



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของวานาเดียมที่มีต่ออัตราและสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การระถาง

โดย

พศ.ดร. พวงรัตน์ ใจวิชยานุกูล

นางสาวสุชาทิพย์ ลินยัง

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนนประชาอุทิศ บางนา ทุ่งครุ กรุงเทพ 10140

19 พฤษภาคม 2549

ສັນຍາເລກທີ RDG4850042

## รายงานວິຊັບນັບສົມບູຮັດ

ພລບອງວານາເດືອນທີມີຕໍ່ອັດກົມະສົມບັດຂອງເຊີເມນຕີແລກວິເຄຣະທີ່ກາຮະສ້າງ

ຄະພູວິຊຍ

ຜ.ດ. ພວງຮັດນໍ້າ ຂຈຕວິຫຍານຸກູລ

ນາງສາວສູກາທີພຍ່າ ສິນຍັງ

ภาควິຊາວິສວກຮົມສິ່ງແວດລ້ອມ ມາຮວິທຍາລ້ຽກໂຄໂລຢີພະຈອນເກົ່າຫຼັບນຸ່ງ  
91 ດນນປະຈາອຸທິສ ບາງມດ ຖຸກຄູ ກຽງເທິບ 10140

ຊຸດໂຄຮກກາຮັບສັນນູນຜູ້ປົກປົກກາຮັບສັນນູນກາຮັບສັນນູນ

ສັນນູນໂດຍສໍານັກງານກອງທຸນສັນນູນກາຮັບສັນນູນ (ສກວ.)

(ຄວາມເຫັນໃນຮາຍງານນີ້ເປັນຂອງຜູ້ວິຊຍ ສກວ.  
ແລະບຣີມທຸນເຊີເມນຕີກາຮັບສັນນູນ ຈຳກັດ (ມາຮນ) ໄນຈຳເປັນຕົ້ນເຫັນດ້ວຍເສນອໄປ)

## แบบสรุปโครงการวิจัย (Executive Summary)

ตัวอย่างเลขที่	RDG 4850042	
ชื่อโครงการ	ผลของงานเดี่ยมที่มีต่อลักษณะสมบัติซีเมนต์และการวิเคราะห์การฉีดล้าง	
หัวหน้าโครงการ	ผศ.ดร. พวงรัตน์ ใจวิชยานุกูล สถาบัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชั้นนำ	
โทรศัพท์	02-4709163	โทรสาร 02-4709165
E-mail address	<a href="mailto:puangrat.kaj@kmutt.ac.th">puangrat.kaj@kmutt.ac.th</a>	

### ความสำคัญ/ความเป็นมา

งานเดี่ยมเป็นโลหะชนิดหนึ่ง มีสีขาว-เงินและสามารถนำไปปั้นรูปได้ง่าย งานเดี่ยมมักพบในถ่านหิน หินมัน และหินมันคิบ เมื่อมีการนำถ่านหินมาใช้ กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะทำให้งานเดี่ยมเข้าไปสู่เมตริกซ์ของปูนเม็ด และซีเมนต์ซึ่งจะถูกนำไปใช้งานต่อไป นอกจากงานเดี่ยมจะมีอยู่ในเชื้อเพลิงหลักแล้ว ในการนำของเสียอันตรายมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริม (hazardous waste fuel) เช่น การนำหินมันที่ใช้งานแล้วเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น จะเป็นการเพิ่มงานเดี่ยมในเมตริกซ์ของปูนเม็ด เช่นเดียวกัน ในการผลิตปูนซีเมนต์แต่ละครั้งจะมีงานเดี่ยมปะปนในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะสมบัติของปูนเม็ดแตกต่างกันไป และยังส่งผลถึงการฉีดล้างของงานเดี่ยมสู่สิ่งแวดล้อมในอัตราที่ไม่เท่ากันอีกด้วย งานเดี่ยมในปริมาณมากอาจส่งผลต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ได้ เช่น การรับกำลังอัดอาจมากขึ้นหรือลดลง เป็นต้น ในแง่ของ การฉีดล้างงานเดี่ยมสู่สิ่งแวดล้อมนั้น จากการสำรวจเอกสารขั้นต้นพบว่างานเดี่ยมมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ทำให้การฉีดล้างของงานเดี่ยมเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอย่างยิ่ง ทั้งจากการศึกษา งานวิจัยที่มีผู้ดำเนินการศึกษามาก่อนแล้ว พบว่ามีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบ งานเดี่ยมต่อปูนซีเมนต์ ทั้งในแง่ของลักษณะสมบัติ และการฉีดล้างงานเดี่ยมจากซีเมนต์

โครงการนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะหาผลของงานเดี่ยมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ รวมไปถึงการฉีดล้างของงานเดี่ยมออกจากเมตริกซ์ของซีเมนต์เป็นสำคัญ ทั้งนี้สืบเนื่องจากในการนำเชื้อเพลิงไม่ว่าจะอยู่ในรูปของถ่านหิน หินมันคิบ หรือหินมันน้ำ เป็นการยากที่จะสกัดงานเดี่ยมออกไปจากเชื้อเพลิงได้ ผลของงานเดี่ยมต่อซีเมนต์ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก นอกจากนี้ผลกระทบของ งานเดี่ยมยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมได้โดยตรง ผลงานวิจัยในส่วนของงานเดี่ยมที่ได้จากการ วิจัยนี้ จะสามารถนำไปใช้งานทั้งในแง่ของการปรับปรุงลักษณะสมบัติของซีเมนต์ และการศึกษา แนวโน้มของการฉีดล้างงานเดี่ยมออกจากซีเมนต์

## วัตถุประสงค์โครงการ

- เพื่อศึกษาผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ ได้แก่ เฟสส่วนประกอบของปูนเม็ด เวลาในการก่อตัว (setting time) และกำลังอัด (compressive strength)
- เพื่อศึกษาการซ่อมแซมของวานาเดียมที่ถูกซ่อมแซมออกมากจากซีเมนต์ ด้วยการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน
- เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของวานาเดียมเริ่มต้นที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการซ่อมแซม

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์	โดยทำให้
1. ได้ลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบปูนเม็ดที่มีวานาเดียมปนเปื้อน	1. เพื่อศึกษาผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ 2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของวานาเดียมเริ่มต้นที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการซ่อมแซม	ได้ลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบปูนเม็ดที่มีวานาเดียมปนเปื้อน โดยเมื่อมีวานาเดียมในปูนเม็ดส่งผลให้ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์สูงขึ้น และวานาเดียมมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสารประกอบใหม่ คือ $AlV_2O_6$ และ $CaV_2O_6$ และในส่วนของลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบของปูนเม็ดวานาเดียมเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณ alite และ belite ลดลง
2. ได้ผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์	1. เพื่อศึกษาผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ 2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของวานาเดียมเริ่มต้นที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการซ่อมแซม	ผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ โดย เมื่อความเข้มข้นของวานาเดียมสูง จะทำให้ขนาดของซีเมนต์เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพстต์ช้าขึ้น ในส่วนกำลังการรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของวานาเดียมสูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังการรับแรงอัดลดลง

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์	โดยทำให้
1. ได้ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ วanaเดี่ยมต่อการฉล้างของวanaเดี่ยม จากซีเมนต์	1. เพื่อศึกษาการฉล้างของ วanaเดี่ยมที่ที่ถูกฉล้างออกมา จากซีเมนต์ ด้วยการทดสอบ ด้วยวิธีมาตรฐาน 2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้น ของวanaเดี่ยมเริ่มต้นที่มีต่อ ลักษณะสมบัติของซีเมนต์และ การฉล้าง	1. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ วanaเดี่ยม โดยเมื่อความเข้มข้นของ วanaเดี่ยมเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณวana เดี่ยมที่ฉล้างจากซีเมนต์มากขึ้น โดย วanaเดี่ยมมีพฤติกรรมการฉล้างออก มาจากซีเมนต์ได้ยาก 2. ได้แนวโน้มในการนำซีเมนต์ที่มีวanaเดี่ยมปนเปื้อนไปใช้งาน เนื่องจาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ ที่มีวanaเดี่ยมเริ่มต้นในปริมาณน้อย กว่าหรือเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก

#### การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- การนำของเสียอันตรายที่มีวanaเดี่ยมมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตซีเมนต์นั้น วanaเดี่ยมใน ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่า 2% โดยน้ำหนัก จะทำให้ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ที่ได้ไม่ดีกว่าเป็นของเสีย อันตราย และสามารถนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในการใช้งานได้ โดยการฉล้างของโลหะหนักไม่ก่อให้เกิด อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
- ทำให้ทราบแนวโน้มในการนำซีเมนต์ที่มีวanaเดี่ยมมาใช้งาน ดังนี้
  - วanaเดี่ยมที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 % โดยน้ำหนัก จะไม่ทำให้การรับกำลังอัด และเวลาที่ใช้ในการ ก่อตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ไม่มีวanaเดี่ยมปนอยู่ แต่หาก นำซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีวanaเดี่ยมที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.5 % จะทำให้การรับกำลังอัดของซีเมนต์ มอร์ตาร์นั้นลดลง และใช้เวลาในการก่อตัวของซีเมนต์นานขึ้น
  - วanaเดี่ยมที่ปนอยู่ในซีเมนต์มอร์ตาร์สามารถถูกฉล้างออกมาได้เมื่อสัมผัสถักกับน้ำที่มีค่า pH อยู่ใน ช่วง 8-10
  - ซีเมนต์ที่มีวanaเดี่ยมอยู่ในระดับความเข้มข้นต่ำกว่า 1% จะไม่ดีกว่าเป็นของเสียอันตราย

## การประชาสัมพันธ์

### 1. เพยแพร่บกความในการประชุมวิชาการนานาชาติ

P. Kajitvichyanukul, S. Sinyang, Effect of Vanadium on Clinker Phase of Cement Deriving from Co-Burning of Hazardous Waste, Proceeding of International Conference on Hazardous Waste Management for a Sustainable Future, Bangkok, Thailand, January 10-12, 2006

### 2. เพยแพร่บกความในการประชุมวิชาการแห่งชาติ

พวงรัตน์ ขจิตวิชยานุกูล และ สุชาทิพย์ สินยัง “ลักษณะสมบัติของปูนเม็ดและซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จาก การเผาร่วมกับวานาเดียม” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, 20-23 เมษายน

2549

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของวanaเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การฉาบล้าง โดยวanaเดียมมักจะปรากฏในลักษณะของน้ำมันที่ใช้แล้ว ซึ่งนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและพบในภาคของเสียอุตสาหกรรมในกลุ่มของน้ำมันที่ใช้แล้ว ซึ่งนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตซีเมนต์ ในงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองการเผาปูนเม็ดในเตาเผา โดยวัตถุคือปูนเม็ดเพาร์วัมกับ วanaเดียมออกไซด์ ( $V_2O_5$ ) ที่ความเข้มข้น 0.01-1.00 เปอร์เซ็นต์โดยนำหนักแล้วนำมาวิเคราะห์ปริมาณของปูนขาวอิสระ และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM ร่วมกับ EDS ในการหาลักษณะและส่วนประกอบของปูนเม็ด จากการทดลองพบว่าวanaเดียมที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยนำหนักจะส่งผลต่อลักษณะและส่วนประกอบของปูนเม็ด โดยพบว่าที่ปริมาณของวanaเดียมสูงทำให้ปริมาณของเฟสไตรแคลเซียม ซิลิกาต์และไಡแคลเซียมซิลิกาตลดลง นอกจากนี้พบว่าเมื่อวanaเดียมมากขึ้น ระยะเวลาการต้มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และวanaเดียมที่ส่งผลให้การรับกำลังขัดของซีเมนต์มอร์ต้ามีแนวโน้มลดลง ในส่วนพฤติกรรมการฉาบล้างทดสอบโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ยังประกาศกระทรวงบันทึก 6 พ.ศ.2540 เพื่อใช้ในการระบุถึงการเป็นของเสียอันตรายของซีเมนต์ ซึ่งพบว่าวanaเดียมจะฉาบล้างออกจากซีเมนต์ได้ยากและซีเมนต์ที่มีวanaเดียมปนเปื้อนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยนำหนัก ซีเมนต์เหล่านี้ไม่จัดเป็นของเสียอันตราย

## Abstract

Effect of the addition of vanadium in the clinkering process of cement mortar was studied in this work. Vanadium was selected to study as it is present in the coke commonly burned as fuel and in industrial wastes such as used oil which is used as alternative secondary fuel in cement kilns. The study simulated the burning process in a chamber furnace. Raw meal was burned with vanadium oxide ( $V_2O_5$ ) in five concentrations from 0.01 to 1.00 % by weight. The resulting clinker was analysed for the content of free lime and X-ray diffraction (XRD) pattern. These samples were also analysed by scanning electron microscope (SEM) connected with an energy-dispersive X-ray-spectrometer (EDS) to detect the compositions of the clinker phase. The results show that only very high intakes of vanadium oxide of higher than 0.50 % by weight had measurable effects on the formation and composition of the clinker. Amounts of  $C_3S$  and  $C_2S$  decreased with high intakes of vanadium. It was found that vanadium also exerted effects on slower rate of setting and reducing compressive strength of cement mortar. In this research, Toxicity characteristic leaching procedure[TCLP] and Notification of Ministry of Industry No.6 [B.E.2540] were also used to identify whether the cement was hazardous waste or non-hazardous waste. The result showed that raw material doped with vanadium up to 1.00 % by weight, the cement was not classified as hazardous waste.

## สารบัญ

	หน้า
<b>แบบสรุปโครงการวิจัย</b>	<b>i</b>
<b>บทคัดย่อภาษาไทย</b>	<b>v</b>
<b>บทคัดย่อภาษาอังกฤษ</b>	<b>vi</b>
<b>กิตติกรรมประกาศ</b>	<b>vii</b>
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับวนาเดี่ยม	3
2.2 การปนเปื้อนของวนาเดี่ยมในซีเมนต์	5
2.3 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	6
2.3.1 ปฏิกริยาทางเคมีในกระบวนการเผาซีเมนต์	4
2.3.2 การใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตซีเมนต์	10
2.4 การทดสอบการฉาบล้างโลหะหนักจากซีเมนต์	13
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>15</b>
3.1 วัตถุดิบในการกระบวนการผลิตซีเมนต์	15
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง	17
3.3 การเตรียมซีเมนต์โดยใช้ของเสียอันตราย	17
3.3.1 การเตรียมปูนเม็ดสำหรับซีเมนต์	18
3.3.2 การเตรียมปูนเม็ดที่มีวนาเดี่ยมผสมอยู่	18
3.3.3 การทดสอบ free lime เพื่อหาสัดส่วนของ calcium oxide (CaO)	19
3.3.4 การนำตัวอย่างของปูนเม็ดไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD	20
3.4 การทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์	22
3.5 การทดสอบหาค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า	24
3.6 การทดสอบการฉาบล้างโลหะหนักจากซีเมนต์	26
3.6.1 การทดสอบวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A	26
3.6.2 การทดสอบวิธี Availability Leaching Test	27
3.6.3 การทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)	28
3.6.4 การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540	29

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6.5 การทดสอบ pH Static Leach Test	30
3.7 แผนการดำเนินงาน	31
3.8 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	32
<b>บทที่ 4 ผลของวิวานาเดี่ยมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การฉาบล้าง</b>	<b>33</b>
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่ไม่มีวิวานาเดี่ยม	33
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่มีวิวานาเดี่ยมผสมอยู่	37
4.2.1 ผลของวิวานาเดี่ยมที่มีต่อค่า free lime	37
4.2.2 ผลของวิวานาเดี่ยมที่มีต่อลักษณะ โครงสร้างของปูนเม็ด	39
4.3 ผลของวิวานาเดี่ยมที่มีต่อการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์	49
4.4 ผลของวิวานาเดี่ยมที่มีต่อการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า	55
4.5 การฉาบล้างวิวานาเดี่ยมจากซีเมนต์	58
4.5.1 การฉาบล้างวิวานาเดี่ยมด้วยวิธี Microwave-assisted leach method (3051 A)	58
4.5.2 การฉาบล้างวิวานาเดี่ยมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (US.EPA)	60
4.5.3 การฉาบล้างวิวานาเดี่ยมด้วยวิธี Availability Leaching Test	63
4.5.4 การฉาบล้างด้วยวิธี pH Static Leach Test	65
4.5.5 ภาพรวมของการฉาบล้างวิวานาเดี่ยม	67
4.5.6 แนวทางการนำซีเมนต์ไปใช้งาน	69
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>71</b>
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก ก.	74
ภาคผนวก ข.	88

