
3.4.15 Rotation kiln.....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	33
4.1 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	33
4.1.1 จัดอันดับตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ .....	33
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	34
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	34
5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2 จัดอันดับตัวแปรที่มีผลต่อเฟส $C_3S$ .....	34
5.1.3 การปรับค่าเมื่อเฟส $C_3S$ มีค่าน้อยกว่า 70 .....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
เอกสารอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก.....	38
ภาคผนวก ก.....	39
ภาคผนวก ข.....	40
ประวัติผู้เขียน.....	41



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยย่อ.....	3
ภาพที่ 2 แบบหม้อเผา.....	4
ภาพที่ 3 โซนของหม้อเผาที่ถูกแบ่งตามทฤษฎี.....	4
ภาพที่ 4 ปูนเม็ดที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM).....	5
ภาพที่ 5 กำลั้งอัดของเฟส $C_3S$ $C_2S$ $C_3A$ และ $C_4AF$ ในปูนเม็ด.....	5
ภาพที่ 6 ปูนผงที่มีปริมาณของเฟส $C_4AF$ ที่ต่างกัน.....	6
ภาพที่ 7 องค์ประกอบของการทดลองปูนเม็ดในงานวิจัยผลกระทบของอัลคาไลต์ต่อปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ในการทำปฏิกิริยากับน้ำ.....	11
ภาพที่ 8 ระยะเวลาการก่อตัวและค่าความแข็งแรงของการทดลองปูนซีเมนต์ในงานวิจัยผลกระทบ ของอัลคาไลต์ต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำปฏิกิริยากับน้ำ.....	12
ภาพที่ 9 กราฟปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $SO_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) ที่แตกต่างกัน เพื่อวัดการเกิดของเฟส $C_2S$ และเฟส $C_3S$ .....	14
ภาพที่ 10 แผนผังแสดงข้อมูลที่ถูเก็บในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยย่อ.....	16
ภาพที่ 11 ถึง 17 การนำข้อมูลไปวิเคราะห์ในโปรแกรม mini-tab ตามขั้นตอน .....	20
ภาพที่ 18 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม azure machine learning .....	21
ภาพที่ 19 ข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม azure machine learning .....	22
ภาพที่ 20 แบบของ cooler ในระบบแผงควบคุม DCS (distributed control system) .....	28
ภาพที่ 21 แบบของ cooler สามมิติ.....	29
ภาพที่ 22 ระยะเวลาการก่อตัวและค่าความแข็งแรงของการทดลองปูนซีเมนต์ในงานวิจัย 2.2.1 .....	30
ภาพที่ 23 ผลสรุปในงานวิจัย 2.2.1.....	30
ภาพที่ 24 ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $SO_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) ที่แตกต่างกัน เพื่อวัดการเกิดของเฟส $C_2S$ และเฟส $C_3S$ ในงานวิจัย 2.2.3.....	31
ภาพที่ 25 กราฟ Residual ระหว่าง $C_3S$ observed และ $C_3S$ predicted .....	33
ภาพที่ 26 แบบหม้อเผาแสดงตำแหน่งตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ .....	34

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลการวิเคราะห์จากส่วนควบคุมคุณภาพ .....	16
ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา.....	17
ตารางที่ 3 ข้อมูลพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา.....	18
ตารางที่ 4 ข้อมูลจากทางแลป .....	18
ตารางที่ 5 การปรับแก้ข้อมูลที่หายไปจากข้อมูลในการควบคุมหม้อเผาและจากทางแลป .....	18
ตารางที่ 6 ข้อมูลจากทางแลปทั้งหมดตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 ถึง 24 สิงหาคม 2562 .....	19
ตารางที่ 7 ข้อมูลโมเดลทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม azure machine learning.....	23
ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ ในหม้อเผาที่ 3.....	24
ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ ในหม้อเผาที่ 4.....	24
ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ Preheat calciner ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ ในหม้อเผาที่ 3.....	25
ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ Preheat calciner ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ ในหม้อเผาที่ 4.....	28
ตารางที่ 12 องค์ประกอบหลักวัตถุดิบป้อนหม้อเผา (kiln feed) ณ วันที่ 1 มกราคม 2562.....	28
ตารางที่ 13 ค่า weight * Process value ของหม้อเย็น (cooler) .....	33
ตารางที่ 14 การจัดอันดับตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ .....	34
ตารางที่ 15 ตารางแสดงช่องปัญหาและข้อเสนอแนะในงานวิจัย .....	36

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย

LSF Clinker	(Lime Saturation Factor) คือปริมาณ CaO ทั้งหมดในปูนเม็ด
Ms	(Silica Modulous) บอกรปริมาณซิลิกา ต่อออกไซด์ของอลูมินาและเหล็ก
Ma	(Alumina Modulous) บอกรปริมาณอลูมินาออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์
C <sub>3</sub> S	(Tricalcium Silicate) เป็นเฟสในปูนเม็ดที่ให้กำลังอัดสูงในช่วงสัปดาห์แรก
C <sub>2</sub> S	(Dicalcium Silicate) เป็นเฟสในปูนเม็ดที่ให้กำลังอัดสูงในระยะยาว
C <sub>3</sub> A	(Tricalcium Aluinate) เป็นเฟสในปูนเม็ดที่ทำให้เกิดการเซตตัวของปูนซีเมนต์
C <sub>4</sub> AF	(Tetracalcium Aluminoferrite) เป็นเฟสที่ให้สีเทาแก่ปูนเม็ด
XRF	(X-ray Fluorescence Spectrometry) เป็นเครื่องวัด % ธาตุออกไซด์
XRD	(X-ray Diffractometer Spectrometry) เป็นเครื่องวัด % เฟสในปูนเม็ด
$\Delta H^0$	เป็นปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบในกระบวนการความดันคงที่
$\Delta S^0$	เป็นค่าที่อธิบายความไม่เป็นระเบียบของสสาร
$\Delta G^0$	เป็นฟังก์ชันที่สามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยานี้ จะเกิดขึ้นเองได้หรือไม่
R <sup>2</sup>	(Coefficient of Determination) เป็นค่าบ่งบอกว่า model จะแม่นยำมากหรือน้อย
ASTM	American Society for Testing and Materials) คือสมาคมวิชาชีพ ทางด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ที่กำหนด และจัดทำมาตรฐาน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ และเป็นที่ยอมรับทั่วโลก
มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์
K3	ย่อมาจาก Kiln 3 แปลว่า หม้อเผาที่ 3
TOC	(Total Organic Carbon) คือค่าศัพท์ที่ใช้อธิบายถึง สารอินทรีย์(ที่พื้นฐานมีคาร์บอน) ซึ่งปนเปื้อนอยู่ในระบบน้ำ
LOI	(Loss on Ignition) เป็นการหาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของปูนซีเมนต์
Liter Weight	เป็นค่าทดสอบน้ำหนักปูนเม็ดจะบอกได้ว่าปูนเม็ดจะถูกเผามากเกินไปหรือเผาไม่สุก

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากทาง บริษัทปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด มีการควบคุมค่าเฟส  $C_3S$  ซึ่งเป็นกำลังอัดของปูนเม็ด ซึ่งควบคุมโดยใช้เกณฑ์ในการควบคุมสองค่าคือปริมาณ  $CaO$  ในปูนเม็ด (LSF) และค่าปริมาณ  $CaO$  ในปูนเม็ดที่ไม่ถูกเผา (free  $CaO$ ) เนื่องจากเป็นค่าที่ง่ายต่อการควบคุม แต่ยังคงเกิดปัญหาเป็นอย่างมาก เพราะบางครั้งค่า LSF และค่า free  $CaO$  อยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่ค่าเฟส  $C_3S$  ยังไม่ได้อยู่ในค่าที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ปูนซิเมนต์ได้ในอนาคต

ถ้าหากเฟส  $C_3S$  ลดลงประมาณ 2 % จะทำให้กำลังอัดปูนซีเมนต์ลดลงประมาณ 5 % ซึ่งถ้าคิดเป็นมูลค่าการสูญเสียสูงถึง 20 ล้านบาทต่อปี [1] ดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงมีความประสงค์ที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายการเกิดเฟส  $C_3S$  จึงจะได้ทราบว่า มีตัวแปรใดบ้าง ณ ปัจจุบันที่มีผลต่อค่าเฟส  $C_3S$  จากนั้นนำตัวแปรเหล่านั้นมาใช้เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจในอนาคต

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อมาทำนายการเกิดเฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ดพอร์ตแลนด์

1.2.2 หาพารามิเตอร์ใหม่ที่มีผลต่อเฟส  $C_3S$  จากนั้นเพิ่มลงในโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อทำให้มีการตัดสินใจในการควบคุมคุณภาพปูนเม็ดที่ดีขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ข้อมูลที่รวบรวมจากทางบริษัทปูนซิเมนต์ไทย(แก่งคอย)จำกัด จากส่วนข้อมูลหม้อเผาที่ 3 (kiln K3) จากทั้งหมด 4 หม้อเผา ได้แก่ ผลการวิเคราะห์จากส่วนควบคุมคุณภาพและพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา ซึ่งค่าทั้งหมดที่กล่าวมาจะทำการรวบรวมข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ.2562 ถึงวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2562

โดยจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป ซึ่งจะเป็นตัวแปรแบบค่าเฉลี่ยรายวัน โดยกำหนดให้ตัวแปรต้นเป็นตัวแปรจากผลการวิเคราะห์จากส่วนควบคุมคุณภาพและพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผาและกำหนดให้ตัวแปรตามคือเฟส  $C_3S$  เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรต้นตัวแปรใดที่มีผลต่อตัวแปรตามมากที่สุด

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 เรียนรู้กระบวนการผลิตทั้งหมดในการผลิตปูนซีเมนต์
- 1.4.2 เก็บรวบรวมข้อมูลจากหม้อเผาที่ 3 โดยจะมีข้อมูลจากทางแลปควบคุมคุณภาพและพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา ซึ่งเป็นข้อมูลเฉลี่ยรายวัน
- 1.4.3 กำหนดขอบเขตข้อมูล 1 ปีย้อนหลัง ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2562 ถึง 24 สิงหาคม พ.ศ. 2562
- 1.4.4 นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม mini-tab เพื่อตัดข้อมูลที่ไม่อยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% (95% confidence interval) เพราะบางข้อมูลอาจจะเป็นข้อมูลที่อยู่ในช่วงการเดินหม้อเผา (startup) หรือปิดระบบการเผา (shut down)
- 1.4.5 นำข้อมูลไปวิเคราะห์ในโปรแกรม azure machine learning เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อดูความสัมพันธ์ของตัวแปรต้น (X) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม (Y)
- 1.4.6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ถ้าหากงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วง ประโยชน์จากทางบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด คือจะมีการควบคุมค่าเฟส  $C_3S$  ที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถลดค่าการสูญเสียได้ประมาณ 20,000,000 บาทต่อปี และจะมีตัวแปรหรือตัวเลือกในการตัดสินใจมากขึ้นเมื่อกำลังอัดของปูนเม็ดไม่ได้มาตรฐาน

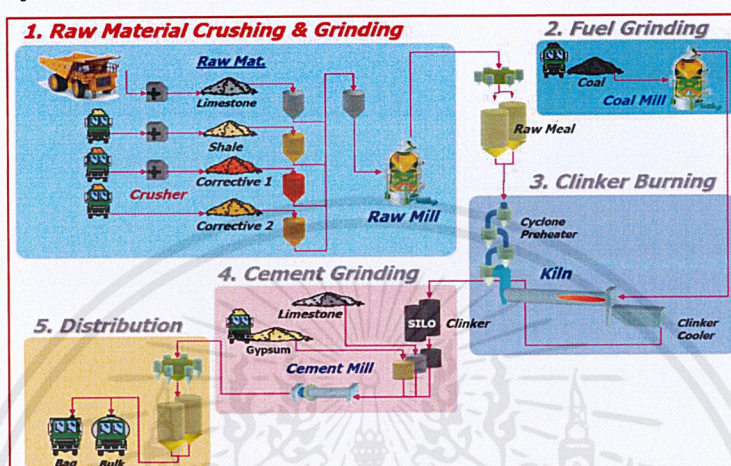
ประโยชน์ที่ผู้ทำการวิจัยได้รับคือกระผมได้เรียนรู้การใช้ชีวิตในการทำงานจริง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการใช้ชีวิตอยู่ในโรงงานและได้เรียนรู้ประสบการณ์ในการทำงานจริง ๆ เช่น การสื่อสารกับพนักงานโอเปอเรเตอร์ ซึ่งแต่ละคนมีความแตกต่างกัน ดังนั้นผมมองว่าตลอดการทำวิจัยนี้ผมได้ทักษะในการสื่อสารเพิ่มขึ้นมากและสิ่งที่กระผมได้เรียนรู้ก็คือหน้าที่ในการตัดสินใจของวิศวกร ซึ่งมีความกดดันมากและได้รู้ว่าสิ่งที่เราเรียนในมหาวิทยาลัยนั้นสามารถนำมาใช้ได้จริง ๆ และสุดท้ายสิ่งที่ผมได้คือความสัมพันธ์ไม่ว่าจะเป็นพนักงานวิศวกรและพนักงานโอเปอเรเตอร์

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยย่อ (Process Overview) [2]

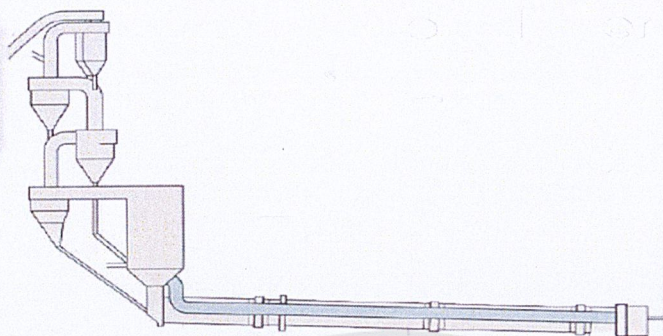


ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยย่อ [2]

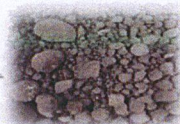
เตรียมวัตถุดิบหลักคือ หินปูน หินดินดาน ดินเหนียว และดินลูกรัง โดยจะนำหินปูนและหินดินดานผ่านเครื่องย่อยปูนก่อน สำหรับย่อยให้มีขนาดเหมาะสมก่อนเข้าหม้อบดวัตถุดิบ (raw mill) จากนั้นจะเก็บไว้ในถังเป็นกอง จากนั้นจะเก็บไว้ในถังเก็บความชื้น (hopper) และจะใช้ตัวป้อนวัตถุดิบ (feeder) ควบคุมส่วนผสมให้หินปูนต่อหินดินดานมีสัดส่วนประมาณ 4 : 1 ก่อนเข้าหม้อบดวัตถุดิบ วัตถุดิบที่ผ่านหม้อบด (raw mill) จะเปลี่ยนชื่อเป็น raw meal ซึ่งผ่านการบดและตรวจสอบคุณภาพแล้ว จากนั้นจะส่งไปที่หม้อผสม (blending silo) เพื่อผสมให้เข้ากัน จากนั้นจะมีการควบคุมปริมาณด้วยตัวป้อนวัตถุดิบก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1400 ถึง 1600 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อเผาเสร็จจะนำไปสตูดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วที่หม้อเย็น โดยภายในจะมีแผ่นตะแกรงที่มีรูพรุนลำเลียง สำหรับให้ลมเย็นผ่านขึ้นไประบายความร้อน จากนั้นจะนำไปบดต่อที่หม้อบดปูนเม็ด (clinker mill) เพื่อให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 มิลลิเมตร แล้วลำเลียงไปยังถังเก็บความชื้นและที่ถังเก็บความชื้นจะมีการผสมยิปซัมประมาณ 3 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับควบคุมเวลาการก่อตัว (setting time) จากนั้นตัวป้อนวัตถุดิบจะควบคุมน้ำหนักและปริมาณเพื่อเข้าสู่หม้อบดซีเมนต์ (cement mill) จากนั้นจะนำไปสู่เครื่องแยก (separator) เพื่อแยกส่วนหยาบกับส่วนละเอียด ปูนส่วนหยาบจะกลับเข้าสู่หม้อบด จากนั้นจะนำไปสู่ถังเก็บความชื้น (cement silo) เพื่อนำไปแพคเป็นถุงปูนหรือจำหน่ายเป็นผงต่อไป [2]