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวanaเดียม	3
2.2 ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของวanaเดียม	3
2.3 ผลกระทบของวanaเดียมที่มีต่อสุขภาพ	4
2.4 ปริมาณวanaเดียมที่ปรากฏในกระบวนการผลิตซีเมนต์	5
2.5 ตัวอย่างของเสียที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน	12
3.1 ส่วนประกอบของวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ด	15
3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ XRD	21
3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย	26
3.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับทุก 6 เดือน	
4.1 การหาร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดที่ได้จากการห้องปฏิบัติการ	33
4.2 ส่วนประกอบของวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ดซึ่งในการทดลอง	37
4.3 ร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดเมื่อมีวanaเดียมผสมอยู่ในค่าความเข้มข้น 0-1.0% โดยนำหัก	38
4.4 ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักวanaเดียมผสมอยู่ในช่วง 0-1% โดยนำหัก	42
4.5 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ที่มีวanaเดียมอยู่ในองค์ประกอบ	50
4.6 การเปรียบเทียบเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์ เมื่อมีวanaเดียมและไม่มีวanaเดียมที่มีขนาดร้อยละของซีเมนต์ต่างๆ	54
4.7 ผลของการฉาบล้างวanaเดียมด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051A	58
4.8 ผลของการฉาบล้างวanaเดียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure	61
4.9 ผลของการฉาบล้างวanaเดียมตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540	62
4.10 ผลของการฉาบล้างด้วยวิธี Availability Leaching Test	64
4.11 ผลของการฉาบล้างด้วยวิธี pH Static Leach Test	66
4.12 การเปรียบเทียบการฉาบล้างระหว่าง M3051A และ AVLT	68
4.13 การพิจารณาว่าซีเมนต์จัดเป็นของเสียอันตรายหรือไม่	70

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพวัดโอลาร์กิลน์ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์	7
2.2 ภาพของโอลาร์กิลน์ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์	7
2.3 ลักษณะภายนอกและภายในของเตาเผาซีเมนต์ (Rotary kiln)	9
3.1 รายละเอียดการผลิตซีเมนต์และการทดสอบ	16
3.2 ขั้นตอนการเตรียมปูนเม็ด	18
3.3 ขั้นตอนการเตรียมปูนเม็ดที่มีวานาเดียม	19
3.4 ขั้นตอนการหาร้อยละ free lime	20
3.5 หลักการทำงานของ SEM	22
3.6 เครื่องมือทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์	24
3.7 ขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์เพื่อทดสอบการละลายน้ำ	26
3.8 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A	27
3.9 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี Availability Leaching Test	28
3.10 ขั้นตอนการทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure	29
3.11 ขั้นตอนการทดสอบตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540	29
3.12 ขั้นตอนการทดสอบ pH Static Leach Test	30
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer	35
4.2 ลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 350 เท่า	36
4.3 เพสต่างๆ ของปูนเม็ดที่ได้จากการทดสอบของงานที่กำลังขยาย 8000 เท่า	38
4.4 แสดง free lime ที่เหลืออยู่เมื่อความเข้มข้นของวานาเดียมเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0-0.1%	39
4.5 แสดง free lime ที่เหลืออยู่เมื่อความเข้มข้นของวานาเดียมเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0-1.0%	39
4.6 พื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM	40
4.7 ผลของการวิเคราะห์ปูนเม็ดด้วยเครื่อง EDS	41
4.8 ร้อยละของวานาเดียมที่ปรากฏในเฟสของปูนเม็ดด้วย EDS	43
4.9 ผลของการวิเคราะห์ XRD	46
4.10 ผลของการวิเคราะห์ XRD	47
4.11 ผลของการวิเคราะห์ XRD	48
4.12 การเพิ่มร้อยละของซีเมนต์ที่ก้างบนตะแกรงเมื่อมีวานาเดียมในปูนเม็ดที่ความเข้มข้นต่างๆ	50
4.13 การกระจายขนาดของอนุภาคซีเมนต์	52
4.14 การเปรียบเทียบการกระจายอนุภาคของซีเมนต์ที่ไม่มีวานาเดียม และที่มีวานาเดียม 1%	53

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.15 ผลของวานาเดียมที่ความเข้มข้นขึ้นต่างๆต่อระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์	53
4.16 ระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์	55
4.17 การรับกำลังอัดของซีเมนต์ตามช่วงระยะเวลาในการบ่มเมื่อวานาเดียมอยู่ในปูนเม็ด	56
4.18 การรับกำลังอัดของซีเมนต์ที่ 28 วันของซีเมนต์ที่มีวานาเดียมในปูนเม็ดที่ความเข้มข้นต่างๆ	57
4.19 ค่าเฉลี่ยของวานาเดียมจากการฉลังด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A	59
4.20 การฉลังวานาเดียมจากซีเมนต์ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (US.EPA)	62
4.21 การฉลังวานาเดียมตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540	63
4.22 ผลของการฉลังวานาเดียมด้วยวิธี Availability Leaching Test	65
4.23 ผลของการฉลังด้วยวิธี pH Static Leach Test	66
4.24 การเปรียบเทียบการฉลังระหว่าง M3051A และ AVLT	67
4.25 โครงสร้างของซีเมนต์หลังปฏิริยาไฮเดรชั่น	68

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันการของเสียอันตรายจาก โรงงานอุตสาหกรรมมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้มีความจำเป็นในการลดปริมาณและกำจัดของเสียอันตรายเพื่อป้องกันมลพิษที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปแล้วการลดปริมาณของเสียอันตรายได้หลายวิธี ได้แก่ การตัดแปลงกระบวนการ การคัดแยกของเสีย หรือการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการที่ทำให้เกิดการกำจัดหรือลดปริมาณของเสียอันตราย ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ กระบวนการนำการของเสียอันตรายกลับมาใช้อีกครั้ง ซึ่งนอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายโดยนำการของเสียอันตรายมาใช้ใหม่แล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียอันตรายอีกด้วย วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน คือ การนำของเสียอันตรายไปใช้เป็นสารตัดแทนวัตถุดิบหรือสารเชื้อเพลิงในการผลิตซีเมนต์ วิธีการดังกล่าวจะสามารถกำจัดของเสียอันตรายได้แล้ว yang ได้รับประโยชน์จากการของเสียอันตรายอีกด้วย อย่างไรก็ได้ในการนำวิธีการนี้ไปใช้ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ความเหมาะสมของชนิดของเสียอันตรายที่จะนำมาเข้าสู่เตาเผา ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิง เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการปนเปื้อนของของเสียอันตรายนั้นๆ ต่อสภาพแวดล้อมด้วย ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มของมลพิษในอากาศ หรือการปนเปื้อนต่อผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักต่อผลิตภัณฑ์นั้นๆ เมื่อผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการจะถัง

ในปัจจุบันรายงานการวิจัยเกี่ยวกับผลการจะถังโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ซีเมนต์มีน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมาย ในการศึกษาผลของวานาเดียมที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ และการวิเคราะห์การจะถัง โดยวานาเดียมเป็นโลหะชนิดหนึ่งมีสีขาว-เงิน สามารถนำไปปั้นรูปได้ง่าย มักพบในถ่านหินและน้ำมัน เมื่อมีการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาแบบโรตารี คลิน์ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะทำให้วานาเดียมเข้าไปสู่เมตริกซ์ของปูนเม็ดและซีเมนต์[1] ซึ่งจะถูกนำไปใช้งานต่อไป นอกจากวานาเดียมจะมีอยู่ในเชื้อเพลิงหลักแล้ว ในการนำของเสียอันตรายมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริม (hazardous waste fuel) เช่น การนำน้ำมันที่ใช้งานแล้วเป็นเชื้อเพลิง[2] เป็นต้น จะเป็นการเพิ่มวานาเดียมในเมตริกซ์ของปูนเม็ด เช่นเดียวกันในการผลิตปูนซีเมนต์ แต่ละครั้งจะมีวานาเดียมปะปนในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะสมบัติของปูนเม็ดแตกต่างกันไป และยังส่งผลถึงการจะถังของวานาเดียมสู่สิ่งแวดล้อมในอัตราที่ไม่เท่ากันอีกด้วย วานาเดียมในปริมาณมากอาจส่งผลต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ได้ เช่น การรับกำลังอัดอาจมากขึ้น หรือลดลง เป็นต้น ในแห่งของการจะถังวานาเดียมสู่สิ่งแวดล้อมนั้น จากการสำรวจเอกสารขั้นต้นพบว่าวานาเดียมมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต[3] การจะถังของวานาเดียมจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา

เป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการชะล้างของวานาเดียมลงสู่สิ่งแวดล้อม โดยมุ่งเน้นที่จะให้ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตซีเมนต์ได้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาผลของวานาเดียมต่อซีเมนต์โดยการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของวานาเดียมเริ่มต้นในการเผาต่ำดินเพื่อผลิตปูนเม็ด แล้วนำปูนเม็ดที่ได้มาตรวจสอบลักษณะเฟสและส่วนประกอบที่เปลี่ยนไป พร้อมทั้งนำซีเมนต์ที่ได้มาทดสอบในส่วนเวลาการก่อตัว(setting time)และกำลังอัด(compressive strength) นอกจากนี้ซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จะนำไปทดสอบการชะล้าง โดยการนำมาทดสอบ Microwave-assisted leach method 3051A, TCLP หรือ Toxicity Characteristic Leaching Procedure ตามมาตรฐานขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม (US. EPA) และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 การทดสอบวิธี Availability Leaching Test ตามมาตรฐาน NEN7341 ของเนเธอร์แลนด์เพื่อทดสอบหาปริมาณมากที่สุดของโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างออกมากได้ และวิธี pH Static Leaching Test เพื่อทดสอบปริมาณของโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างออกมากได้เมื่อผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาพที่สัมผัสนานั้นที่มีค่าพิเศษต่างๆ [4]

จากการทดลองขึ้นกับปัจจัยเหล่านี้จะทำให้ทราบ ได้ว่าของเสียอันตรายที่มีวานาเดียมเจือปนนั้นเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือไม่ต่อคดีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ของเสียอันตรายที่มีวานาเดียมเจือปน มาเป็นเชื้อเพลิงนั้นจะมีวานาเดียมที่สามารถถูกชะล้างออกมากได้มากน้อยเพียงใด

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1)เพื่อศึกษาผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ ได้แก่ เฟสส่วนประกอบของปูนเม็ด เวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า
- 2)เพื่อศึกษาการชะล้างของวานาเดียมที่ถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์ด้วยการทดสอบด้วยวิธี มาตรฐาน
- 3)เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของวานาเดียมเริ่มต้นที่มีต่อลักษณะของซีเมนต์และการ ชะล้าง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วานาเดียม

วานาเดียมเป็นโลหะชนิดหนึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยมักพบในถ่านหิน และน้ำมันดิบในรูปของสารประกอบวานาเดียมเป็นชาตุที่มีเลขอะตอมเป็น 23 และมีหลายชนิดประจุ ได้แก่ +2, +3, +4 และ +5 ในธรรมชาติวานาเดียมมักประปนา กับแร่ชาตุต่างๆ และเป็นส่วนประกอบหนึ่งของสิ่งมีชีวิต ซึ่งวานาเดียมที่พบนี้จะอยู่ในรูปของเตตราวาเลนท์วานาเดตและแพนตัววาเลนท์วานาเดต ลักษณะเฉพาะของวานาเดียมแสดงในตารางที่ 2.1 ในส่วนของค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของวานาเดียม ได้แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งค่ามาตรฐานของหน่วยงานต่างๆ ส่วนใหญ่ยังไม่มีการระบุค่ามาตรฐานที่ชัดเจนและเป็นมาตรฐานเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวานาเดียม[5]

ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวานาเดียม	
สถานะ	ผลึกของแข็ง สีน้ำตาลเหลือง ไม่มีกลิ่น
เลขอะตอม	23
น้ำหนักอะตอม	50.9414 กรัม/โมล
ความหนาแน่น	6.1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ (กรัม/100 มล.)	0.1 – 1 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของวานาเดียม[5]

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของวานาเดียม	
LD <sub>50</sub> (มก./กก.)	10(หนู)
LC <sub>50</sub> (มก./ม <sup>3</sup> ./8 ชม.)	226
IDLH (พีพีเอ็ม)	4.55
PEL-TWA (พีพีเอ็ม) 8 ชั่วโมงต่อวัน	0.0067
TLV – TWA (พีพีเอ็ม) 8 ชั่วโมงต่อวัน	0.0065
พรบ. โรงงาน พ.ศ.2535 (พีพีเอ็ม)	–

หมายเหตุ : LD<sub>50</sub> คือ ปริมาณของสารเคมีที่ทำให้สัตว์ทดลองที่ได้รับสารนั้นเพียงชนิดเดียวตายไป เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเริ่มต้น

LC<sub>50</sub> คือ ความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศในช่องจะทำให้สัตว์ทดลองที่สูดลมในระยะเวลาที่กำหนดตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเริ่มต้น

IDLH คือ ค่าความเข้มข้นของสารเคมีสูงสุดเมื่อกีดความบกพร่องจากอุปกรณ์ป้องกันการหายใจ แล้วสามารถอพยพออกจากบริเวณนั้นภายใน 30 นาที

PEL คือ ค่าความเข้มข้นของสารเคมีในบรรยากาศการทำงานที่อนุญาตให้มีได้ตามกฎหมายความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งสหราชอาณาจักร

TLV คือ ค่าขีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีในบรรยากาศการทำงาน ที่พนักงานสัมผัสสารเคมีดังกล่าวซ้ำๆ โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ

wanadeeymสามารถเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้หลายทาง อาทิ เช่น การหายใจและการรับประทานอาหารในกลุ่มของน้ำมันจากเม็ดทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลือง แอปเปิล และไข่ การรับวاناเดีymเข้าสู่ร่างกายส่างผลให้เกิดผลกระทบต่อร่างกาย ได้ซึ่งอาจจะเป็นลักษณะความเป็นพิษคับคลั่น และสะสม wanadeeymอาจทำให้เกิดการระคายเคืองในปอด หลอดลม ทางเดินหายใจ ตา และอาจทำให้เกิดโรคทางเดินหายใจและปอดบวมได้ wanadeeymยังทำให้เกิดการขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ ทำให้เกิดผลลบต่อระบบประสาท และทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบการทำงานของตับ และไตรอีกด้วย ดังตารางที่ 2.3[5]

#### ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของ wanadeeymที่มีต่อสุขภาพอนามัย[5]

ผลกระทบของ wanadeeymที่มีต่อสุขภาพอนามัย	
สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไป ละของ ผู้น ค วัน มีความเป็นพิษสูง จะทำให้เกิดอันตรายต่อปอด และหลอดลม ทำให้เกิดการอักเสบต่อเยื่องนุ เป็นผลให้เกิดปอดอักเสบ ปอดบวม
สัมผัสทางผิวหนัง	ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง มีอาการผื่นแดง ปวดแสบปวดร้อน
กินหรือกินลืมเข้าไป	สารนี้มีความเป็นพิษสูงอาจเสียชีวิตได้ มีอาการคลื่นไส้ ปวดศรีษะ
สัมผัสถูกตา	ระคายเคือง ตาแดง ตาอักเสบ
การก่อมะเริงและความผิดปกติอื่นๆ	ส่างผลต่อการเกิดมะเริงปอด และสารนี้จะมีผลต่อการพัฒนาของทารกในครรภ์

## 2.2 การปนเปื้อนของวานาเดียมในซีเมนต์

วานาเดียมเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มักพบในส่วนของเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ วานาเดียมเกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยมักพบในบริเวณที่มีการทำเหมืองด้านหินจากานียังพบว่ามี วานาเดียมประปันในน้ำมันดินและน้ำมันอีกด้วย เมื่อมีการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา แบบโรตารีคิลในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ วานาเดียมจะตกค้างอยู่ทึ้งในส่วนของปูนเม็ดและฝุ่น จากเตา(kiln dust)[6]

จากรายงานการศึกษาของเดวิดและคอลล์ในปี 1990 พบว่าวานาเดียมได้ปรากฏอยู่ในวัตถุ ดินและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตซีเมนต์ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งในวัตถุดินจะมีความเข้มข้นในช่วง 9.6-48 ส่วนในถ่านส่วน(พีพีเอ็ม) ในขณะที่วานาเดียมที่มีอยู่ในถ่านหินจะมีความเข้มข้นประมาณ 130-640 ส่วนในถ่านส่วน(พีพีเอ็ม) ส่วนการนำน้ำมันที่ใช้งานแล้วมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจากของเสีย อันตราย (hazardous waste fuel) เพื่อทดสอบเชื้อเพลิงหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นี้ จะมี ความเข้มข้นของวานาเดียมประมาณ 3.4-18 ส่วนในถ่านส่วน(พีพีเอ็ม) [6,7]

ตารางที่ 2.4 ปริมาณวานาเดียมที่ปรากฏในกระบวนการผลิตซีเมนต์[6]

องค์ประกอบของกระบวนการผลิต	ปริมาณวานาเดียมที่ปรากฏ(พีพีเอ็ม)
วัตถุดิน	9.6 – 48
ถ่านหิน	130 – 640
น้ำมันที่ใช้แล้ว(เชื้อเพลิงทดสอบ)	3.4 - 18

เมื่อเชื้อเพลิงที่มีวานาเดียมอยู่นั้นผ่านกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จะทำให้เกิดการตกค้าง ของวานาเดียมในปูนเม็ดและในละอองฝุ่นที่ออกจากเตาเผา โดยวานาเดียมที่มีในปูนเม็ดจะส่งผล กับลักษณะทางโครงสร้างส่วนประกอบของปูนเม็ดได้ โดยจากการสำรวจงานวิจัยขั้นต้นพบว่าวา นาเดียมจะประปันในส่วนของไคลแคลเซียมซิลิเกตหรือบีไลท์ ในขณะที่บางส่วนประปันอยู่กับไทร แคลเซียม ซิลิเกตหรืออีไลท์ แต่มีในปริมาณน้อย ซึ่งจากการสำรวจวิจัยดังกล่าวไม่ได้แสดงผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ เช่น เวลาถอยด้วยหือก็จะล้างอัดที่เปลี่ยนไปแต่อย่างใด

ในส่วนของการฉาบวานาเดียมนั้น เป็นอีกประดีนหนึ่งมีการศึกษาค้นคว้าวิจัย แต่ยังไม่ มากนัก โดยเน้นไปในการศึกษาการฉาบวานาเดียมจากวัสดุอื่นๆ เช่น ตะตะลิสต์ เป็นต้น โดยพบ ว่าการ ฉาบวานาเดียมจะแพรผันกับค่าพีเอชของตัวฉาบล้างเป็นหลัก[8] ส่วนการฉาบวานาเด ยมจาก ปูนซีเมนต์นั้นพบว่าวานาเดียมจะถูกฉาบล้างได้ดีเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 7-10 โดยพบว่าที่ความ เข้มข้นของวานาเดียมในปูนซีเมนต์นั้นถูกฉาบล้างออกมากอย่างต่อเนื่องและมากขึ้นเมื่อเวลาในการ

สัมผัสกับน้ำซึมเข็น[6] จาก งานวิจัยที่มีการศึกษามาแล้วนั้นมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการชะล้างไม่นานนัก ซึ่งไม่สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ได้ นอกจากจะพบว่านาเดียมมากในถ่านหินและห้ามจากการระบุน้ำการผลิตซีเมนต์แล้ว วานาเดียมได้ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ในรูปของวานาเดียมออกไซด์( $V_2O_5$ ) โดยวานาเดียมมีลักษณะอ่อนและขึ้นรูปได้ง่าย ต่อต้านการกัดกร่อนจากการดัดแปลงต่างๆ ได้ดี มากนำมาใช้ร่วมกับการผลิตเหล็กกล้า อุตสาหกรรมเบตเตอร์รีและใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในงานเชรามิคเป็นต้น

โครงการนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะหาผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์รวมไปถึงการ ชะล้างของวานาเดียมออกจากเมตัริกซ์ของซีเมนต์เป็นสำคัญ ทั้งนี้สืบเนื่องจากในการนำเชื้อเพลิง ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของถ่านหิน ห้ามันดิน หรือห้ามันนั้น เป็นการยากที่จะสกัดวานาเดียมออกไปจากเชื้อเพลิงได้ ผลของวานาเดียมต่อซีเมนต์จึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก นอกจากนี้ผลของวานาเดียมยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมได้โดยตรง ผลงานวิจัยในส่วนผลของวานาเดียมที่ได้จากการวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้งานทั้งในแง่ของการปรับปรุงลักษณะสมบัติของซีเมนต์ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำซีเมนต์ไปใช้งานต่อไปได้ และยังบอกได้ว่าซีเมนต์ที่มีวานาเดียมในปริมาณสูงนั้น ควรจะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทใดจึงจะเหมาะสมที่สุด

### 2.3 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (The cement manufacturing process)

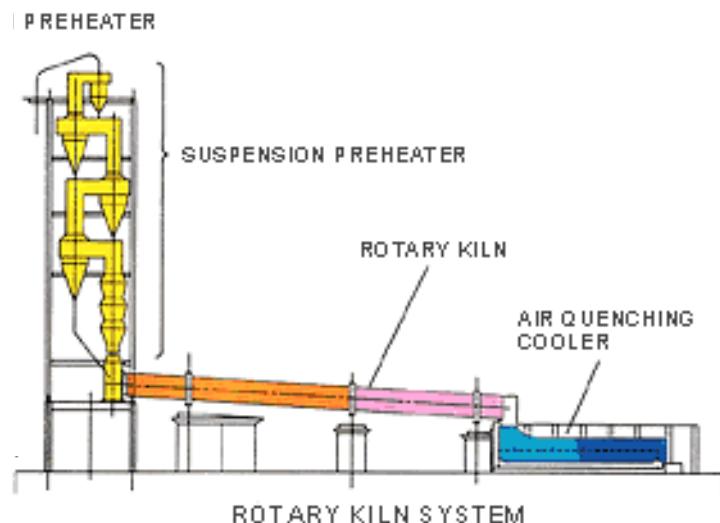
อุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานสูง โดยพลังงานที่ใช้คิดเป็น 30-40% ของค่าใช้จ่ายในการผลิต ไม่รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุน[9] ตั้งแต่ในอดีตที่ผ่านมา เชื้อเพลิงหลักที่ใช้คือถ่านหิน และมีการใช้เชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น ปิโตรเลียม ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และห้ามัน นอกจากเชื้อเพลิงเหล่านี้แล้วในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ยังใช้ของเสีย เป็นเชื้อเพลิงด้วย ในทวีปยุโรป อุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์มีการใช้กากของเสียอุตสาหกรรมประมาณ 12% ของการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด[9] ในแง่ของวัตถุคุณที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ วัตถุคุณหลักๆ ได้แก่ หินปูน หินดิน ดินอุดมนาสูง ดินลูกรัง และอื่นๆ โดยมีสัดส่วนประมาณ 77.8%, 18.5%, 1.5%, 2.0% และ 0.2% ตามลำดับ

#### 2.3.1 ปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการเผาซีเมนต์ (Kiln system chemistry)

ปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการผลิตซีเมนต์โดยทั่วไปเริ่มจากการนำวัตถุคุณมาให้ความร้อนในเตาโรตารีคิลน์ (รูปที่ 2.2) ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวของ แคลเซียมคาร์บอนेट( $CaCO_3$ ) ที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}C$  และเปลี่ยนรูปไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ หรือปูนขาว ( $CaO$ , lime) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์( $CO_2$ ) กระบวนการนี้เรียกว่า Calcinations หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการสร้างปูนเม็ดซึ่งปูนขาวจะทำปฏิกิริยาที่ความร้อนสูง(โดยทั่วไปประมาณ  $1,400-1,500^{\circ}C$ ) กับซิลิ

ก้าวถุมินา และเฟอร์สอออกไซด์ โดยจะเปลี่ยนรูปเป็นชิลิกेटถุมินต และเฟอร์ไรท์ของ แคลเซียม ซึ่งประกอบเป็นปูนเม็ดแบบปอร์ตแลนด์ และปูนเม็ดนี้จะถูกบดและผสมด้วยยิบชัมและ สารอื่นๆ เพื่อผลิตออกมานี้เป็นซีเมนต์[9]

ปูนเม็ดอยู่ที่บริเวณปลายชั้นร้อนของเตาเผา ที่อุณหภูมิประมาณ  $1,000^{\circ}\text{C}$  จะเริ่มกลายเป็น ปูนเม็ดซึ่งเย็นลงและเคลื่อนที่ผ่านตะกรับในเตาซึ่งบริเวณนี้จะมีการป้อนลมเย็น ปูนเม็ดจะถูกบด ผสมกับยิบชัม



รูปที่ 2.1 ภาพวาดโรเตารีคิลน์ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์



รูปที่ 2.2 ภาพของโรเตารีคิลน์ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์

ซีเมนต์จะถูกส่งจากเครื่องบดซีเมนต์ (cement mill) ไปยังไซโลเก็บปูนในแนวตั้ง (vertical storage silos) ในส่วนการบรรจุหรือส่วนการขนส่ง ซีเมนต์จะถูกนำออกจากไซโลเก็บปูน (cement storage silos) โดยเครื่องมือต่างๆ และส่งผ่านสายพานสู่สถานีในโรงงาน หรือส่งตรงสู่รถขนส่ง

วัตถุคุณิตที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ประกอบด้วย

แคลเซียมคาร์บอนेट ( $\text{CaCO}_3$ )

ซิลิเกต ( $\text{SiO}_2$ )

อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

และ ไออกซอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

โดยทั่วไปแล้วหินปูนจะเป็นวัตถุคุณิตหลักที่มีแคลเซียมคาร์บอนे�ตอยู่ ในขณะที่ดินเหนียวจะมีส่วนประกอบของวัตถุคุณิตที่เหลือ