## 2.1.2 ทฤษฎีหม้อเผา (Kiln Process)

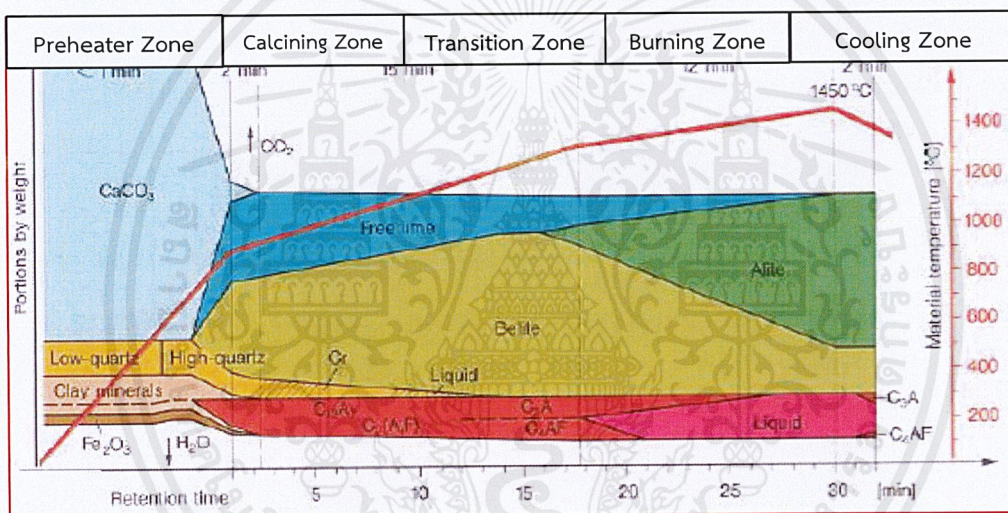
Raw Meal



Clinker



ภาพที่ 2 แบบหม้อเผา [2]



ภาพที่ 3 โซนของหม้อเผาที่ถูกแบ่งตามทฤษฎี [2]

Preheater zone : นำวัตถุดิบมาเข้าไซโคลนเพื่อไล่ความชื้นออก อุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส

Calcining zone :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$  (2.1)

อุณหภูมิประมาณ 850 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยน  $\text{CaCO}_3$  ไปเป็น  $\text{CaO}$  และ

$\text{CO}_2$  จะระเหยเป็นแก๊สออกไปประมาณ 40% ส่วนที่เหลือจะเป็น  $\text{CaO}$

Transition zone :  $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{S}$  (2.2)

Burning zone : Solid phase:  $\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} \rightleftharpoons \text{C}_3\text{S}$  (2.3)

Liquid phase:  $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_3\text{A}$  (2.4)

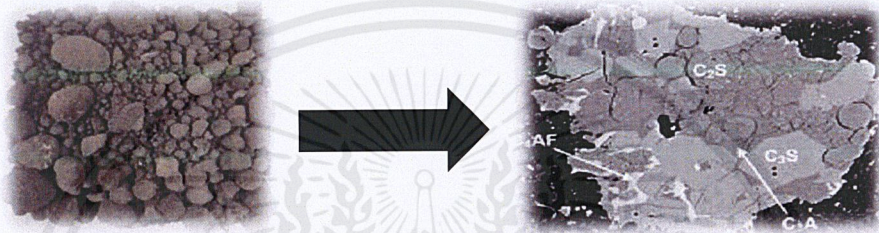
$\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_4\text{AF}$  (2.5)

Cooling zone : ลดอุณหภูมิจาก 1400 ไปเป็น 100 องศาเซลเซียส

เนื่องจากสมการ (2.3) เฟส  $C_3S$  เป็นเฟสที่ไม่เสถียร จึงต้องทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันและเป็นการทำให้เฟส  $C_3A$  และเฟส  $C_4AF$  ซึ่งเป็นเฟสของเหลวเปลี่ยนเป็นของแข็งคล้ายกับการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (quenching) [2]

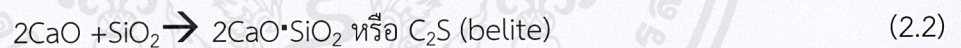
### 2.1.3 ปูนเม็ด (Clinker)

ปูนเม็ดเป็นวัตถุดิบที่ได้จากการเผา raw meal โดยจะมี 4 เฟสหลักๆ ดังนี้

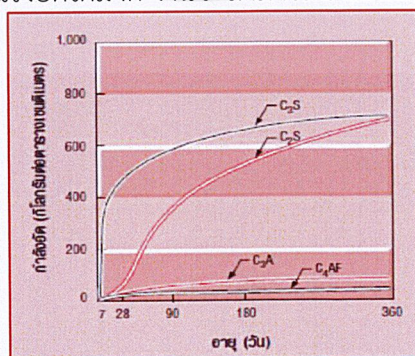


ภาพที่ 4 ปูนเม็ดที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM) [2]

2.1.3.1 เฟส  $C_2S$  (belite) เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์หนึ่งที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของปูนเม็ดกล่าวคือ  $C_3S$  ในปูนเม็ดมีผลต่อกำลังอัดของปูนซีเมนต์ (medium strength)

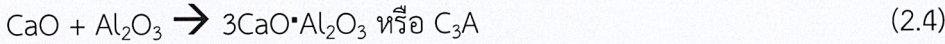


2.1.3.2 เฟส  $C_3S$  (alite) เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์หนึ่งที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของปูนเม็ดกล่าวคือเฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ดมีผลต่อกำลังอัดของปูนซีเมนต์อย่างชัดเจน (strength) จากภาพที่ 5 จะสังเกตว่าเฟส  $C_3S$  จะให้กำลังอัดที่สูงมากในเวลาอันสั้น ซึ่งเป็นเหตุผลว่า ผู้ประกอบการต้องการเปอร์เซ็นต์เฟส  $C_3S$  ที่สูง เพราะงานก่อสร้างต้องการความรวดเร็วในการดำเนินงาน ยิ่งรับแรงอัดได้มาก งานจะสามารถนำเนินได้อย่างรวดเร็ว[2]

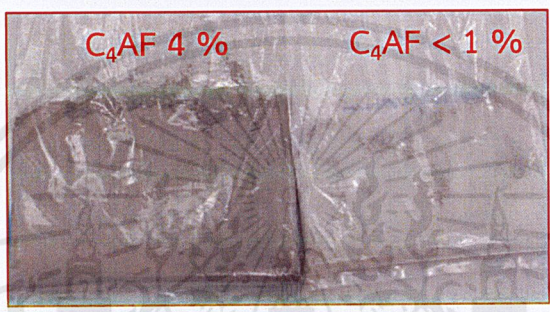
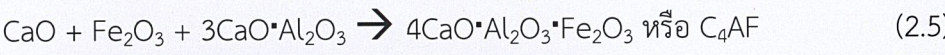


ภาพที่ 5 กำลังอัดของเฟส  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในปูนเม็ด [2]

2.1.3.3 เฟส C<sub>3</sub>A เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงความไวในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และทำหน้าที่ควบคุมการก่อตัว (setting time) ของปูนซีเมนต์รวมทั้งมีคุณสมบัติให้ค่าความร้อนสูงจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (heat of hydration) เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเฟส C<sub>3</sub>A เกิดอย่างรวดเร็ว [2]



2.1.3.4 เฟส C<sub>4</sub>AF เป็นเฟสที่ให้สีแก่ปูนซีเมนต์ [2] ตามรูปดังนี้



ภาพที่ 6 ปูนผงที่มีปริมาณของเฟส C<sub>4</sub>AF ที่ต่างกัน

2.1.4 เครื่องมือในการควบคุมคุณภาพปูนเม็ด

2.1.4.1 เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดองค์ประกอบของออกไซด์ โดยหลักการคือจะมีการยิงรังสีเอกซเรย์เพื่อทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของธาตุตัวนั้นหลุดออก ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกจะให้พลังงาน จากนั้นจะมีตัวเคาน์เป็นตัวรับแรงสั่นจากพลังงาน จากนั้นจะแปลงเป็นกราฟโดยเทียบจากธาตุที่เป็นมาตรฐาน (calibrate) โดยจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของธาตุออกไซด์ เช่น %CaO %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %SiO<sub>2</sub> และ %MgO และสุดท้ายจะมีการคำนวณออกมาเป็นค่า LSF Ms และ Ma [2] ดังสมการ

$$\text{LSF} = \text{CaO} / (2.8\text{SiO}_2 + 1.2\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3) \tag{2.6}$$

$$\text{Ms} = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \tag{2.7}$$

$$\text{Ma} = \% \text{SiO}_2 / (\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3) \tag{2.8}$$

#### 2.1.4.2 เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer Spectroscopy)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดองค์ประกอบของเฟส โดยหลักการคือยิงรังสี X-ray เข้าไปในตัวอย่าง (sample) จากนั้นเฟสแต่ละประเภทในของแข็งจะมีค่าการกระเจิงแสงที่แตกต่างกัน จากนั้นจะมีตัวรับ (receptor) จะทำการวัดมุมที่ตา ( $\theta$ ) ของเฟส จากนั้นจะทำการเทียบกับเฟสที่เป็นมาตรฐาน (calibrate) และแสดงผลออกมาเป็นกราฟ ซึ่งจะได้สัดส่วนของเฟสในของแข็งคือเฟส  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และเฟส  $C_4AF$  [2]

สมัยก่อนที่จะมีเครื่อง XRD จะใช้เครื่อง XRF โดยจะวัดองค์ประกอบของออกไซด์ของธาตุตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น แล้วนำมาคำนวณในสมการของ Bogue ดังนี้ [2]

$$C_3S = 4.071\%CaO - (7.600\%SiO_2 + 6.718\%Al_2O_3 + 1.430\%Fe_2O_3) \quad (2.9)$$

$$C_2S = 2.867\%SiO_2 - 0.7544\%C_3S \quad (2.10)$$

$$C_3A = 2.650\%Al_2O_3 - 1.692\%Fe_2O_3 \quad (2.11)$$

$$C_4AF = 3.043\%Fe_2O_3 \quad (2.12)$$

#### 2.1.5 การควบคุมคุณภาพปูนเม็ด (quality control) [1]

##### 2.1.5.1.ควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพของปูนเม็ด

##### 2.1.5.1.1ขนาดของปูนเม็ด

##### 2.1.5.1.1.1 ความสามารถในการเผา (Burnability) ของวัตถุดิบต้น

ขึ้นอยู่กับความละเอียดของการบด รวมถึงปริมาณผลึกและแคลเซียมคาร์บอเนตในวัตถุดิบต้น (Raw meal) และขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีตามที่ FLSmidth ได้ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ต่อค่า %Free Lime

$$\%Free\ Lime\ (1,400\ ^\circ C) = 0.343(LSF-93)+2.74(MS-2.3)+0.1C_{125}+0.83Q_{45}+0.39A_K \quad (2.13)$$

$$LSF(\%) = CaO/(2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3) \quad (2.6)$$

$$Ms = SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (2.7)$$

$$Ma\ (Alumina\ ratio) = Al_2O_3 / Fe_2O_3 \quad (2.8)$$

$Q_{45}$  = %quartz or flint larger than 45 micron

$C_{125}$  = %limestone grains larger than 125 micron

$A_K$  = %acid

ดังนั้นเราต้องควบคุมความละเอียดของการบดวัตถุดิบต้น (raw meal) เพราะทำให้โอเปอร์เรเตอร์ไม่ต้องทำการเผาปูนเม็ดที่อุณหภูมิสูง (overburning) เพราะถ้าเผาสูงไปจะทำให้ปูนเม็ดโต (เฟส  $C_3S$  และเฟส  $C_2S$  ขยายขนาด) ซึ่งจะใช้พลังงานสูง

#### 2.1.5.1.1.2 ค่า module ของปูนเม็ด

ถ้าค่า LSF และ Ms สูงไป จะทำให้ เม็ดมีแนวโน้มเป็นฝุ่นเช่นถ้า Ms ของปูนเม็ดสูง ( $SiO_2$ ) จะเผายากขึ้น

#### 2.1.5.1.1.3 $SO_3$ ในปูนเม็ด

ถ้าปริมาณ  $SO_3$  สูงจะทำให้ปูนเม็ดเป็นฝุ่นสูง ถ้า  $SO_3$  สูงจะทำให้เฟส  $C_3S$  ลดลง เฟส  $C_2S$  สูงขึ้น ซึ่งควบคุมโดยใช้สัดส่วนระหว่าง  $SO_3/Alkali$  ซึ่งบอกด้วยค่าการความสามารถในการบด ถ้า  $SO_3$  สูงบดยาก ถ้า  $SO_3$  ต่ำบดง่าย

#### 2.1.5.1.1.4 ทดสอบขนาดคละของปูนเม็ด

การหาขนาดของปูนเม็ดโดยการทดสอบปริมาณส่วนคละต่างตะแกรงของปูนเม็ดที่ออกจากหม้อเผา เพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและสภาพการเผาของปูนเม็ดที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์

#### 2.1.5.1.2 Liter Weight (น้ำหนัก/ปริมาตร)

ทดสอบน้ำหนักปูนเม็ดสามารถบอกได้ว่าปูนเม็ดจะถูกเผามากเกินไป (overburned) หรือเผาไม่สุก (unburned) ปูนเม็ดที่เผาได้ดีจะให้ค่า Liter Weight ที่พอเหมาะ นอกจากจะพิจารณาค่า Liter Weight แล้วควรดูลักษณะการเป็นก้อนและสีของปูนเม็ดประกอบด้วย

#### 2.1.5.2. ควบคุมคุณสมบัติทางเคมีของปูนเม็ด

ใช้เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ทางองค์ประกอบทางเคมี จากนั้นนำมาใช้ในสมการของ Bogue ที่เป็นค่าชี้บ่งคุณสมบัติทางเคมีของปูนเม็ด

$$C_3S = 4.071\%CaO - (7.600\%SiO_2 + 6.718\%Al_2O_3 + 1.430\%Fe_2O_3) \quad (2.9)$$

$$C_2S = 2.867\%SiO_2 - 0.7544\%C_3S \quad (2.10)$$

$$C_3A = 2.650\%Al_2O_3 - 1.692\%Fe_2O_3 \quad (2.11)$$

$$C_4AF = 3.043\%Fe_2O_3 \quad (2.12)$$

#### 2.1.5.2.1 free CaO ในปูนเม็ด

ถ้าเผาสุกและมีคุณภาพดี ค่า free CaO (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ดที่ไม่ถูกเผา) จะต่ำ ถ้านำไปบดจะทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังอัดสูงและค่าการขยายตัวของปูน (expansion) ต่ำ โดยการวิเคราะห์ค่า free CaO ในปูนเม็ดจะดำเนินการทุกชั่วโมง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคัดแยกปูนเม็ดให้เหมาะสมกับปูนซีเมนต์ที่ต้องการบด [2]