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ หากแบ่งอุณหภูมิที่ใช้ จะแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่

1) ช่วงอุณหภูมิ 15-805 องศาเซลเซียส

เป็นช่วงการทำให้แห้งและให้ความร้อนแก่วัตถุคุณิต (drying and preheating zone) ซึ่งในช่วงนี้อนุมูลของน้ำอิสระ และน้ำที่อยู่ในวัตถุคุณิตจะถูกทำให้ระเหย โดยทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิท้อง

2) ช่วงอุณหภูมิ 805-1200 องศาเซลเซียส

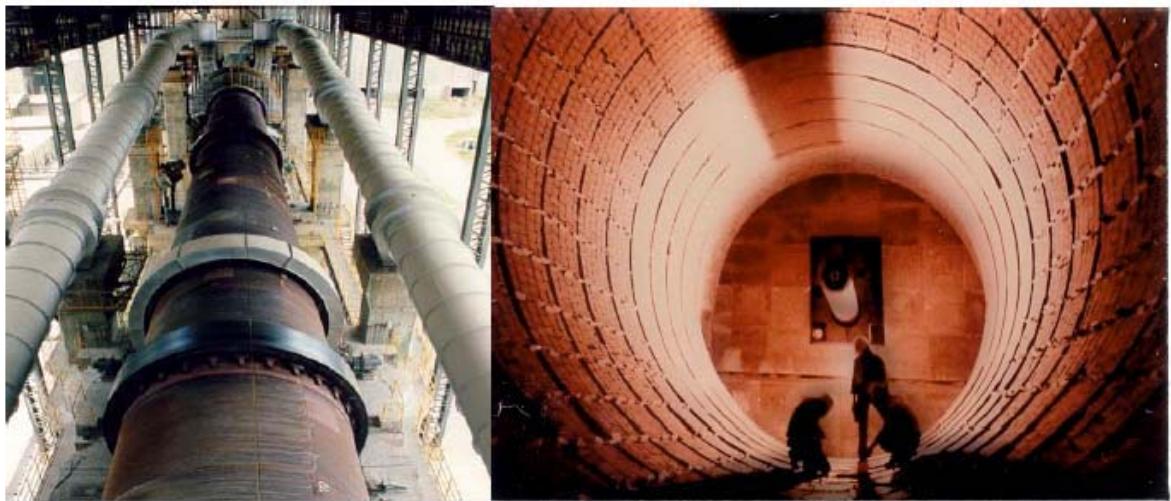
เป็นช่วงที่ วัตถุคุณิตจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้แคลเซียมคาร์บอนे�ตที่มีอยู่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) หรือที่เรียกว่าปูนขาว (lime) และเกิดการรับอนไดออกไซด์ขึ้น เรียกว่าแคลซิเนชัน (calcining) ดังสมการ



ในขณะเดียวกันแมกนีเซียมคาร์บอนे�ต ( $\text{MgCO}_3$ ) ที่มีอยู่บ้างในวัตถุคุณิต จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และการรับอนไดออกไซด์เข่นเดียวกัน กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า แคลซิเนชัน (calcinations)

3) ช่วงอุณหภูมิ 1200-1500 องศาเซลเซียส

เป็นช่วงการทำความร้อน (burning zone) โดยวัตถุคุณิตจะถูกให้ความร้อน โดยทำให้เกิดปูนเม็ดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.3 ลักษณะภายนอกและภายในของเตาเผาซีเมนต์ (Rotary kiln)

## โครงสร้างของปูนเม็ด

### ส่วนประกอบหลักของปูนเม็ด ประกอบด้วย

ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (tricalcium silicate หรือ alite)	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ( $\text{C}_3\text{S}$ )
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (dicalcium silicate หรือ belite)	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ( $\text{C}_2\text{S}$ )
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (tricalcium aluminate หรือ aluminate)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ( $\text{C}_3\text{A}$ )
เตต拉แคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (tetracalcium aluminoferrite)	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

### ไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกต( $\text{C}_3\text{S}$ ) มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม สีเทาแก่ ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ไตรแคลเซียมซิลิเกตสามารถถลายน้ำได้ ซึ่งการถลายน้ำค่อนข้างช้าและเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อผสมไตรแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉลี่ยในช่วง 7 วันแรก

### ไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกต( $\text{C}_2\text{S}$ ) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15-35 ไดแคลเซียมซิลิเกต มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวนนิ่ง เมื่อผสมกับน้ำสามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้นได้ ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกตค่อนข้างต่ำ การพัฒนากำลังของไดแคลเซียมซิลิเกตค่อนข้างช้าและช้ากว่า ไตรแคลเซียมซิลิเกตมาก คือเริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป

### ไตรแคลเซียมอัลูมิเนต

ไตรแคลเซียมอัลูมิเนต( $C_3A$ ) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7-15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน ปฏิกิริยากับน้ำรุนแรงมากและทำให้เพสต์ก่อตัวทันที การพัฒนากำลังของไตรแคลเซียมอัลูมิเนตจะเร็วมากคือ สามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียวตั้งประลัยที่ได้ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ ไตรแคลเซียมซิลิกेटหรือ ไดแคลเซียมซิลิกेट

### เตตระแคลเซียมอัลูมิโนเฟอร์ไรต์

เตตระแคลเซียมอัลูมิโนเฟอร์ไรต์( $C_4AF$ ) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5-10 และอยู่ในสภาพสารละลายแข็ง เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว พัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับไตรแคลเซียมซิลิกेट แต่กำลังประลัยที่ได้ค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า ไตรแคลเซียมอัลูมิเนต เล็กน้อย

ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่ต้องการจะอยู่ในรูปของไตรแคลเซียมซิลิกे�ตเป็นหลัก โดยควรมีประมาณร้อยละ 60-70 ในขณะที่ไดแคลเซียมซิลิกेट ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 20-30 เป็นหลัก โดยมีไตรแคลเซียมอัลูมิเนต และเตตระแคลเซียมอัลูมิโนเฟอร์ไรต์ อย่างละร้อยละ 1-2

อุณหภูมิที่ให้กับวัตถุดินในแต่ละช่วงจะให้ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่แตกต่างกัน (Ract et al., 2003) กล่าวคือ

แคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) จะกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 901 องศาเซลเซียส ด้วยปฏิกิริยาดูดความร้อน

ไดแคลเซียมซิลิกेटหรือ  $C_2S$  จะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดูดความร้อน โดยเปลี่ยนรูปมาจากแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส

ไตรแคลเซียมซิลิกे�ต หรือ  $C_3S$  จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์และ  $C_2S$  โดยเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1352 องศาเซลเซียส โดยจะได้ไตรแคลเซียมซิลิกे�ตในรูปของเหลว ซึ่งหลังจากการทำปฏิกิริยาแล้วต้องทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ไตรแคลเซียมซิลิกे�ตแข็งตัวกลายเป็นของแข็ง

แคลเซียมออกไซด์จะเป็นวัตถุดินตั้งต้นของส่วนประกอบของปูนเม็ด ซึ่งทำปฏิกิริยาโดยต่อเนื่องจนเกิดเป็นส่วนประกอบต่างๆ

#### 2.3.2 การใช้วัตถุดินและเชือเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตซีเมนต์

การนำของเสียอันตรายไปเป็นสารทดแทนเชือเพลิงในการผลิตซีเมนต์นั้น จัดได้ว่าเป็นวิธีการกำจัดของเสียอันตรายวิธีหนึ่งที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยทั่วไปแล้ว ของเสียที่สามารถนำมาใช้เป็นเชือเพลิงนี้มีทั้งของเสียที่จัดเป็นขยะจากอุตสาหกรรมและของเสียอันตราย อันประกอบด้วย น้ำมันที่ใช้แล้ว ตัวทำละลาย ไม้และของเสียจำพวกเศษไม้จากอุตสาหกรรมไม้ ยางรถยนต์ ของเสียอุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมพลาสติก ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำ

เสีย โดยทำการป้อนเข้าของเสียเหล่านี้สู่กระบวนการเผาภายในเตาเผา ของเสียเหล่านี้มักมีโลหะหนักเจือปนมาด้วยในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ในน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีวานาเดียม (V) ในน้ำมันและตัวทำละลายที่ใช้แล้วจะมีตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ในพลาสติกจะมีโลหะหนักໄได้แก่ โคบอลต์ (Co) แคนดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ส่วนยางรถยกจะมีสังกะสีอยู่มาก และตะกอนจากการบบนำบดนำเสียมักมีโลหะหนักหลายชนิดเจือปนอยู่ เป็นต้น (Willitsch and Sturm, 2003; Serclerat et al., 2000)

ในการนำของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักนี้มาใช้เป็นสารทดแทนเป็นเชื้อเพลิงนี้ นอกจากจะคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่จะได้รับจากของเสีย และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในเรื่องของการปล่อยก๊าซเสียสู่บรรยากาศภายนอกเตาเผา และการปนเปื้อนของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์อีกด้วย งานวิจัยหลายงาน ได้มุ่งเน้นในการหาปริมาณก๊าซของเสียที่ปล่อยออกมามา เมื่อมีการใช้ของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักทดแทนการใช้เชื้อเพลิง (Rauen and Rodlmayer, 2003) ในขณะที่งานวิจัยจำนวนน้อยที่มีการทดสอบการชะล้างโลหะหนักออกจากผลิตภัณฑ์ซึ่งเม้นต์

### 2.3.2.1 วัตถุดิบทดแทน (Alternative raw material)

หากของเสียอุตสาหกรรมซึ่งไม่มีค่าความร้อนและมีองค์ประกอบหลักเหมือนกับวัตถุดิบทั่วไปในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา อลูมินา ไอرونออกไซด์ โดยข้อดีในการนำของเสียเข้ามาทดแทนวัตถุดิบได้แก่ การลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตปูนซีเมนต์ เช่น หินปูน หินดินดาน ดินอลูมินา ดินลูกรัง และลดพลังงานที่ใช้ในการระเบิดเหมือนหินซึ่งเป็นกระบวนการที่จะได้วัตถุดิบดังกล่าว นอกจากนี้หากของเสียอุตสาหกรรมบางชนิดยังมีสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ไม่ใช่แคลเซียมคาร์บอนเนต ทำให้ไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้พลังงานในการแยกตัวของแคลเซียมคาร์บอนเนตมาเป็น แคลเซียมออกไซด์อีก ซึ่งถือว่าประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นอีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเกิดขึ้นจากการกระบวนการดังกล่าวยังไม่เกิดขึ้นอีกด้วย ถือเป็นการได้ประโยชน์จากการใช้วัตถุดิบทดแทนในเชิงเชื้อเพลิงทดแทนด้วยเช่นกัน

### 2.3.2.2 เชื้อเพลิงทดแทน (Alternative fuels)

กระบวนการผลิตปูนเม็ด โดยการเผาในเตาเผาโรต้าลีกิลน (rotary kiln) มีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำของเสียมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิที่สูง สภาพบรรยากาศที่มีสภาวะเหมาะสมแก่การออกซิไดซ์ (Oxidizing atmosphere) การเผาของเสียทั้งที่เป็นโลหะ (metallic) และอโลหะ (non-metallic) จะได้รับการดูดซับอย่างสมบูรณ์ การมีพื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อน (heat-exchange) ซึ่งมากพอ การผสมของแก๊สและผลิตภัณฑ์ที่ดี และเวลาที่เพียงพอมากกว่า 2 วินาทีสำหรับการกำจัดของเสียอันตราย [10]

เพื่อให้การดำเนินการและการเผาไหม้เป็นไปอย่างดีซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งจะต้องพิจารณา ความต้องการให้กระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดปูนเม็ด โดยการผสมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกันอย่างเป็นเนื้อเดียว และการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) ของ ส่วนประกอบเชื้อเพลิงจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการใช้เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการป้อนเข้าจะสามารถใช้ได้กิ่ว่าเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงแข็งซึ่งได้ทำการผสมเป็นเนื้อเดียวกันและใช้ในเวลาเดียวกัน[9]

การนำของเสียมาใช้เป็นวัตถุคิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนมีข้อดีอื่นๆ ดังนี้

- 1) การนำบดของเสียไม่ต้องการแหล่งความร้อนเพิ่มเติม
- 2) ไม่มีการเพิ่มสารมลภาวะแก่บรรณาการเนื่องจากคุณสมบัติการทำให้เป็นกลาง (neutralize) ของปูนเม็ด และกระบวนการดักผู้ของการเผาปูนซีเมนต์
- 3) ค่าใช้จ่ายของการเผาของเสียในเตาปูนซีเมนต์สามารถทำให้ถูกกว่าการสร้างโรงงานเตาเผาไหม้
- 4) กระบวนการเผาปูนเม็ดสามารถเผาของเสียอันตรายและทำให้ผ่านมาตรฐานของกลุ่มประเทศยุโรป (EU)
- 5) เถ้าที่เกิดจากการเผาไม่ก่อให้เกิดของเสียเพิ่มขึ้น (secondary waste)

ของเสียซึ่งนำมาใช้เป็นวัตถุคิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนมีด้วยกันหลายชนิด ลักษณะและตัวอย่างของเสียซึ่งนำมาใช้เป็นวัตถุคิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนดังตารางที่ 2.5

#### ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของเสียที่นำมาใช้เป็นวัตถุคิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน

วัตถุคิบทดแทน	เชื้อเพลิงทดแทน
วัตถุที่มีปริมาณซิลิกาสูง	น้ำมันใช้แล้ว, ตัวทำละลาย, น้ำมันทินเนอร์
กากตะกอนน้ำเสีย	กากตี
สารคุตซับ	วัตถุที่ปนเปื้อนน้ำมัน
เถ้า	ปีชั่ง, ยางเหนียว
เศษโลหะ	เรซิน
ผงเหล็ก	เศษยางธรรมชาติ, พลาสติก, ยางรถยก
อื่นๆ	เศษไม้, ปีลีออย, อื่นๆ

เตาเผาปูนซีเมนต์ซึ่งรับกำจัดของเสียในเชิงพาณิชย์รับของเสียจากผู้กำหนดของเสียในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทปอร์ตแลนด์ ของเสียเหลวปกติจะป้อนเข้าบาริเวณส่วนปลายของเตาซึ่งมีอุณหภูมิสูง ของเสียของแข็งอาจจะป้อนเข้าบาริเวณแคลซินิ่ง (calcining zone) ด้วยเครื่องมือต่างๆ สำหรับเตาเผาที่มีความยาว ของเสียของแข็งสามารถนำเข้าทางบาริเวณส่วนกลางของเตาเผา (mid-kiln) และเข้าบาริเวณชุดให้ความร้อนเบื้องต้น (pre-heater/pre-calciner kiln) ซึ่งจะทำการป้อนบาริเวณชั้นที่มีอุณหภูมิสูง [9]

ในการเผาที่เป็นของเสียอันตราย จะต้องทำให้มั่นใจว่าได้ทำการสลายสารพิษจำพวกสารอินทรีย์ที่มีชาตุหมุนเวียนองค์ประกอบ (halogenated organic) โดยของเสียอันตรายจะป้อนเข้าบาริเวณจุดเผาหลัก (main burner) และถูกทำลายบาริเวณที่เผาขั้นต้น (primary burning zone) ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $2,000^{\circ}\text{C}$  ของเสียซึ่งป้อนเข้าบาริเวณจุดเผาขั้นที่สอง (secondary burner, Pre-heater หรือ pre-calciner) จะถูกเผาด้วยอุณหภูมิต่ำอย่างช้าๆ แต่จะถูกเผาใหม่อย่างเร็วบาริเวณที่ให้ความร้อน (burning zone) ที่อุณหภูมิภายในเตาเผาประมาณ  $1,000-2,000^{\circ}\text{C}$

ส่วนของเสียซึ่งมีสารประกอบประเภทที่ระเหยได้ง่าย (Volatile) ที่ป้อนเข้าบาริเวณส่วนบนของปลายเตาหรือใช้ในรูปแบบเชื้อเพลิงก่อนที่สามารถระเหยได้ สารประกอบเหล่านี้จะไม่ผ่านบาริเวณที่เผาขั้นแรก และอาจจะไม่ได้ถูกทำลายหรือประกอบเป็นปูนเม็ด ดังนั้นการใช้ของเสียซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะที่ระเหยได้ง่าย (Volatile metals) เช่น สารproto(Нg), แซลเดียม(Tl) หรือสารประกอบประเภทสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายอาจจะเป็นผลในการเพิ่มปริมาณสารมลพิษของสารproto(Нg), แซลเดียม(Tl) หรือ สารประกอบประเภทสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายซึ่งไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ [9]