#### 2.1.5.2.2 LSF Ms Ma ในปูนเม็ด

ถ้าค่า LSF (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ด) สูง ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณเฟส  $C_3S$  จะสูง และถ้าหาก LSF สูงใกล้ค่า 100 อาจทำให้ปูนเม็ดมีค่า free CaO (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ดที่ไม่ถูกเผา) สูง ซึ่งจะช่วยให้ยากต่อการเผา [2]

### 2.1.5.2.3 ปริมาณเฟส $C_3S$ ในปูนเม็ด

ปริมาณเฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ดเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของปูนเม็ด ซึ่งมีผลต่อกำลังอัดของปูนซีเมนต์ วัดได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ XRD ซึ่งเป็นเฟสปูนเม็ดที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจะต่างกับค่า  $C_3S$  ที่ได้จากค่าออกไซด์ต่าง ๆ ตามสมการของ Bogue คือ (2.21) (2.22) (2.23) และ (2.24)

### 2.1.5.2.4 ปริมาณเฟส $C_3A$ ในปูนเม็ด

ทำหน้าที่ควบคุมการก่อตัว (setting) และมีค่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (heat of hydration) จะมีการควบคุมเพื่อปรับปริมาณยิปซัมและ  $\%SO_3$  ให้เหมาะสม โดยเฟส  $C_3A$  มี 2 ฟอรัมคือ cubic และ orthorhombic ซึ่งผลึก orthorhombic มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงจะใช้น้ำในการทำปฏิกิริยามาก เมื่อเรานำไปผสมเป็นคอนกรีตกำลังอัดจะลดลง ดังนั้นโรงงานจะควบคุมเฟส  $C_3A$  ให้น้อยที่สุด

โดยการปรับค่าจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{SO_3}{\text{Alkali}} \propto \frac{1}{\text{Orthorombic}(C_3A)} ; \frac{SO_3}{\text{Alkali}} = \frac{\frac{SO_3}{80}}{\frac{K_2O}{94} + \frac{Na_2O}{62}} \quad (2.14)$$

ดังนั้นเมื่อ  $\% SO_3$  สูงขึ้นจะต้องทำการปรับยิปซัม (optimum) ให้ต่ำลง

### 2.1.5.2.5 ปริมาณ $\%SO_3$ ในปูนเม็ด

ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์จะส่งผลต่อกำลังอัด เวลาในการก่อตัว การขยายตัวของปูนซีเมนต์ และส่งผลต่อกระบวนการเผา เช่น ถ้าหาก  $\%SO_3$  สูง อาจทำให้ไฮโดรเจนตันได้และอาจทำให้ปูนเม็ดเป็นฝุ่นได้ง่าย ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพหม้อบดลดลงและต้องใช้ไฟฟ้ามากขึ้น

### 2.1.5.2.6 Clinker Microscopy

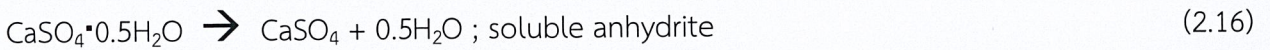
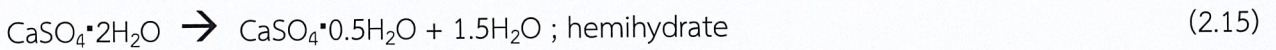
กล้องจุลทรรศน์จะบอกความยากง่ายในการบดของปูนเม็ด ซึ่งจะขึ้นกับปริมาณเฟส  $C_3S$  และเฟส  $C_2S$  โดยจะวิเคราะห์ขนาดผลึก  $C_3S$  ความพรุน (porosity) ขนาดรูพรุนของปูนเม็ด โดนมีการทดลองให้มี  $\%C_3S$  และ  $\%C_2S$  ต่างกัน และให้ความละเอียดเท่ากัน ผลปรากฏว่า ที่  $\%C_3S$  สูง และ  $\%C_2S$  ต่ำ จะใช้พลังงานในการบดน้อยที่สุด

### 2.1.5.2.7 ยิปซัม (gypsum)

ยิปซัมจะมีการรวมกับปูนเม็ด เพื่อควบคุมเวลาการก่อตัว (setting time) ซึ่งยิปซัมมี 2 รูปหลักๆตามธรรมชาติ คือ Dihydrate Gypsum ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ซึ่งเสถียรและพบมากที่สุดธรรมชาติอยู่บริเวณหน้าเหมือง ยิปซัม อีกรูปคือ Anhydrous Calcium Sulfate ( $CaSO_4$  หรือ insoluble anhydrite) พบบริเวณด้านล่างเหมือน ยิปซัม ดังนั้นก่อนนำยิปซัมมาเติมจะต้องหาค่าความบริสุทธิ์ (purity) หรือ  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  ในเนื้อยิปซัม นอกจากนั้น impurity จะมี calcite dolomite quartz ถ้าทั้ง 3 ตัวนี้มีมากจะต้องเพิ่มยิปซัม เพื่อให้คุณภาพเท่าเดิม

ปริมาณยิปซัม หรือ %SO<sub>3</sub> ในปูนเม็ดจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดซีเมนต์ เช่น Portland Cement Type I ;  
 %SO<sub>3</sub> ≤ 3% และ C<sub>3</sub>A ≤ 8 % ถ้า C<sub>3</sub>A ≥ 8 % ทำให้ %SO<sub>3</sub> ≤ 3.5%

ในการบดซีเมนต์ยิปซัมจะสูญเสียน้ำดังสมการ



ทั้ง hemihydrate (2.15) และ soluble anhydrite (2.16) มีความสามารถในการละลายน้ำสูง แต่ insoluble anhydrite (CaSO<sub>4</sub>) ไม่เปลี่ยนรูปเพราะไม่มีน้ำในผลึก โดยปริมาณ hemihydrate และ soluble anhydrite จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการบดซีเมนต์ (mill outlet temperature) ซึ่งสามารถควบคุมโดยการฉีดน้ำ (water spray) หรือดัดลมผ่านหม้อบด

ถ้าหากอุณหภูมิสูงไปอาจจะส่งผลต่อคุณภาพของซีเมนต์เพราะอุณหภูมิสูงจะทำให้ hemihydrate (2.15) สูงจึงทำให้คุณภาพของปูนซีเมนต์ต่ำ ดังนั้นจะต้องมีการปรับค่า hemihydrate เพื่อไม่ให้กระทบกำลังอัด

#### 2.1.5.2.8 การควบคุมระยะเวลาการก่อตัว (setting time)

ควบคุมเฟส C<sub>3</sub>A เพราะเกี่ยวกับความไวในการทำปฏิกิริยา และควบคุมยิปซัม ซึ่งจะบอกค่าการละลายได้ในน้ำ (solubility) ถ้าคุมทั้งสองได้จะเรียกว่าการระยะเวลาการก่อตัวแบบปกติ (normal set) ถ้าหาก SO<sub>3</sub> ไม่เพียงพอ จะเกิดระยะเวลาการก่อตัวอย่างรวดเร็ว (flash set) เนื่องจากเฟส C<sub>3</sub>A ว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่ายิปซัม ถ้าหาก SO<sub>3</sub> มากไปคือยิปซัมจะอยู่ในฟอร์ม hemihydrate (2.15) สูง ซึ่งการนำซีเมนต์ไปผสมน้ำจะเกิดเป็นผลึกยิปซัม “secondary gypsum” ซึ่งจะเกิดการเชื่อมอนุภาคเรียกว่าการก่อตัวแบบผิดรูป (false set) ดังนั้นจะต้องมีการปรับยิปซัม (gypsum optimization) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

C<sub>3</sub>A ↓ และ sulphate ion ↓      NORMAL SET

C<sub>3</sub>A ↑ และ sulphate ion ↑      NORMAL SET

C<sub>3</sub>A ↓ และ sulphate ion ↑      FALSE SET

C<sub>3</sub>A ↑ และ sulphate ion ↓      FAST SET

#### 2.1.5.2.9 หินปูน (Limestone หรือ $\text{CaCO}_3$ )

นิยมนำมาผสมในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ โดยการผสมจะผสมได้จำกัด โดยต้องมีค่า LOI (หรือ loss on ignition เป็นการหาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของปูนซีเมนต์) ไม่เกิน 3% ตามมาตรฐาน ASTM และมอก. ซึ่งการผสมจะช่วยลด  $\text{CO}_2$  เพราะเป็นการลดใช้ปูนเม็ดมักใช้กับปูนเสือหรือปูนแรต ซึ่งใช้ในการก่อและฉาบ โดยก่อนผสมต้องวัดค่า TOC (total organic carbon) เพื่อตรวจว่ามีสารอินทรีย์มากน้อยเพียงใด เพราะอาจจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งส่งผลต่อกำลังอัดและอาจเกิดการแตกร้าวในปูนซีเมนต์

#### 2.1.5.2.10 วัสดุประเภท ปอซโซลาน

เถ้าลอย (fly ash) เป็นผลพลอยได้ (byproduct) จากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินและลิกไนท์เป็นเชื้อเพลิง ถ้าใช้ถ่านหินเถ้าลอยจะมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบ เรียกว่า Type F (silicious) ถ้าใช้ลิกไนท์เถ้าลอยจะมี  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบเรียกว่า Type C (calcarouous) โดยก่อนผสมควรดูค่า LOI (ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา) ค่าความละเอียดและค่า Hydraulic Reactivity (ดัชนีบอกความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก : Pozzolanic Reaction)

GGBS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) จะเพิ่มความแข็งแรงและคามทนทานให้กับซีเมนต์ โดย GGBS เป็นผลพลอยได้ (byproduct)

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ผลกระทบของอัลคาไลต์ต่อปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ในการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Effect of alkalis on portland cement hydration) [3]

Composition of the Experimental Clinkers					
Clinker	Control	0.72 N	1.26 N	0.88 K	1.48 K
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ in raw meal (%)	0.0	0.89	1.40	1.70	5.00
Firing time at $1460^\circ\text{C}$ (h)	2:00	3:00	4:00	2:30	8:00
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ in clinker (%)	0.0	0.72	1.26	0.88	1.48
Maleic acid residue (%)	19.2	19.9	21.6	19.7	19.4
$\text{C}_3\text{A}$ (%)	7.7	7.0	6.8	6.9	6.2
Modification of $\text{C}_3\text{S}$	monocl.	monocl.	monocl.	monocl.	monocl.
Modification of $\text{C}_3\text{A}$	cubic	orthorh.	orthorh.	orthorh.	orthorh.
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ in $\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S}$ (%)	-	0.41	0.60	0.39	0.72
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ in $\text{C}_3\text{A}$ (%)	-	3.00	5.88	6.38	11.45
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ in $\text{C}_2$ (A;F) (%)	-	1.40	2.64	1.02	1.36

ภาพที่ 7 องค์ประกอบของการทดลองปูนเม็ดในงานวิจัยผลกระทบของอัลคาไลต์ต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำปฏิกิริยากับน้ำ [3]

ผู้จัดทำงานวิจัยกล่าวว่าอัลคาไลด์ เช่น  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการบวมตัวของปูนซีเมนต์ พวกเขาจึงได้ทำการทดลองโดยเตรียมวัตถุดิบหลัก คือ  $\text{CaO}$   $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{FeO}_3$  โดยปริมาณวัตถุดิบหลักที่นำมาจะคำนวณจากสมการของ Bogue (2.9) (2.10) (2.11) และ (2.12) โดยคิดย้อนกลับจากสัดส่วน  $70\%\text{C}_3\text{S}$   $10\%\text{C}_2\text{S}$   $10\%\text{C}_3\text{A}$  และ  $10\%\text{C}_4\text{AF}$  ต่อมาแบ่งให้  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  มีปริมาณที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 1460 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกันจะได้ปูนเม็ด จากนั้นใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อหาค่าประกอบของเฟส  $\text{C}_3\text{S}$   $\text{C}_2\text{S}$   $\text{C}_3\text{A}$  และเฟส  $\text{C}_4\text{AF}$  เมื่อใช้อัลคาไลด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้ดังนี้

ผลสรุปออกมาว่าทั้ง  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  จะไปเกาะที่เฟส  $\text{C}_3\text{A}$  และทำให้เฟส  $\text{C}_3\text{A}$  เปลี่ยนจากผลึก cubic กลายเป็นผลึก orthorhombic ซึ่งอาจจะเป็นผลเสียเนื่องจากผลึกแบบ orthorhombic สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำจึงอาจเกิดการบวมน้ำและอาจทำให้ปูนซีเมนต์แตกได้

	Setting test			Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )			
	H <sub>2</sub> O %	beg. min	end min	1 d	3 d	7 d	28 d
Control	25	180	215	20.0	41.5	61.8	74.2
0.72% Na <sub>2</sub> O in clinker	25	185	290	19.5	39.8	59.6	68.7
1.26% Na <sub>2</sub> O in clinker	25	295	360	18.4	39.2	57.5	68.2
0.88% K <sub>2</sub> O in clinker	26	150	205	21.9	44.8	60.7	72.1
1.48% K <sub>2</sub> O in clinker	32	50	135	20.0	43.1	61.0	73.2

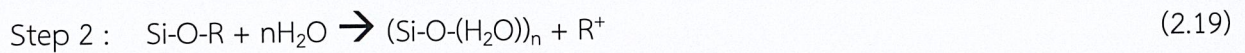
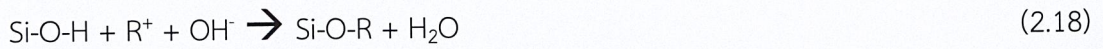
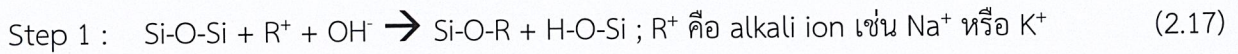
ภาพที่ 8 ระยะเวลาการก่อตัวและค่าความแข็งแรงของการทดลองปูนซีเมนต์ในงานวิจัยผลกระทบของอัลคาไลด์ต่อปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ในการทำปฏิกิริยากับน้ำ [3]

ผลสรุปของงานวิจัยกล่าวว่ายิ่งเพิ่มปริมาณ  $\text{Na}_2\text{O}$  ทำให้เวลาในการเซตตัวเพิ่มขึ้นแต่ยิ่งเพิ่มปริมาณ  $\text{K}_2\text{O}$  ทำให้เวลาในการแข็งตัวของปูนลดลง สิ่งนี้บ่งบอกว่าอัลคาไลด์มีผลต่อ  $\text{C}_3\text{A}$  เนื่องจากเฟส  $\text{C}_3\text{A}$  เป็นตัวควบคุมเวลาในการแข็งตัวของปูน

## 2.2.2 แบบจำลองการทำปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลด์และซิลิกาในคอนกรีต (Modeling of alkali-silica reaction in concrete หรือ ASR) [4]

ผู้จัดทำงานวิจัยจากห้องปฏิบัติการทางด้านอุทกศาสตร์และวิศวกรรมมหาวิทาลัยชิงกัวปักกิ่งประเทศจีน ทำการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับซิลิกา ซึ่งในการทดลองพวกเขาศึกษากระบวนการทางเคมีในปฏิกิริยาการรวมตัวของ ASR โดยศึกษากลไกการเกิด Alkali-Silica Gel ซึ่งเป็นปฏิกิริยา

การรวมตัวระหว่าง ซิลิกา อัลลาไลต์ และไฮดรอกซิลไอออน เปลี่ยนเป็นเจลอสัณฐาน (amorphous gel) ซึ่งจะขยายตัวเมื่อรวมกับน้ำ โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

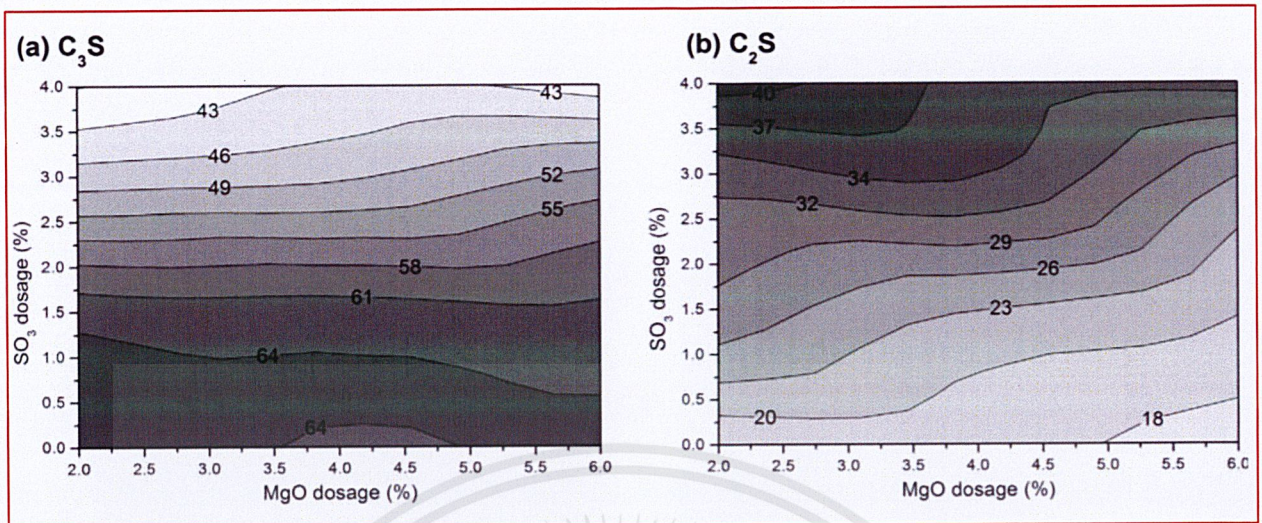


โดยเงื่อนไขในการเกิดปฏิกิริยามี 2 ข้อหลัก ๆ หนึ่งบริเวณนั้นต้องมีความเป็นด่างสูง สองความชื้นไม่น้อยกว่า 80% ในรูปุนคอนกรีต ซึ่งจากสมการสรุปว่าปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีต

### 2.2.3 ผลกระทบของ MgO และ SO<sub>3</sub> ในเฟส C<sub>3</sub>S ในปูนเม็ด (Effect of MgO and SO<sub>3</sub> on portland cement clinker : formation of clinker phase and alite polymorphism) [5]

ผู้จัดทำงานวิจัยคณะวิศวกรรมเคมีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีนานกิงประเทศจีน (Nanjing Tech University) พวกเขาศึกษาองค์ประกอบย่อยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ผิวหน้า (Interstitial Liquid) และการเติบโตของผลึกเอไลต์ (alite) โดยในการทดลองพวกเขาใช้สั้วตูดิบหลักในการทำปูนซีเมนต์ จากนั้นปรับ MgO แบ่งเป็น 3 ค่าคือ 0.6%wt 1.2%wt และ 1.8%wt และ SO<sub>3</sub> แบ่งเป็น 2 ค่าคือ 0.4% และ 0.6% โดยเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส และ 1600 องศาเซลเซียส

สรุปได้ว่าการรวมกันของอะลูมิเนียม (Al) และเหล็ก (Fe) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแมกนีเซียม (Mg) และแมกนีเซียมไอออน (Mg<sup>+</sup>) จะเข้าไปแทนที่แคลเซียมในเฟส C<sub>3</sub>S สนับสนุนการเกิดแมกนีเซียม ส่วน MgO จะไปสนับสนุนการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S Al Fe และ Ti ซึ่งอิสระจากแมกนีเซียม ส่วน SO<sub>3</sub> ในปูนเม็ดสูงจะบดได้ดีเพราะมีความมีรูปุนสูง ดังนั้น MgO จะทำให้การเกิดเฟส C<sub>3</sub>S ที่เสถียร ส่วน SO<sub>3</sub> จะทำให้เกิดเฟส C<sub>3</sub>S (alite) ที่ไม่เสถียร ซึ่งการลด MgO ทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่ระยะเวลาการแข็งตัวของปูนลดลง

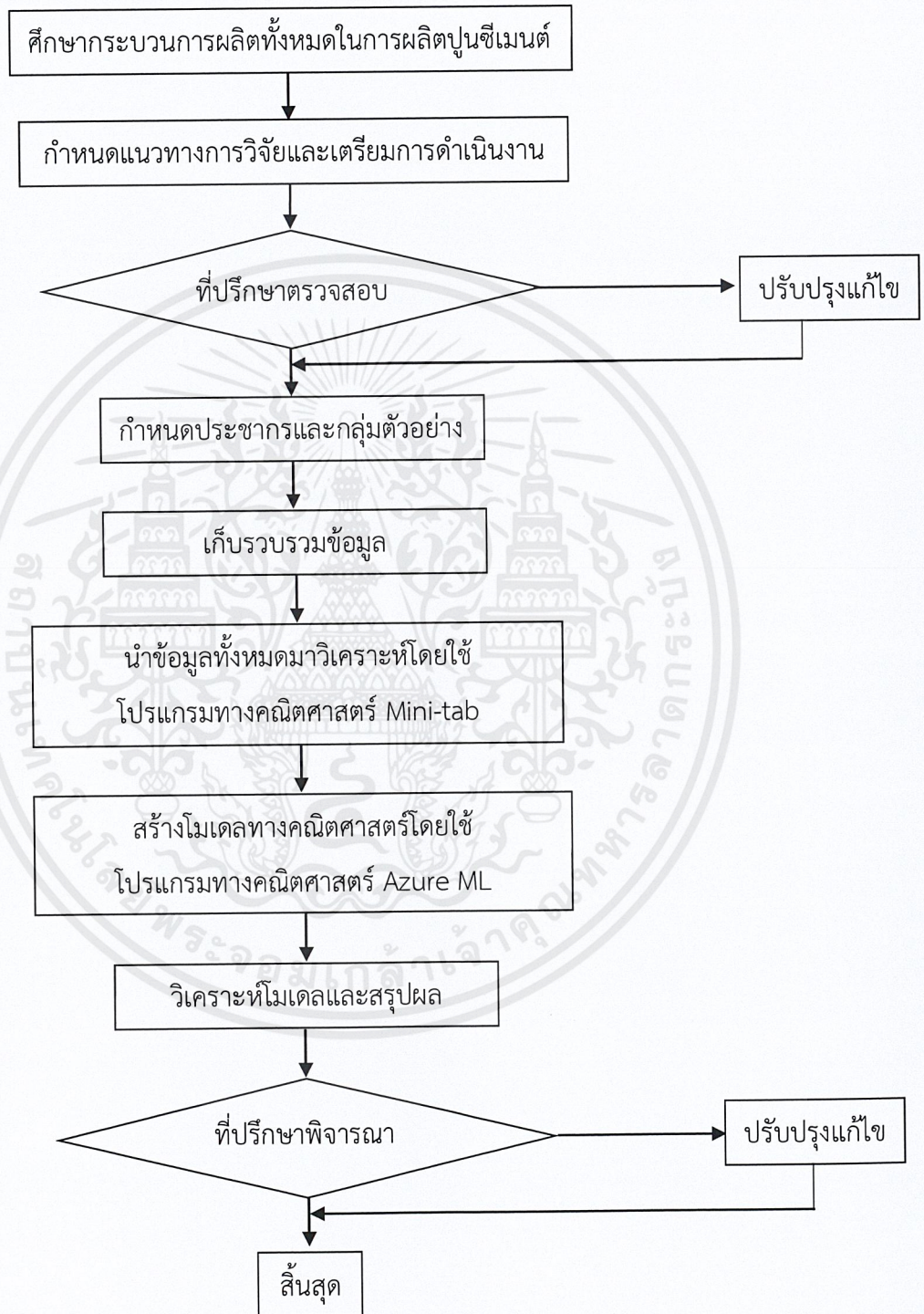


ภาพที่ 9 a) และ b) ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ที่แตกต่างกัน เพื่อวัดการเกิดของเฟส  $\text{C}_2\text{S}$  และเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  [5]

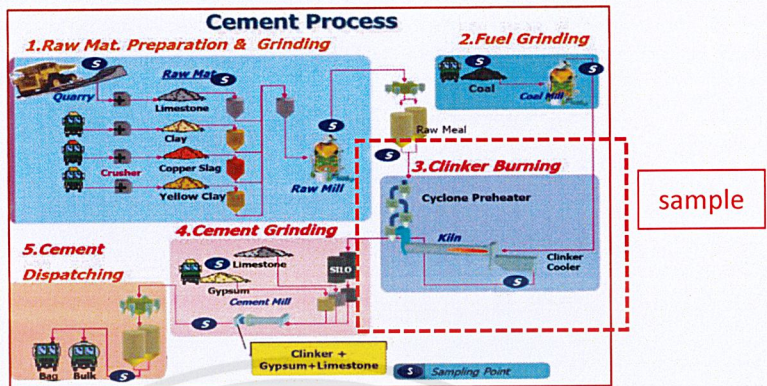
จากงานวิจัยผลกระทบของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในปูนเม็ด มีการทดลองการเพิ่มซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งได้ผลดังนี้ ถ้ากำหนดแกน X คงที่ ทำการวิเคราะห์แกน Y การมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์สูงจะทำให้มีปริมาณเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  ลดลง และเฟส  $\text{C}_2\text{S}$  สูงขึ้น และในงานวิจัยสรุปว่าแมกนีเซียมออกไซด์มีผลทำให้เกิดผลึก  $\text{C}_3\text{S}$  แต่ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์จะไปเกาะกับผลึก  $\text{C}_3\text{S}$  ซึ่งจะทำให้ผลึก  $\text{C}_3\text{S}$  ขยายตัวแต่ไม่สามารถเพิ่มปริมาณเฟส  $\text{C}_3\text{S}$

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



### 3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล



ภาพที่ 10 แผนผังแสดงข้อมูลที่ถูกเก็บในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยย่อ

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากหม้อเผาปูนเม็ดที่ 3 (ภาพที่ 2) จากทั้งหมด 4 หม้อเผา โดยมีข้อมูลจากทางแลปควบคุมคุณภาพและพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา ซึ่งเป็นข้อมูลเฉลี่ยรายวัน กำหนดขอบเขตข้อมูลประมาณ 1 ปีย้อนหลัง ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2562 ถึงวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ.2562 โดยมีตัวอย่างข้อมูลดังนี้

#### 3.2.1 ตัวอย่างข้อมูลจากทางแลปควบคุมคุณภาพ

ข้อมูลจากทางแลปควบคุมคุณภาพจะมีสองส่วน คือส่วนที่เก็บตัวอย่างจากวัตถุดิบป้อนหม้อเผา (Kiln feed) และส่วนที่เก็บตัวอย่างจากปูนเม็ด (clinker)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลการวิเคราะห์จากส่วนควบคุมคุณภาพ

Date	US70	US170	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
1/1/2562	0.70	12.07	12.48	3.44	2.06	43.23	1.06	0.16	0.31	0.10
1/2/2562	0.92	11.97	12.56	3.49	2.04	43.35	1.06	0.18	0.33	0.10
1/3/2562	0.95	12.43	12.37	3.37	1.97	43.40	1.09	0.17	0.34	0.10
1/4/2562	0.75	11.6	12.38	3.42	1.91	43.31	1.11	0.18	0.35	0.11
1/5/2562	0.95	11.35	12.34	3.44	1.94	43.37	1.10	0.17	0.35	0.11
1/6/2562	0.88	12.10	12.44	3.45	1.91	43.25	1.14	0.20	0.35	0.11
1/7/2562	0.88	12.12	12.73	3.51	1.95	43.02	1.16	0.25	0.35	0.11
1/8/2562	0.77	11.57	13.07	3.56	1.98	43.31	1.19	0.22	0.34	0.12
1/9/2562	0.77	11.07	12.88	3.80	2.00	43.35	1.15	0.20	0.33	0.13
1/10/2562	0.78	11.87	12.85	3.65	2.03	43.48	1.14	0.17	0.32	0.14

### 3.2.2 ตัวอย่างข้อมูลพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา

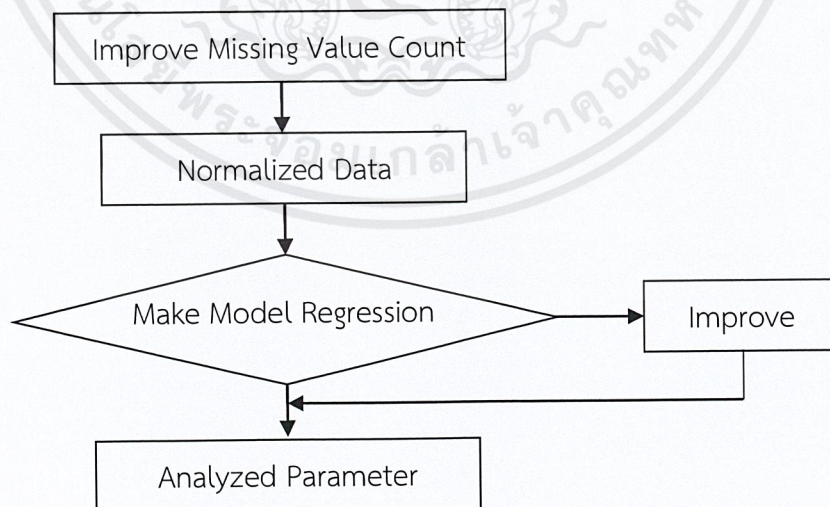
ข้อมูลพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผาเป็นข้อมูลจากห้องควบคุม (control room) ซึ่งทางโอเปอเรเตอร์จะทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ ชั่วโมง โดยบันทึกเป็นไฟล์บันทึกประจำวัน (log sheet) ลงไปในโปรแกรม Excel ประจำวันและจะทำการหาค่าเฉลี่ยรายวันทุกครั้ง

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา

Date	Fuel coal(T/H)	Preheat calciner(°C)	Cyclone1 bottom(°C)	Kiln feed (T/H)	Rotation kiln (rpm)	Torque (Amp)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)
1/1/2562	14.1	833.8	829.3	290.1	3.40	576.5	6.1	0.2000
1/2/2562	14.2	835.7	828.4	286.3	3.20	586.0	6.0	0.0000
1/3/2562	14.8	835.6	829.3	282.6	3.50	620.4	6.0	0.0000
1/4/2562	13.2	837.1	824.8	253.5	2.60	622.6	6.1	0.0275
1/5/2562	14.5	838.1	829.1	264.1	3.40	692.0	4.8	0.0275
1/6/2562	13.4	836.3	828.1	267.4	3.20	616.7	5.4	0.0296
1/7/2562	14.1	836.8	830.5	294.3	3.40	578.9	4.7	0.0300
1/8/2562	14.2	835.5	830.3	293.9	16.90	616.8	4.9	0.0296
1/9/2562	14.1	835.2	830.4	293.1	3.40	577.1	4.9	0.0250
1/10/2562	13.9	836.7	830.9	290.2	3.30	569.1	4.7	0.0282

### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล (Analysis)

มีขั้นตอนดังนี้



### 3.3.1 การปรับแก้ข้อมูลที่หายไป (Improve Missing Value Count)

เนื่องจากข้อมูลจากส่วนแลบควบคุมคุณภาพ และข้อมูลส่วนพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผาอาจจะไม่ได้เก็บในตารางการบันทึกค่ารายวัน (log sheet) ในเวลาเดียวกัน ข้อมูลในบางวันของแต่ละส่วนอาจจะหายไป ดังนั้นจึงต้องมีการการปรับแก้ข้อมูล เช่น

ตารางที่ 3 ข้อมูลพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผา

Date	Fuel coal(T/H)	Preheat calciner(°C)	Cyclonek1 bottom(°C)	Kiln Feed (T/H)	Rotation kiln (rpm)
6/15/2562	14.50	824.90	820.9	292.5	3.25
6/16/2562	14.30	825.75	821.5	290.6	4.40
6/17/2562				324.0	
6/18/2562	14.20	822.90	821.6	289.5	3.22
6/19/2562	14.67	823.70	821.2	289.8	3.21

ตารางที่ 4 ข้อมูลจากทางแลบ

Date	Na <sub>2</sub> O	LSF	Free CaO	LSF Avg	C <sub>3</sub> S sum Avg
6/15/2562	0.15	99.00	1.12	94.41	67.01
6/16/2562	0.15	99.50	1.15	94.79	67.31
6/17/2562	0.15	100.50	1.15	95.50	69.57
6/18/2562	0.14	102.70	1.22	96.29	71.32
6/19/2562	0.15	103.30	1.44	96.53	71.87

จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าตารางทางด้านซ้ายซึ่งเป็นข้อมูลส่วนพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผาในวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ.2562 หายไปบางส่วน ดังนั้นจะต้องตัดข้อมูลทั้งพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผาและข้อมูลจากทางแลบควบคุมคุณภาพในวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ.2562 ทั้งสองส่วนเพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการทำนายเฟส C<sub>3</sub>S ได้แม่นยำมากขึ้น ผลสรุปจะได้ตารางออกมาดังนี้

ตารางที่ 5 การปรับแก้ข้อมูลที่หายไปจากข้อมูลในการควบคุมหม้อเผาและจากทางแลบ

Date	Fuel coal(T/H)	Preheat calciner(°C)	Cyclonek1 bottom(°C)	Kiln Feed (T/H)	Rotation kiln (rpm)	Na <sub>2</sub> O	LSF	Free CaO	LSF Avg	C <sub>3</sub> S sum Avg
6/15/2562	14.50	824.90	820.9	292.5	3.25	0.15	99.00	1.12	94.41	67.01
6/16/2562	14.30	825.75	821.5	290.6	4.40	0.15	99.50	1.15	94.79	67.31
6/18/2562	14.20	822.90	821.6	289.5	3.22	0.14	102.70	1.22	96.29	71.32
6/19/2562	14.67	823.70	821.2	289.8	3.21	0.15	103.30	1.44	96.53	71.87

จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าข้อมูลทั้งสองส่วนจากข้อมูลพารามิเตอร์ในการควบคุมหม้อเผาและข้อมูลจากทางแลบควบคุมคุณภาพได้ถูกรวมเข้าด้วยกันและจะนำไปใช้ในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ต่อไป

### 3.3.2 การปรับข้อมูลให้เป็นมาตรฐาน (Normalized Data)

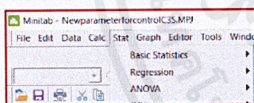
หลังจากปรับแก้ข้อมูลที่หายไปแล้ว ต่อมาจะต้องทำข้อมูลให้เป็นมาตรฐาน (normalized data) โดยเป็นการตัดข้อมูลที่ไม่มีอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% (95 % confidence interval) เนื่องจากจุดประสงค์ของการวิจัยนี้เป็นการทำนายการเกิดเฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ด ดังนั้นข้อมูลต่าง ๆ จะต้องเป็นข้อมูลของกระบวนการผลิตที่คงที่และเสถียรที่สุด โดยการทำให้ข้อมูลให้เป็นมาตรฐานจะตัดข้อมูลของกระบวนการผลิตในช่วงเริ่มเดินหม้อเผา (startup) หรือหยุดเดินหม้อเผา (shut down) ของสายการผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 6 ข้อมูลจากทางแลปทั้งหมดตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2019 ถึง 24 สิงหาคม 2019

Date	Fuel coal(T/H)	Preheat calciner(°C)	Cyclonek1 bottom(°C)	Kiln feed (T/H)	Rotation kiln (rpm)	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
1/1/2562	14.50	824.90	820.90	292.5	3.25	0.16	0.31	0.10
2/1/2562	14.30	825.75	821.50	290.6	4.40	0.18	0.33	0.10
....	....	....	....	....	....	....	....	....
24/8/2562	14.67	823.70	821.20	289.8	3.21	0.05	0.28	0.11

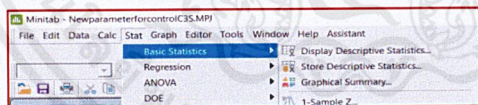
ยกตัวอย่างพารามิเตอร์ของ Preheat calciner (°C) ซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2562 จนถึงวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ.2562 จากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ในโปรแกรม mini-tab ตามขั้นตอนดังนี้

1. stat



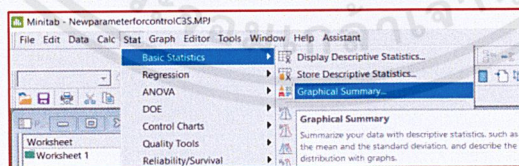
ภาพที่ 11

2. basic statistics



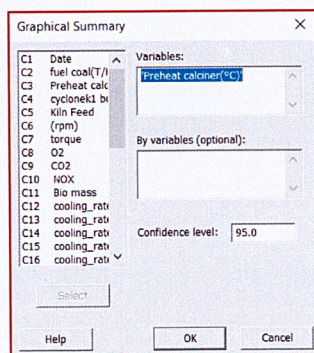
ภาพที่ 12

3. graphical summary



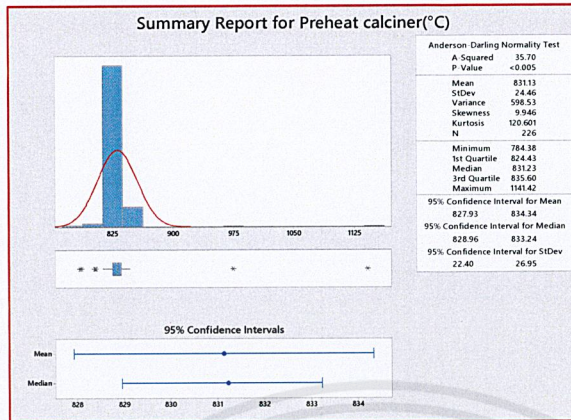
ภาพที่ 13

4. choose variables and specify confidence level at 95.0



ภาพที่ 14

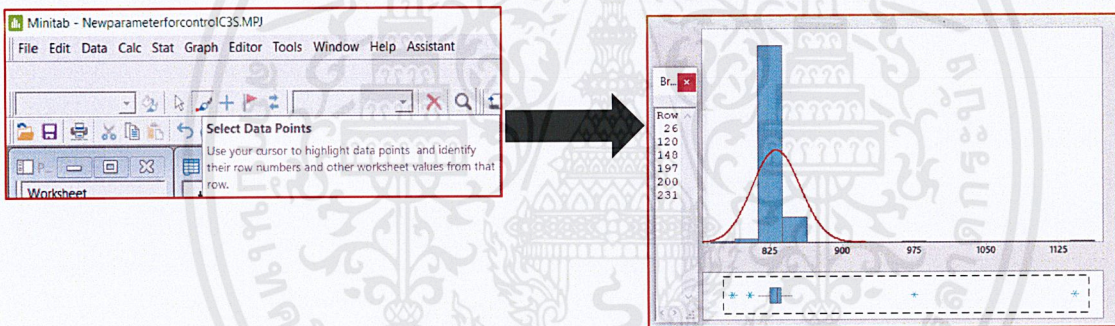
5. จะได้ผลสรุปเป็นกราฟออกมาดังรูป โดยมี ค่าเฉลี่ยคือ 831.13 °C มี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 24.46



Mean = 831.13  
StDev = 24.46  
N = 226

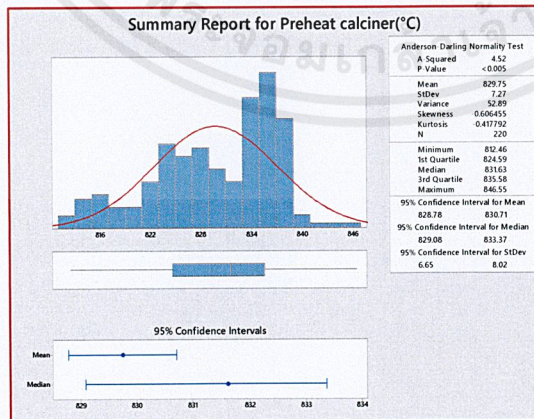
ภาพที่ 15

6. จากนั้นเมื่อได้กราฟจากข้อ 5 ให้กดเครื่องมือ select data points เพื่อคลุมข้อมูลที่เป็นดอกจัน (\*) แล้วจัดแถวข้อมูลไว้ (row) จากนั้นทำการลบแถวข้อมูลนั้น ๆ ออก



ภาพที่ 16

7. แล้วทำซ้ำตามขั้นตอนตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 5 จะได้ผลสรุปกราฟที่ผ่านการทำข้อมูลให้เป็นมาตรฐาน



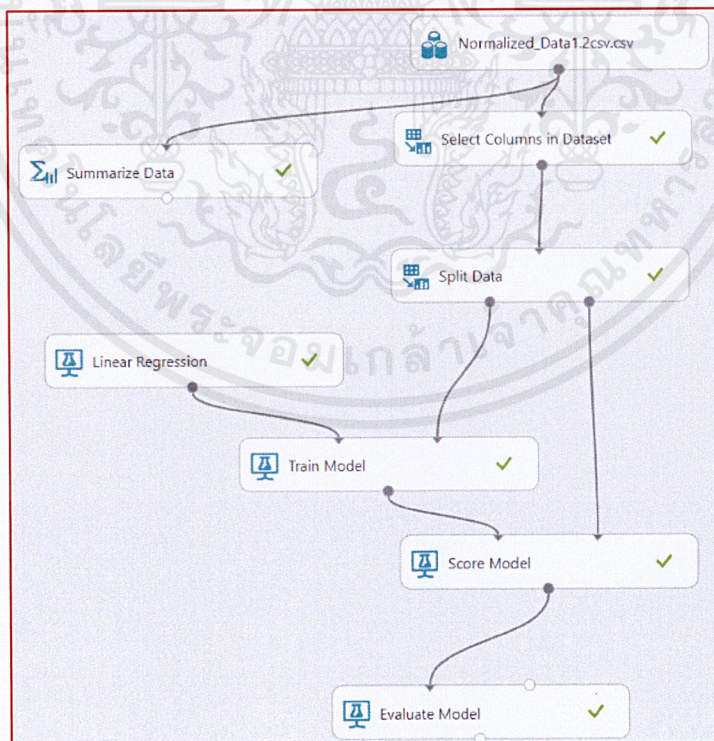
ภาพที่ 17

ภาพที่ 11 ถึง 17 การนำข้อมูลไปวิเคราะห์ในโปรแกรม mini-tab ตามขั้นตอน

### 3.3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Regression)

เมื่อทำการปรับข้อมูลให้เป็นมาตรฐานแล้ว ต่อมาจะเป็นส่วนการนำข้อมูลมาสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม azure machine learning โดยมีขั้นตอนดังนี้

- นำข้อมูลใน Excel มาลงในโปรแกรม azure จากนั้นไปที่ datasets => new => from local file โดยเลือกชนิดไฟล์เป็น Generic CSV File with a header
- ไปที่ Experiments เสริช experiment item ดังนี้
  - 2.1 Select Columns in Dataset เพื่อเลือกคอลัมน์ที่เราต้องการ
  - 2.2 Spit Data เพื่อแบ่งข้อมูลเป็น 2 ส่วน โดยใช้คำสั่ง Fraction of rows in the first output dataset : 0.80 หมายความว่า 80% ของข้อมูลจะนำไปสร้างโมเดล ส่วนอีก 20% ของข้อมูลจะนำไปทดสอบโมเดล
  - 2.3 Train Model เพื่อเลือกตัวแปรตาม (y) ที่เราต้องการจะทำนายข้อมูล
  - 2.4 Linear Regression เป็นโมเดลที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้  $y(\text{ตัวแปรตาม}) = a(x_1)+b(x_2)+c(x_3)+\dots$
  - 2.5 Score Model เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลจริงกับข้อมูลที่ทำนาย
  - 2.6 Evaluate Model เป็นการตรวจสอบแบบจำลอง โดยสามารถดูค่า Error และค่า  $R^2$  ของแบบจำลอง



ภาพที่ 18 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม azure machine learning

3. หลังจากทำตามข้อสอง โดยหาค่าค่า Error และค่า R<sup>2</sup> ของโมเดลต่อไป ให้ตรวจสอบน้ำหนักข้อมูลที่ Train Model => visualize เพื่อดู Feature Weights จากนั้นให้ทำการตัดข้อมูลที่มีน้ำหนักน้อยออกไปทีละค่า แล้วทำซ้ำตามข้อสอง ซึ่งมีตัวอย่างการสร้างโมเดลดังนี้

### Model Regression 1

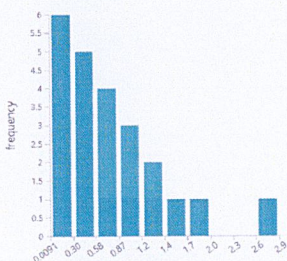
#### Feature Weights

Feature	Weight
K2O	23.116
Bias	-14.7743
SO3	-12.1821
Free CaO	-4.01487
SiO2	-3.20538
Al2O3	-2.44805
LSF Avg	1.76153
cooling_rate1	-0.987414
cooling_rate3	-0.983871
cooling_rate4	-0.977582
cooling_rateSum	0.977043
cooling_rate2	-0.970499
Fe2O3	0.889308
US70	0.368917
fuel coal(T/H)	0.229174
US170	-0.098858
O2	-0.0753182
Bio mass	-0.0736334
Kiln Feed	0.0649242
(rpm)	0.0452865
Preheat calciner(°C)	-0.0363833
cyclonek1 bottom(°C)	-0.0162889
Temp Kiln	-0.00470142
torque	-0.00275
NOX	0.00125984

#### Metrics

Mean Absolute Error	0.78719
Root Mean Squared Error	1.016397
Relative Absolute Error	0.462765
Relative Squared Error	0.258518
Coefficient of Determination	0.741482

#### Error Histogram



Coefficient of Determination = 0.741482

$$R^2 = 74.1482$$

### Model Regression 2

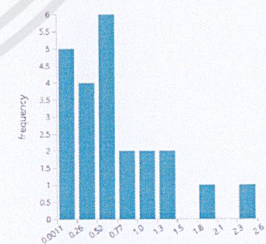
#### Feature Weights

Feature	Weight
K2O	23.7445
Bias	-19.5111
SO3	-12.4852
Free CaO	-4.12315
SiO2	-3.01186
Al2O3	-2.25973
LSF Avg	1.76434
cooling_rate1	-1.36766
cooling_rate3	-1.36188
cooling_rate4	-1.35648
cooling_rateSum	1.3558
cooling_rate2	-1.34637
fuel coal(T/H)	0.222948
O2	-0.0802769
Bio mass	-0.0747646
Kiln Feed	0.0546109
Preheat calciner(°C)	-0.0493291
(rpm)	0.0424178
Temp Kiln	-0.00496716
NOX	0.0015232

#### Metrics

Mean Absolute Error	0.769441
Root Mean Squared Error	0.979798
Relative Absolute Error	0.452331
Relative Squared Error	0.240236
Coefficient of Determination	0.759764

#### Error Histogram



Coefficient of Determination = 0.759764

$$R^2 = 75.9764$$

ภาพที่ 19 ข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม azure machine learning

4. เมื่อค่า Error และค่า R<sup>2</sup> ของโมเดลอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นนำค่า Weights มาวิเคราะห์ในโปรแกรม Excel เพื่อหาน้ำหนักของแต่ละพารามิเตอร์แท้จริงที่ส่งผลกระทบต่อเฟส C<sub>3</sub>S ในปูนเม็ด โดยจะนำมาคูณกับค่าจริงในกระบวนการผลิต จากนั้นนำมาบวกกันจะสามารถทำนายเฟส C<sub>3</sub>S ออกมาได้นั่นเอง เหตุผลที่สามารถนำมาบวกกันได้เพราะผู้วิจัยใช้โมเดลแบบเส้นตรง (linear regression) โดยเขียนสมการได้ดังนี้ ;

$$C_3S = - 19.7445K_2O - 12.4852SO_3 - 4.12315FreeCaO - 3.01186SiO_2 - 2.25973Al_2O_3 + 1.76434LSFAvg - 1.36766Cooling\_rate1 - 1.36188Cooling\_rate3 - 1.35648Cooling\_rate4 + 1.3558Cooling\_ratesum - 1.34637Cooling\_rate2 + 0.222948Fuelcoal - 0.08028O_2 - 0.07476Biomass + 0.054611Kilnfeed - 0.04933Preheatcalciner + 0.042418Rotationkiln - 0.00499Tempkiln + 0.001523NOX \quad (3.1)$$

ตารางที่ 7 ข้อมูลโมเดลทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม azure machine learning

Feature	Weight	Process value	Weight * Process value
K <sub>2</sub> O	23.7831	0.31	7.3728
Bias	-22.0535	-	-22.0540
SO <sub>3</sub>	-12.4361	0.16	-1.9898
Temp_calciner/Temp_kiln	9.1018	0.88	8.0402
Free CaO	-4.1557	1.19	-4.9453
SiO <sub>2</sub>	-3.0791	12.48	-38.4270
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-2.3144	3.44	-7.9615
LSF Avg	1.7329	95.58	165.6320
Cooling_rate1	-1.3646	368.90	-503.4000
Cooling_rate3	-1.3584	1158.70	-1573.9000
Cooling_rate4	-1.3528	1749.80	-2367.2000
Cooling_ratesum	1.3522	3737.30	5053.5400
Cooling_rate2	-1.3439	459.90	-618.0700
Fuel coal(T/H)	0.2291	14.10	3.2297
O <sub>2</sub>	-0.0690	6.10	-0.4207
Biomass	-0.0726	5.30	-0.3847
Kiln feed	0.0563	290.10	16.3297
Preheat calciner(°C)	-0.0607	833.80	-50.6050
Temp kiln	0.0035	943.90	3.3376
NOX	0.0015	496.00	0.7617
Rotation_kiln (rpm)	0.0695	3.40	0.3685
Predict	-	-	69.2565
C <sub>3</sub> S	-	70.26	70.2600

### 3.4 วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์เรียงจากมากไปน้อย สามารถจัดอันดับได้ดังนี้

ตารางที่ 8 และ ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S ในหม้อเผาที่ 3 และหม้อเผาที่ 4

Kiln K3 R <sup>2</sup> = 75.8081		Kiln K4 R <sup>2</sup> = 54.6500	
Rank of parameter that effect to C <sub>3</sub> S	Weight * Process value	Rank of parameter that effect to C <sub>3</sub> S	Weight * Process value
1. LSF avg clinker	165.6320	1. LSF avg clinker	219.8189
2. Preheat calciner (°C)	-50.6050	2. Fuel calciner (T/H)	-99.2310
3. SiO <sub>2</sub> (%)	-38.4270	3. Kiln feed(T/H)/Fuel calciner(T/H)	-93.7311
4. Kiln feed (T/H)	16.3297	4. Kiln feed(T/H)	71.3544
5. Cooling rate (m <sup>3</sup> /min)	-9.0300	5. Preheat calciner(°C)	45.4059
6. Preheat calciner/Burner	8.0402	6. LOI	-30.5130
7. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-7.9615	7. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) Kiln feed	-22.2377
8. K <sub>2</sub> O (%)	7.3728	8. Burner (°C)	-8.9340
9. Free CaO (%)	-4.9453	9. SiO <sub>2</sub> (%) Kiln feed	-7.3806
10. Temperature kiln (°C)	3.3376	10. Fuel coal (T/H)	-6.6743
11. Fuel coal (T/H)	3.2297	11. O <sub>2</sub> (%)	-6.2030
12. SO <sub>3</sub> (%)	-1.9898	12. K <sub>2</sub> O (%) Kiln feed	5.2367
13. NOX (ppm)	0.7617	13. Fuel coal(T/H)/Fuel calciner(T/H)	4.0417
14. O <sub>2</sub> (%)	-0.4207	14. Free CaO(%) clinker	-2.6600
15. Biomass (T/H)	-0.3847	15. Cooling rate (m <sup>3</sup> /min)	-1.7510
16. Rotation kiln (rpm)	0.3686	16. SO <sub>3</sub> (%) Fuel coal	-1.7510
		17. Rotation kiln (rpm)	0.8227
		18. NOX (ppm)	0.6988
		19. Preheat calciner (°C)/Burner (°C)	-0.4125

Quality Control       Operator Data

หมายเหตุ: งานวิจัยนี้เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อเผาที่ 3 (ภาพที่ 2) แต่เนื่องจากตัวแปรบางค่าเป็นตัวแปรที่มาจากค่าปรับของโอเปอเรเตอร์ หลักการทางทฤษฎีจึงไม่สามารถใช้ได้ ทางผู้จัดทำงานวิจัยจึงได้สร้างแบบจำลองของหม้อเผาที่ 4 ขึ้นมาเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบการแปรผันตามตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S ในปูนเม็ด

### 3.4.1 LSF avg clinker

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ค่า Weight \* Process value ของค่า LSF (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ด) เท่ากับ 165.6320 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S มากที่สุด และสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นบวกหมายความว่าถ้าหาก LSF สูง จะส่งผลให้เฟส C<sub>3</sub>S สูงเช่นกัน เนื่องจากสมการของ LSF (2.6) คือ  $LSF(\%) = CaO / (2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3)$  ถ้า LSF สูง จะทำให้ CaO สูง และจากสมการของ Bogue (2.9)  $C_3S = 4.071\%CaO - (7.600\%SiO_2 + 6.718\%Al_2O_3 + 1.430\%Fe_2O_3)$  ถ้า CaO สูง จะส่งผลให้เฟส C<sub>3</sub>S สูงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาของ C<sub>3</sub>S (2.2) คือ  $C_2S + CaO \rightleftharpoons C_3S$  (alite) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$LSF \text{ avg clinker} \propto C_3S$$

### 3.4.2 Free CaO (%)

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ค่า Weight \* Process value ของ free CaO (ปริมาณ CaO ที่ไม่ถูกเผาในปูนเม็ด) เท่ากับ -4.9453 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S เป็นอันดับที่เก้าและสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นลบแสดงว่าถ้าเปอร์เซ็นต์ free CaO ต่ำ จะทำให้การเกิดเฟส C<sub>3</sub>S สูงขึ้น เนื่องจากค่า free CaO ในปูนเม็ดเป็นตัวบ่งบอกถึงสภาพการเผาและบ่งบอกว่าการเผาปูนเม็ดนั้นสุกพอดีหรือไม่ โดยปกติทางโรงงานจะควบคุม free CaO ไม่ให้เกินกว่า 1.6% ในปูนเม็ด ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

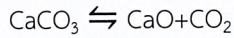
$$\text{free CaO} \propto \frac{1}{C_3S}$$

### 3.4.3 Preheat calciner และ Burner

**ตารางที่ 10** พารามิเตอร์ Preheat calciner และ Burner ที่ส่งผลต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S ในหม้อเผาที่ 3 และหม้อเผาที่ 4

2.Preheat calciner (°C) kiln K3	-50.6050	5. Preheat calciner(°C) kiln K4	45.4059
6.Preheat calciner/Burner kiln K3	8.0401	19. Preheat calciner(°C)/Burner (°C) kiln K4	-0.4125
10.Burner (°C) kiln K3	3.3376	8. Burner (°C) kiln K4	-8.9340

ตัวแปร Preheat calciner และ Burner ถ้าดูจากสัมประสิทธิ์ของสองตัวแปรนี้ ทั้งหม้อเผาที่ 3 (ภาพที่ 2) และหม้อเผาที่ 4 จะสังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์มีค่าไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากทางโอเปอเรเตอร์ทำการปรับน้ำหนัก (load) ของแต่ละหม้อเผาไม่เท่ากัน ซึ่งในหม้อเผาที่ 3 น้ำหนักจะอยู่ที่ Preheat calciner ส่วนในหม้อเผาที่ 4 น้ำหนักอยู่ที่ Burner ถ้าดูจากค่า Weight \* Process จะสังเกตได้ชัดเลยว่า Preheat calciner เป็นตัวที่มีผลต่อเฟส C<sub>3</sub>S มากที่สุดและจากทางทฤษฎีดังนี้



$$\Delta H^0 = [\Delta H_f^0(\text{CaO}) + \Delta H_f^0(\text{CO}_2)] - \Delta H_f^0(\text{CaCO}_3) \text{ at } 25^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

$$= [(1 \text{ mol})(-635.6 \text{ kJ/mol}) + (1 \text{ mol})(-393.5 \text{ kJ/mol})] - (1 \text{ mol})(-1206.9 \text{ kJ/mol})$$

$$= 177.8 \text{ kJ}$$

$$\Delta S^0 = [S^0(\text{CaO}) + S^0(\text{CO}_2)] - S^0(\text{CaCO}_3) \text{ at } 25^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

$$= [(1 \text{ mol})(39.8 \text{ J/K}\cdot\text{mol}) + (1 \text{ mol})(213.6 \text{ J/K}\cdot\text{mol})] - (1 \text{ mol})(92.9 \text{ J/K}\cdot\text{mol})$$

$$= 160.5 \text{ J/K}$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (3.4)$$

$$\Delta G^0 = 177.8 \text{ kJ} - (298 \text{ K})(160.5 \times 10^{-3} \text{ kJ/K})$$

$$= +130.0 \text{ kJ}$$

$\Delta G^0$  มีค่าเป็นบวกหมายความว่าปฏิกิริยาจะไม่สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (3.4)$$

$$0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

$$T = \frac{\Delta H^0}{\Delta S^0} = \frac{177.8 \text{ kJ}}{160.5 \times 10^{-3} \text{ kJ/K}} = 1108 \text{ K} = 835^\circ\text{C}$$

ที่  $\Delta G^0 = 0$  ปฏิกิริยาจะเกิดได้เองเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า  $835^\circ\text{C}$

จากทฤษฎีเมื่อคำนวณค่าเตลต้าจีจะพบว่ายังอุณหภูมิสูงปฏิกิริยาจะยิ่งไปข้างหน้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Preheat calciner แปรผันตามเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  และเมื่อนำสองตัวแปรนี้มาหารกันผลปรากฏว่าน้ำหนักส่วนมากจะเอนไปทางเพิ่ม Preheat calciner ส่งผลให้เฟส  $\text{C}_3\text{S}$  จะลดลงด้วย ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Preheat calciner} \propto \text{C}_3\text{S}$$

#### 3.4.4 SiO<sub>2</sub>

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ค่า Weight \* Process value ของซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ -38.4270 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S เป็นอันดับที่สามและสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นลบแสดงว่าถ้าหากซิลิกอนไดออกไซด์สูงขึ้น จะทำให้การเกิดเฟส C<sub>3</sub>S ลดลง เนื่องจากสมการ (2.6)  $LSF(\%) = CaO / (2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3)$  ถ้าซิลิกอนไดออกไซด์สูง จะทำให้ LSF (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ด) ต่ำ และจะทำให้เฟส C<sub>3</sub>S ลดลงและจากสมการของ Bogue (2.9) ถ้า SiO<sub>2</sub> สูงจะทำให้ LSF ต่ำและจะทำให้เฟส C<sub>3</sub>S ลดลงเช่นกัน

จากสมการทางเคมี



จากสมการทางเคมีซิลิกอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับ CaO ถึงสองโมเลกุล และปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเพียง 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S ดังนั้นจากสมการของ Bogue (2.9) ถ้าเฟส C<sub>2</sub>S สูง จะทำให้เฟส C<sub>3</sub>S ต่ำ นอกจากนั้นซิลิกอนไดออกไซด์สูงอาจทำให้ปูนเม็ดเป็นฝุ่นง่ายและจะทำให้ไซโคลนตันเพราะจุดหลอมเหลวของซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ที่ 1710 องศาเซลเซียส แต่ในหม้อเผามีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 1400 องศาเซลเซียส จึงทำให้ซิลิกอนไดออกไซด์ไม่ได้หลอมเหลวไปกับเฟสในปูนเม็ด และเมื่อนำปูนเม็ดไปบดจะทำให้ประสิทธิภาพหม้อบดลดลงและใช้ไฟฟ้ามากขึ้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$SiO_2 \propto \frac{1}{C_3S}$$

#### 3.4.5 Kiln feed (T/H)

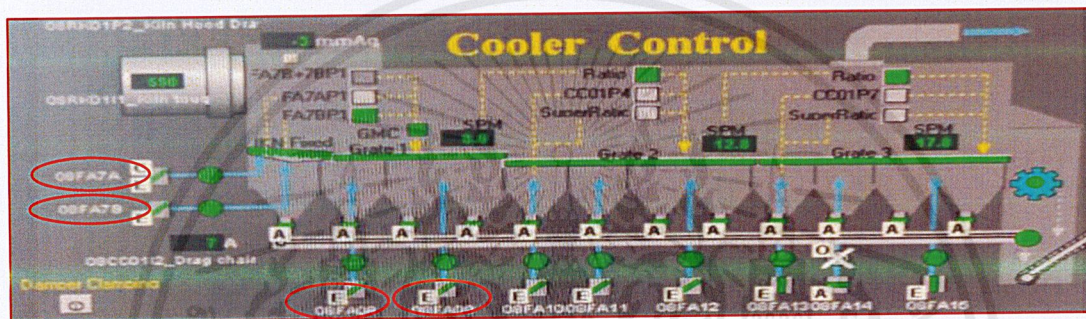
จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ค่า Weight \* Process value ของวัตถุดิบป้อนหม้อเผา (kiln feed) เท่ากับ 16.3297 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S เป็นอันดับที่สี่และสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นบวก แสดงว่าถ้าหากเพิ่มอัตราการเพิ่มวัตถุดิบ (kiln feed T/H) ให้สูงขึ้น จะทำให้การเกิดเฟส C<sub>3</sub>S สูงขึ้น เนื่องจากวัตถุดิบป้อนหม้อเผาส่วนใหญ่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งจากสมการของ Bogue (2.9) ถ้า CaO สูงขึ้นจะทำให้เฟส C<sub>3</sub>S สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Kiln feed}(T/H) \propto CaO \propto C_3S$$

ตารางที่ 11 องค์ประกอบหลักวัตถุดิบป้อนหม้อเผา (Kiln feed) ณ วันที่ 1 มกราคม พ.ศ.2562

องค์ประกอบหลักวัตถุดิบป้อนหม้อเผา	ปริมาณ(%)
CaO	43.23
SiO <sub>2</sub>	12.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.06

3.4.6 Cooling rate (m<sup>3</sup>/min)

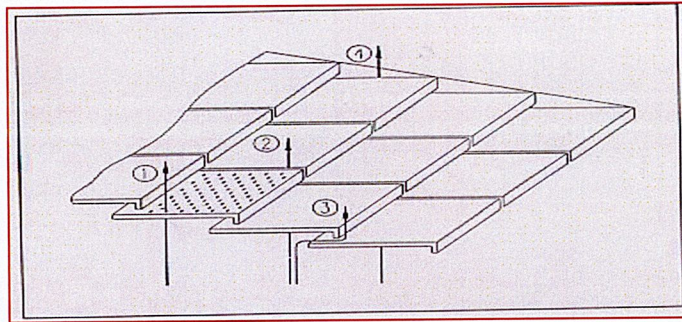


ภาพที่ 20 แบบของหม้อเย็น (cooler) ในระบบแผงควบคุม DCS (Distributed Control System)

ตารางที่ 12 ค่า weight \* Process value ของหม้อเย็น (cooler)

Kiln K3 Type	Weight * Process value	Kiln K4 Type	Weight * Process value
cooling rate1	-503.40	cooling rate1	-1.7510
cooling rate2	-618.07	cooling rate2	-8.9468
cooling rate3	-1573.90	cooling rate3	-8.4057
cooling rate4	-2367.20	cooling rate4	1.3999
cooling rate sum	5053.54	cooling rate sum	13.2929
Total	-9.03	Total	-1.7510

เนื่องจากเครื่องทำความเย็น (cooler) มีทั้งหมด 10 ตัวในสายการผลิตหม้อเผา 1 สาย กระผมจึงได้เลือกเครื่องทำความเย็นทั้งหมด 4 ตัว ดังรูป เนื่องจากสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าเฟส C<sub>3</sub>S เป็นเฟสที่ไม่เสถียรจึงต้องมีการทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเครื่องทำความเย็นทั้ง 4 ตัวที่เลือกจะอยู่บริเวณส่วนต้นของตะแกรงบริเวณที่ 1 ซึ่งจะทำให้ปูนเม็ดเย็นตัวได้เร็วที่สุด



ภาพที่ 21 แบบของหม้อเย็น (cooler) สามมิติ [2]

ต่อมาจะเป็นอัตราการไหลลม (cooling rate) ถ้าหากดูอัตราการไหลลมแต่ละตัวจะไม่สามารถสรุปได้ เพราะทางโอเปอเรเตอร์จะมีการปรับขึ้นหรือลงตลอดเวลา เพราะประสิทธิภาพอาจจะตกได้ สัมประสิทธิ์จึงมีทั้งบวกและลบ จึงต้องมาดูที่ค่าอัตราการไหลลมรวม (cooling rate sum) ซึ่งสัมประสิทธิ์เป็นบวกเนื่องจากการเกิดเฟส  $C_3S$  เป็นเฟสที่ไม่เสถียร ถ้ายังอัตราการไหลลมสูงขึ้น จะสามารถหยุดการขยายตัวและเก็บปริมาณเฟส  $C_3S$  ไว้ได้มาก เพราะเฟส  $C_3S$  ไม่เสถียรจึงสรุปได้ว่าอัตราการไหลลมรวมแปรผันตามเฟส  $C_3S$

$$\text{Cooling rate sum} \propto C_3S$$

#### 3.4.7 $Al_2O_3$ (%)

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ค่า Weight \* Process value ของอะลูมิเนียมออกไซด์เท่ากับ -7.7735 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดเฟส  $C_3S$  เป็นอันดับที่เจ็ดและสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นลบ แสดงว่าถ้าหากค่าอะลูมิเนียมออกไซด์สูงขึ้นจะทำให้การเกิดเฟส  $C_3S$  ลดลง เนื่องจากสมการของ Bogue (2.9)  $C_3S = 4.071\%CaO - (7.600\%SiO_2 + 6.718\%Al_2O_3 + 1.430\%Fe_2O_3)$  ถ้า  $Al_2O_3$  สูง จะทำให้เฟส  $C_3S$  ลดลง และจากปฏิกิริยาเคมี (2.4)  $CaO + Al_2O_3 \rightarrow C_3A$  ถ้าหากอะลูมิเนียมออกไซด์สูง จะไปรวมตัวกับแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งจะทำให้ค่า LSF (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ด) ลดลง จึงส่งผลให้เฟส  $C_3S$  ลดลง ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Al_2O_3 \propto \frac{1}{C_3S}$$

#### 3.4.8 $K_2O$ (%)

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ค่า Weight \* Process value ของโพแทสเซียมออกไซด์เท่ากับ 7.3728 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดเฟส  $C_3S$  เป็นอันดับที่แปดและสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นบวกแสดงว่าถ้าหากโพแทสเซียมออกไซด์สูงขึ้นจะทำให้การเกิดเฟส  $C_3S$  สูงขึ้น

เนื่องจากงานวิจัย 2.2.1 ผลกระทบของอัลคาไลต์ต่อปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ในการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Effect of alkalis on portland cement hydration) [3]

	Setting and Strength Properties of the Experimental Cements						
	H <sub>2</sub> O %	Setting test		Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )			
		beg. min	end min	1 d	3 d	7 d	28 d
Control	25	180	215	20.0	41.5	61.8	74.2
0.72% Na <sub>2</sub> O in clinker	25	185	290	19.5	39.8	59.6	68.7
1.26% Na <sub>2</sub> O in clinker	25	295	360	18.4	39.2	57.5	68.2
0.88% K <sub>2</sub> O in clinker	26	150	205	21.9	44.8	60.7	72.1
1.48% K <sub>2</sub> O in clinker	32	50	135	20.0	43.1	61.0	73.2

ภาพที่ 22 ระยะเวลาการก่อตัวและค่าความแข็งแรงของการทดลองปูนซีเมนต์ในงานวิจัย 2.2.1 [3]

ซึ่งผลปรากฏว่าค่าความแข็งแรง (strength) ของปูนเม็ดเพิ่มขึ้นแต่การมีอัลคาไลอยู่ในปูนเม็ดจะทำให้ปูนซีเมนต์แตกร้าว เนื่องจากอัลคาไลจะไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำทำให้เกิดการแตก (crack) ตามผนังปูนซีเมนต์ตามบ้านดังนี้

Alkali-Aggregate Reaction (AAR) ; R<sup>+</sup> is alkali ion (Na<sup>+</sup> or K<sup>+</sup>)



ดังนั้นควรควบคุมค่าอัลคาไลให้น้อยที่สุด ซึ่งในโรงงานมีการควบคุมค่าอัลคาไล (total alkalis = Na<sub>2</sub>O + 0.658 K<sub>2</sub>O) ไม่ให้เกิน 0.6% และผลสรุปของการทดลองยังบอกว่าอัลคาไลไม่ได้เกี่ยวข้องกับการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S หรือเฟส C<sub>3</sub>A มากนัก ดังนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ไม่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดเฟส C<sub>3</sub>S

### Conclusions

1. Alkalies present in cement in the form of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> or K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> do not alter significantly the progress of hydration - that of the C<sub>3</sub>S- and C<sub>3</sub>A phases in particular.

ภาพที่ 23 ผลสรุปในงานวิจัย 2.2.1 [3]

#### 3.4.9 Free CaO clinker (%)

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ค่า Weight \* Process value ของ free CaO (ปริมาณ CaO ในปูนเม็ดที่ไม่ถูกเผา) เท่ากับ -4.9453 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิด C<sub>3</sub>S เป็นอันดับที่เก้าและสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นลบแสดงว่า

ถ้าเปอร์เซ็นต์ free CaO ต่ำ จะทำให้การเกิด  $C_3S$  สูงขึ้น เนื่องจากค่า free CaO ในปูนเม็ดเป็นตัวชี้ถึงสภาพการเผาและบ่งบอกว่าการเผาปูนเม็ดนั้นสุกพอดีหรือไม่ ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Free CaO clinker} \propto \frac{1}{C_3S}$$

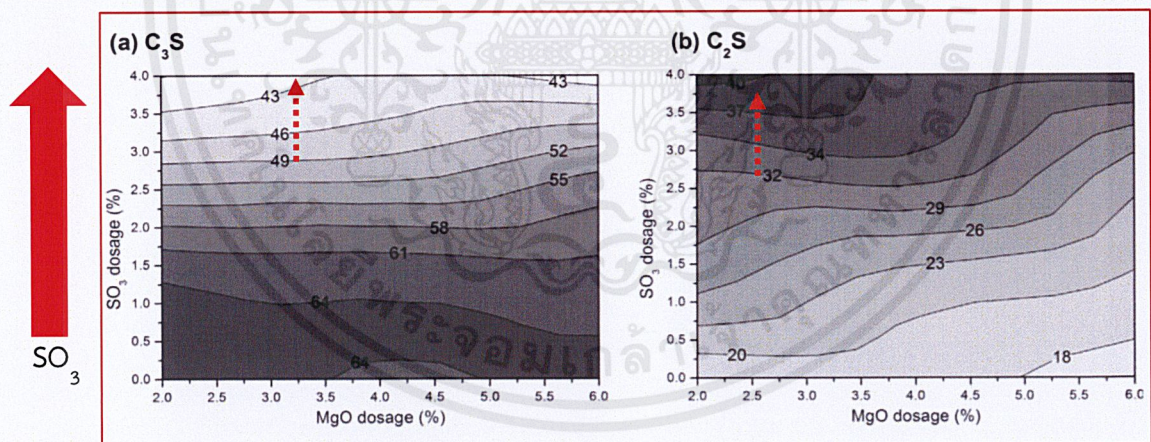
### 3.4.10 Fuel coal (T/H)

Fuel coal ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ใน Burner (เปลวไฟสำหรับเผาปูนเม็ด) ซึ่งโดยปกติการเพิ่มถ่านหินจะทำให้ Burner มีอุณหภูมิสูงพอให้เกิด  $C_3S$  แต่ในหม้อเผาที่ 4 (ภาพที่ 2) สัมประสิทธิ์ติดลบเนื่องจากการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ที่ว่าภาระ (load) ของหม้อเผาที่ 4 อยู่ที่ Burner ทางสมการคณิตศาสตร์จึงปรับให้ลดลงแต่เมื่อเทียบตัวแปรระหว่าง Fuel coal กับ Fuel calciner ซึ่งจะพบว่า การเพิ่ม Fuel coal จะทำให้เฟส  $C_3S$  เพิ่มขึ้น

$$\text{Fuel coal} \propto C_3S$$

### 3.4.11 $SO_3$ (%)

ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงประเภทปิโตรเลียมโค้ก (petcoke) จากงานวิจัยผลกระทบของ  $SO_3$  และ MgO ในปูนเม็ด ได้มีการทดลองการเพิ่ม  $SO_3$  และ MgO ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 24 ปริมาณ  $SO_3$  และ MgO ที่แตกต่างกัน เพื่อวัดการเกิดของเฟส  $C_2S$  และเฟส  $C_3S$  ในงานวิจัย 2.2.3 [5]

ถ้ากำหนดแกน x ให้คงที่แล้วสังเกตแกน y การมีปริมาณ  $SO_3$  สูงจะทำให้มีปริมาณ  $C_3S$  ลดลง และเฟส  $C_2S$  สูงขึ้น และในงานวิจัยสรุปว่า MgO มีผลทำให้เกิดผลึก  $C_3S$  แต่  $SO_3$  จะไปเกาะกับผลึก  $C_3S$  ซึ่งจะทำให้ผลึก  $C_3S$  โต แต่ไม่ได้เพิ่มปริมาณ จึงสรุปได้ว่า  $SO_3$  แปรผกผันกับ  $C_3S$  แนวทางการควบคุม  $SO_3$  คือ ควบคุมสัดส่วนระหว่าง  $SO_3$ /Alkali ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

$$\text{SO}_3 \propto \frac{1}{\text{C}_3\text{S}}$$

### 3.4.12 biomass (T/H)

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ค่า Weight \* Process value ของชีวะมวลเท่ากับ -0.3847 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  เป็นอันดับที่สิบห้าและสัมประสิทธิ์มีค่าลบ ชีวะมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงทางเลือก เป็นเชื้อเพลิงที่ต้องการออกซิเจนในการเผาไหม้มากเพราะมีความชื้นสูงดังนั้นจึงทำให้หม้อเผาอาจมีความร้อนไม่พอในการเกิดเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  ดังนั้นสรุปว่า ชีวะมวลนั้นแปรผกผันกับเฟส  $\text{C}_3\text{S}$

$$\text{Biomass} \propto \frac{1}{\text{C}_3\text{S}}$$

### 3.4.13 NOX (ppm)

ค่าไนออก (NOX) ซึ่งโดยปกติไนโตรเจนจะไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศยกเว้นที่ ๆ อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่วัดเพื่อป้องกันว่าถ้าค่าไนออกต่ำหม้อเผาเริ่มเย็นและการเผาไหม้อาจจะไม่ดี ซึ่งเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  เป็นเฟสที่ต้องการอุณหภูมิสูงในการเกิด ดังนั้นยังมีค่าไนออกสูงจะทำให้อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  แต่ต้องคำนึงถึงมาตรฐานอุตสาหกรรมด้วย จึงสรุปว่าค่าไนออกจะแปรผันตามเฟส  $\text{C}_3\text{S}$

$$\text{NOX} \propto \text{C}_3\text{S}$$

### 3.4.14 O<sub>2</sub> (%)

ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นค่าที่วัดบริเวณปล่องระบายอากาศ (stack) ซึ่งถ้าหากออกซิเจนสูงแสดงว่าความสามารถในการเผาต่ำและการมีเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่สูงจะทำให้หม้อเผาเย็น ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำจะทำให้การเกิดเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  ลดลง ดังนั้นสรุปว่าออกซิเจนจะแปรผกผันกับการเกิดเฟส  $\text{C}_3\text{S}$

$$\text{O}_2 \propto \frac{1}{\text{C}_3\text{S}}$$

### 3.4.15 Rotation kiln (rpm)

ความเร็วรอบหม้อเผา ยิ่งรอบนาน ปูนเม็ดจะอยู่ในหม้อเผานาน ดังนั้นอุณหภูมิจะสูงพอให้สามารถเกิดเฟส  $\text{C}_3\text{S}$  ได้ แต่ต้องคำนึงถึงค่าแรงบิด (torque) เพราะยังอยู่ในหม้อเผานานจะมีการเสียดสีมากและใช้พลังงานมาก ซึ่งเป็นต้นทุนของบริษัท ดังนั้นสรุปว่ารอบหม้อเผาแปรผันตามเฟส  $\text{C}_3\text{S}$

$$\text{Rotation kiln} \propto \text{C}_3\text{S}$$

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

#### 4.1.1 จัดอันดับตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส $C_3S$ ได้ดังนี้

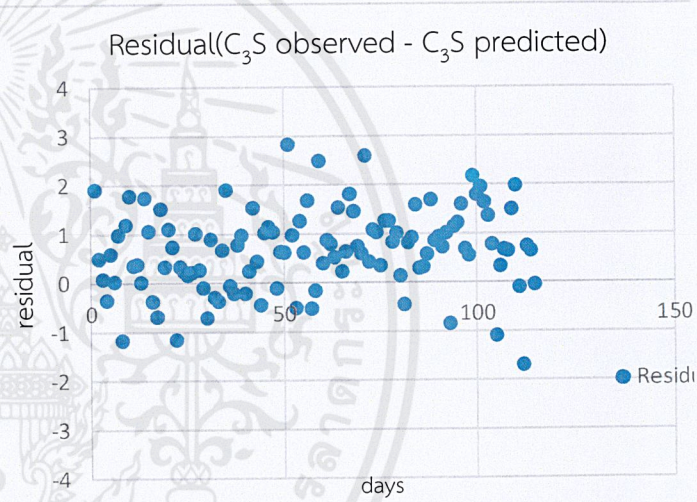
ตารางที่ 13 การจัดอันดับตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส  $C_3S$

Rank of parameter that effect to $C_3S$
1. LSF avg clinker
2. Preheat calciner ( $^{\circ}C$ ) and Burner( $^{\circ}C$ )
3. $SiO_2$ (%) Kiln feed
4. Kiln feed (T/H)
5. Cooling rate ( $m^3/min$ )
6. $Al_2O_3$ (%) Kiln feed
7. $K_2O$ (%) Kiln feed
8. Free CaO (%) clinker
9. Fuel coal (T/H)
10. $SO_3$ (%) fuel coal
11. NOX (ppm)
12. $O_2$ (%)
13. Biomass (T/H)
14. Rotation kiln (rpm)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเกิดเฟส  $C_3S$

ในปูนเม็ดชนิดโครงสร้าง ณ หม้อเผาที่ 3 ซึ่งมีค่า

$$R^2 = 75.8081$$



ภาพที่ 25 กราฟ Residual ระหว่าง  $C_3S$  observed และ  $C_3S$  predicted

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเห็นได้ว่าค่า LSF Avg clinker (ปริมาณ CaO ทั้งหมดในปูนเม็ด) และ free CaO (ปริมาณ CaO ที่ไม่ถูกเผาในปูนเม็ด) อยู่ในอันดับที่ 1 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการดำเนินการควบคุมการเกิดเฟส  $C_3S$  ในปัจจุบัน แต่ยังมีตัวแปรในลำดับที่ 2 ถึง 7 ที่สำคัญต่อการเกิดขึ้นของเฟส  $C_3S$  ดังนั้นผู้ประกอบการควรคำนึงถึงตัวแปรนี้สำหรับการควบคุมเฟส  $C_3S$

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการเกิดเฟส  $C_3S$  ในปูนเม็ด ณ หม้อเผาที่ 3

ซึ่งมีค่า  $R^2 = 75.8081$

5.1.2 จัดอันดับตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส  $C_3S$

ตารางที่ 14 การจัดอันดับตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส  $C_3S$

Rank of parameter that effect to $C_3S$		
1. LSF avg clinker	3. $SiO_2$ (%) Kiln Feed	11. NOX (ppm)
2. Preheat calciner ( $^{\circ}C$ ) and Burner( $^{\circ}C$ )	4. Kiln feed (T/H)	12. $O_2$ (%)
3. $SiO_2$ (%) Kiln feed	6. $Al_2O_3$ (%) Kiln feed	14. Rotation kiln (rpm)
4. Kiln feed (T/H)	7. $K_2O$ (%) Kiln feed	
5. Cooling rate ( $m^3/min$ )		
6. $Al_2O_3$ (%) Kiln feed		
7. $K_2O$ (%) Kiln feed		
8. Free CaO (%) clinker		
9. Fuel coal (T/H)		
10. $SO_3$ (%) Fuel coal		
11. NOX (ppm)		
12. $O_2$ (%)		
13. Biomass (T/H)		
14. Rotation kiln (rpm)		

ภาพที่ 26 แบบหม้อเผาแสดงตำแหน่งตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเฟส  $C_3S$

### 5.1.3 การปรับค่าเมื่อเฟส C<sub>3</sub>S มีค่าน้อยกว่า 70

1. ทำการตรวจสอบ ถ้า LSF avg clinker < 93.5 ให้ทำการเพิ่ม Kiln feed (08IF01F1) 3 T/H ที่ละขั้นตอน
2. เพิ่มอุณหภูมิ Preheat calciner (08MF01\_T1) ประมาณ 7 องศาเซลเซียส ที่ละขั้นตอน
3. ลดปริมาณ SiO<sub>2</sub> (%) ประมาณ 0.1% ที่ละขั้นตอน ณ kiln feed โดยเพิ่มอัตราส่วนหินปูนต่อหินดินดาน ณ วัตถุดิบต้น (raw meal)
4. เพิ่มปริมาณวัตถุดิบป้อนหม้อเผา (Kiln feed) (08IF01F1) 3 T/H ที่ละขั้นตอน
5. เพิ่มอัตราการไหลลม ณ บริเวณหม้อเย็นสองตัวแรกในโซนตะแกรงที่ 1 (grate 1)
  - 08FA07A\_F1 ประมาณ 15 m<sup>3</sup>/min ที่ละขั้นตอน
  - 08FA07B\_F1 ประมาณ 15 m<sup>3</sup>/min ที่ละขั้นตอน
6. ลดปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%) ประมาณ 0.1% ที่ละขั้นตอน ณ Kiln feed โดยลดปริมาณหินภูเขาไฟ ณ วัตถุดิบต้น
7. K<sub>2</sub>O (%) เป็นธาตุชนิดย่อย ดังนั้นจึงยากที่จะปรับแต่สามารถควบคุมโดยควบคุมสัดส่วนของ
$$\text{SO}_3 / \text{alkali} = \frac{\text{SO}_3 / 80}{\text{K}_2\text{O} / \text{alkali} + \text{K}_2\text{O} / \text{alkali}}$$
8. ทำการตรวจสอบ ถ้าหาก CaO (%) > 1.6% ดังนั้นให้เพิ่มอุณหภูมิ ณ preheat calciner ประมาณ 7 องศาเซลเซียส ที่ละขั้นตอน
9. เพิ่มปริมาณ Fuel coal (22FE02W1) 1 T/H ที่ละขั้นตอน
10. ลดปริมาณ SO<sub>3</sub> (%) โดยควบคุมสัดส่วนของ SO<sub>3</sub>/alkali
11. เพิ่มปริมาณ NOX (ppm) โดยเพิ่มอุณหภูมิ ณ Burner
12. ลดปริมาณ O<sub>2</sub> (%) โดยเพิ่มอุณหภูมิ ณ Burner
13. ลดปริมาณ Biomass (T/H)
14. เพิ่มรอบของการหมุนหม้อเผา Rotation kiln (rpm)

\*\*\* การปรับค่าอ้างอิงจาก ค่า normal standard deviation ของแต่ละตัวแปร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ตารางที่ 15 ตารางแสดงช่องปัญหาและข้อเสนอแนะในงานวิจัย

ปัญหา	ข้อเสนอแนะ
1.การเก็บรวบรวมข้อมูล	การจัดการข้อมูลในส่วนของโอเพอร์เรเตอร์ควรมีการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ เนื่องจาก ณ ปัจจุบันเป็นการเก็บค่าในแผ่นบันทึกจึงทำให้บางค่ามีการหล่นหายได้
2.การทดสอบโมเดลทางคณิตศาสตร์	หลังจากการทำโมเดลเสร็จสิ้นควรมีการทดสอบโมเดล โดยเลือกตัวแปรที่มีผลต่อเฟส $C_3S$ มากที่สุด แล้วทำการปรับค่า ถ้าหากเฟส $C_3S$ เพิ่มขึ้น ดังนั้นเราอาจจะสามารถสรุปได้ว่าโมเดลนี้สามารถใช้ในสายการผลิตได้จริง ๆ ขั้นตอนถัดมาคือนำโมเดลเข้าไปใน APC (Advanced Process Control) Model เพื่อให้สามารถปรับค่าได้อย่างอัตโนมัติ
3.ปัจจัยที่เกิดขึ้นจากมนุษย์	รูปแบบการปรับค่าของพีโอเปอเรเตอร์แต่ละคน เช่น Kiln feed ประมาณ 285-295 T/H ถ้าหากค่า NOX <400 ppm ควรเพิ่ม Fuel coal และ Kiln feed ในเวลาเดียวกัน เนื่องจากในการวัดค่าเฟส $C_3S$ จะใช้เวลาในการวัดค่าประมาณ 1 ชั่วโมง ดังนั้นการเพิ่มของทั้งสองตัวแปรในเวลาเดียวกัน จะสามารถเพิ่มปริมาณเฟส $C_3S$ ได้มีประสิทธิภาพสูง
4.ข้อมูลจากทางแลป	เฟส $C_3S$ หรือเฟสอื่น ๆ ในปูนเม็ดที่วัดได้จากทางแลป ณ ปัจจุบันมีการวัดทุก ๆ 2 ชั่วโมง จึงควรมีการวัดค่าทุก ๆ ชั่วโมง เพื่อจะสามารถทำนายการเกิดเฟส $C_3S$ ได้แม่นยำขึ้นโดยเสนอวิธีใช้หุ่นยนต์แขนกลเพื่อเก็บตัวอย่างปูนเม็ดมาวิเคราะห์ในเครื่อง XRD

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Cement Handbook , Quality Control , เอกสารทางเทคนิค (Trade secret)
- [2] Cement Handbook , Cement Operation Handbook , เอกสารทางเทคนิค (Trade secret)
- [3] Odler and R. Wonnemann “effect of alkalis on portland cement hydration” Federal Republic of Germany
- [4] J.W. PAN,Y.T. FENG,J.T. WANG, Q.C. SUN, C.H.ZHANG,D.R.J. OWEN “Modeling of alkali-silica reaction in concrete” y.feng@swansea.ac.uk
- [5] Xuerun Li, Wenlong Xu, Shaopeng Wang, Mingliang Tang, Xiaodong Shen “Effect Of MgO and SO<sub>3</sub> on Portland cement clinker : formation of clinker phase and alite polymorphism”
- [6] คู่มือสหกิจศึกษา ปีการศึกษา 2562 สำนักพิมพ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ กรุงเทพฯ



## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลดิบจากทางโอเปอร์เรเตอร์

Log Sheet Kiln 3			Clinker Type I														
Quality Kiln Feed % Clinker Analyse			Continuous Run 48														
Parameter Control			EP Continuous Run 19														
Unit			nr 00:00-08:00 u														
			0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00		
Kiln Feed	LSF	100	%	107		107.7		107.1		106.5		106.30		107.10		105	
	MS	2.4	%	2.22		2.24		2.28		2.3		2.3		2.29		2.2	
	MA	1.75	%	1.74		1.78		1.69		1.63		1.6		1.6		1.61	
	US 170		%	12.4								12.65					
Clinker Quality	Temp	58	°C														
	Clinker To Letter Weight		kg	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	09SS02	
	Free CaO		%			1.24		1.4		1.23		1.15		1.19		1.14	
	LSF		%			95.6				95.9				95.50			
	C3S (Sum)	66.72	%			68.74				69.77				70.06			
Operation			nr 00:00-08:00 u														
Parameter Control			nr 00:00-16:00 u														
Unit			nr 00:00-16:00 u														
			0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00		
Kiln Feed	08SS01 W1	270-300	ton/hr	287		289		288		290		291		293		292	
	08BE01M1 T1	52-58	ton	51		53		51		52		52		51		53	
IDF Fan C-Line	08FA03 T1	300-340	rpm	342		344		341		342		339		337		341	
	08FA03 P1	(-400)-(-700)	mmHg	-531		-528		-527		-530		-533		-532		-534	
	08FA03 C	40-100	%	100		100		100		100		100		100		100	
	08FA03S1 C	55-75	%	57		57		57		57		57		57		57	
	08FA03S1 T	540-784	RPM	762		762		762		762		762		762		762	
	08GA3421 (By pass)	300-1150	KW	618		623		628		634		628		625		631	
	08GA3421 (By pass)	0-100	%	0		0		0		0		0		0		0	
	Gas Analyst	08GA01 A1	3-6	%	7		5.6		6.6		6.3		7.4		7.5		6.8
	08GA01 B1	0	%	0.02		0.02		0.02		0.02		0.02		0.03		0.03	
	08GA01 C1	250-1000	ppm	490		473		491		463		445		426		484	
IDF Fan C-Line	08FA02 T1	300-340	rpm	351		352		352		354		356		358		355	
	08FA02 P1	(-550)-(-750)	mmHg	-700		-696		-695		-701		-698		-701		-702	
	08FA02 C	40-100	%	100		100		100		100		100		100		100	
	08FA02S1 C	600-650	RPM	91		91		91		91		91		91		91	
	08FA02S1 T	800-1250	RPM	915		915		915		915		915		915		915	
	08GA3121 (By pass)	0-100	rpm	1134		1119		1125		1130		1141		1139		1148	
	08FA02 A1	2-6	%	3.8		3.9		3.6		3.6		3.7		3.9		4.1	
	08FA02 A2	0	%	0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03	
	08FA02 A3	0-800	ppm	397		394		387		390		392		395		377	

### ข้อมูลดิบการวิเคราะห์จากส่วนควบคุมคุณภาพ

Date	Type	Lite Weight	C3S M1	C3S M3	C3S SUM	Temp	LSF	Ms	Free CaO	Alkali	C3A	Ma	SiO2	Al2O3	Fe2O3
1/1/2019 0:00	I														
1/1/2019 1:00	I		51.84	16.9	68.74	58	95.6	2.32	1.24	0.5	9.32	1.65	21.42	5.74	3.48
1/1/2019 2:00	I								1.4						
1/1/2019 3:00	I														
1/1/2019 4:00	I														
1/1/2019 5:00	I		45.23	24.54	69.77		95.9	2.44	1.23	0.51	8.52	1.58	21.49	5.4	3.42
1/1/2019 6:00	I														
1/1/2019 7:00	I								1.15						
1/1/2019 8:00	I														
1/1/2019 9:00	I	1,160	48.78	21.28	70.06	79	95.5	2.45	1.19	0.47	8.18	1.53	21.38	5.29	3.45
1/1/2019 10:00	I														
1/1/2019 11:00	I								1.14						
1/1/2019 12:00	I														
1/1/2019 13:00	I		48.82	20.64	69.46		95.3	2.37	1.15	0.49	8.38	1.53	21.31	5.43	3.55
1/1/2019 14:00	I														
1/1/2019 15:00	I								1.19						
1/1/2019 16:00	I														
1/1/2019 17:00	I		52.25	19.8	72.05	90	95.6	2.43	1.05	0.5	8.48	1.57	21.44	5.39	3.43
1/1/2019 18:00	I														
1/1/2019 19:00	I								1.27						
1/1/2019 20:00	I														

หมายเหตุ: เนื่องจากข้อมูลเป็นความลับทางการค้า (trade secret) ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าได้บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer Spectroscopy)



เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy)



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายนราวิชญ์ คงแก้ว

วันเกิด 27 มกราคม 2541

ที่อยู่ 74/117 ถนนท่าโพธิ์ ตำบลท่าวัง อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000

e-mail 59010700@kmitl.ac.th

โทรศัพท์ 090-520-6515

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2553 - 2558 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนเบญจมราชูทิศนครศรีธรรมราช

พ.ศ. 2559 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนก BTU (Benzene Toluene Units)  
บริษัท ระยองโอเลฟินส์ จำกัด  
ตั้งแต่วันที่ 4 มิถุนายน 2562 ถึงวันที่ 2 สิงหาคม 2562
- นักศึกษาโครงการสหกิจศึกษา ส่วนผลิต  
บริษัทปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด  
ตั้งแต่วันที่ 12 สิงหาคม 2562 ถึงวันที่ 29 พฤศจิกายน 2562