## 2.4 การทดสอบการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์

ในส่วนของการชะล้างในประเด็นของผลที่มีต่อสิ่งแวดล้อมนั้นได้มีวิธีทดสอบมาตรฐานที่ได้ถูกจัดตั้งขึ้น เพื่อใช้ในการหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมากได้จากการของแข็งในกระบวนการหล่อแข็งด้วยซีเมนต์ (Solidification) เช่น การทดสอบ TCLP หรือ Toxicity Characteristic Leaching Procedure ตามมาตรฐานขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม (U.S. EPA) ซึ่งตั้งขึ้นเพื่อทดสอบว่าการหล่อแข็งนั้นได้มาตรฐานที่กำหนดไว้ในการกำจัดของเสียอันตรายหรือไม่ รวมทั้งใช้ในการทดสอบว่าของเสียนั้นๆ จัดเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ เป็นต้น (U.S. EPA, 1976) ในขณะเดียวกันมีงานวิจัยบางงานได้นำเอามาตรฐานการทดสอบจากหลายแหล่งมาใช้ในการทดสอบการชะล้างของโลหะหนัก เช่น วิธี Availability Leaching Test ตามมาตรฐาน NEN7341 ของเนเธอร์แลนด์เพื่อทดสอบหาปริมาณมากที่สุดของโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างออกมากได้ หรือวิธี pH Static Leach Test เพื่อทดสอบหาปริมาณของโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างออกมากได้เมื่อผลิตภัณฑ์อยู่ใน

สภาพที่สัมผัสกับน้ำที่มีค่า pH ต่างๆ [4] เป็นต้น นอกจานี้ยังมีการทดสอบโดยใช้วิธีอื่นๆ อีก แล้วแต่จุดมุ่งหมายในการทดสอบเพื่อนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน

ในส่วนของการศึกษานี้ เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการหาปริมาณของโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ ทางคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการในการทดสอบการชะล้างมาตรฐานทั้งสามวิธี ดังที่กล่าวมาแล้ว เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปใช้พิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำผลิตภัณฑ์ซึ่งเมนต์ไปใช้งาน โดยมุ่งเน้นศึกษาในประเด็นของการปนเปื้อนโลหะหนักที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก ซึ่งการวิจัยนี้นอกจากจะเป็นการนำผลที่ได้ไปใช้งานได้โดยตรงแล้ว ยังจัดได้ว่า เป็นงานวิจัยในแง่ของการศึกษาการชะล้างของโลหะหนักจากซึ่งเมนต์ซึ่งได้มาจากการนำของเสียอันตรายมาเป็นเชือเพลิงซึ่งมีลักษณะของงานวิจัยนี้ในจำนวนน้อยมาก อันเนื่องมาจากการชะล้างนั้นมักจะใช้ในการทดสอบซึ่งเมนต์ที่ได้จากวิธีการผลิตมาตรฐานเป็นหลักหรือ เป็นการชะล้างของโลหะหนักจากการหล่อซึ่งเมนต์เพื่อประโยชน์ในการหล่อแข็งซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการกำจัดของเสียอันตรายเป็นหลัก งานวิจัยนี้จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาให้เป็นบรรทัดฐานในการทดสอบชะล้างโลหะหนักที่อาจปนเปื้อนมากับผลิตภัณฑ์ซึ่งเมนต์ได้เป็นอย่างดี

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัตถุดิบในกระบวนการผลิตซีเมนต์

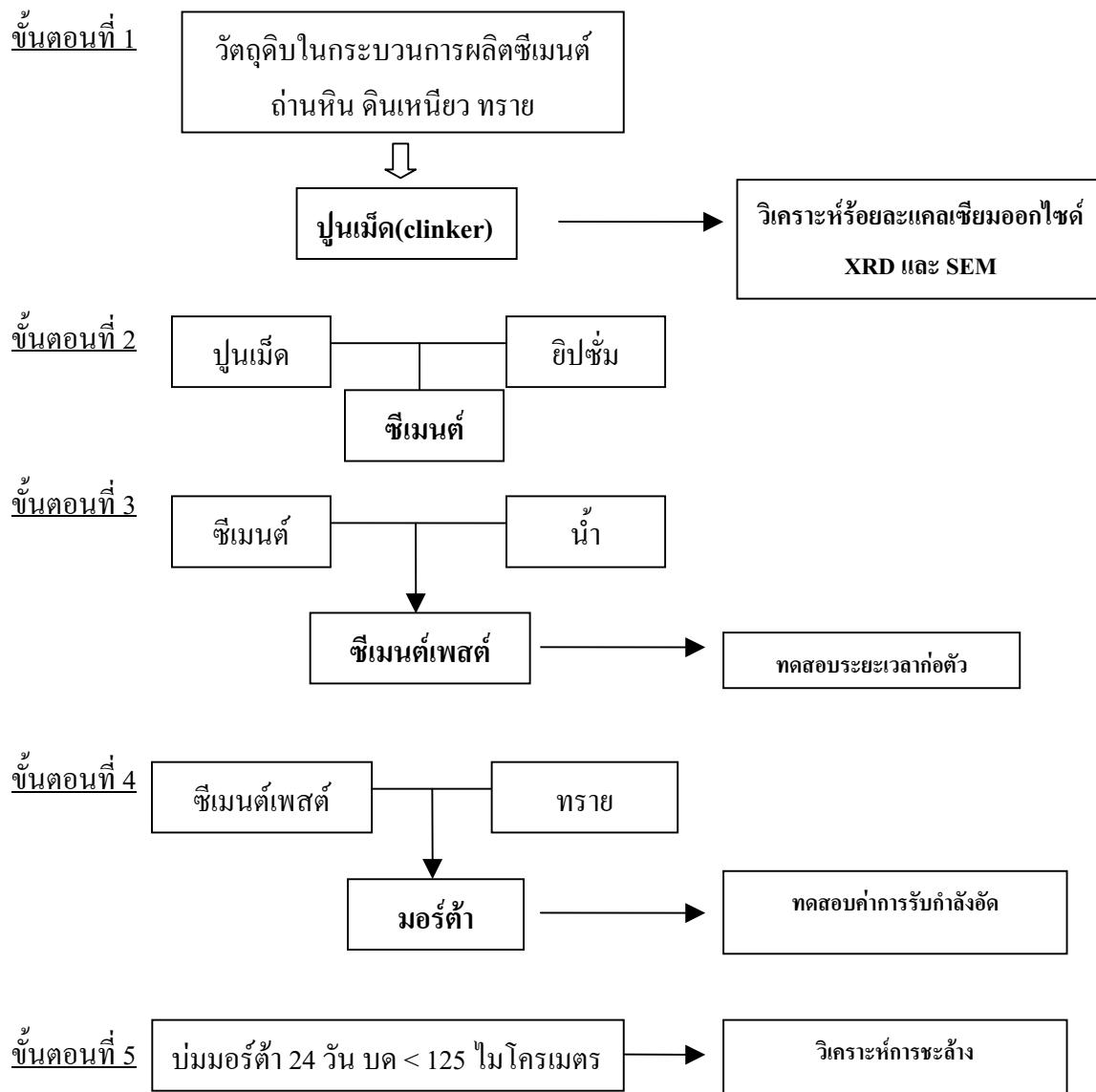
วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ดแสดงในตารางที่ 3.1 ส่วนวานาเดียมที่ใช้ในการทดลองอยู่ในรูป  $V_2O_5$  มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็นร้อยละ 0.01 0.05 0.10 0.50 และ 1.00 โดยนำหนัก โดยทำการทดลองที่ละค่าความเข้มข้น และศึกษาลักษณะสมบัติของปูนเม็ดที่ได้จากการวานาเดียมเริ่มต้นที่ค่าต่างๆ กัน

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ดซึ่งในการทดลองนี้

สารประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยนำหนัก)
$SiO_2$	14.25
$Al_2O_3$	3.33
$Fe_2O_3$	2.21
CaO	43.08
MgO	1.22
$K_2O$	0.46
$Na_2O$	0.00
$SO_3$	0.26
LOI	35.37
รวม	100

หมายเหตุ : LOI = การสูญเสียมวลสารจากการเผา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการทดสอบการฉะล้างของวานาเดียมออกจากซีเมนต์ โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.1 รายละเอียดการผลิตซีเมนต์และการทดสอบ

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.2.1 X-ray Diffractometer (XRD)

เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบปูนเม็ด เพื่อพิจารณาปริมาณขององค์ประกอบของปูนเม็ด

#### 3.2.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้ เช่น ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ได้ ไปจนถึงลักษณะพื้นผิวของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ด

#### 3.2.3 Energy-Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

วิเคราะห์เทียบเคียงร้อยละของโลหะหนักที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ดหลังจากการเผาด้วยอุปกรณ์ Energy-Dispersive X-ray Spectrometer(EDS) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมสำหรับการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณของเครื่อง SEM

#### 3.2.4 Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP)

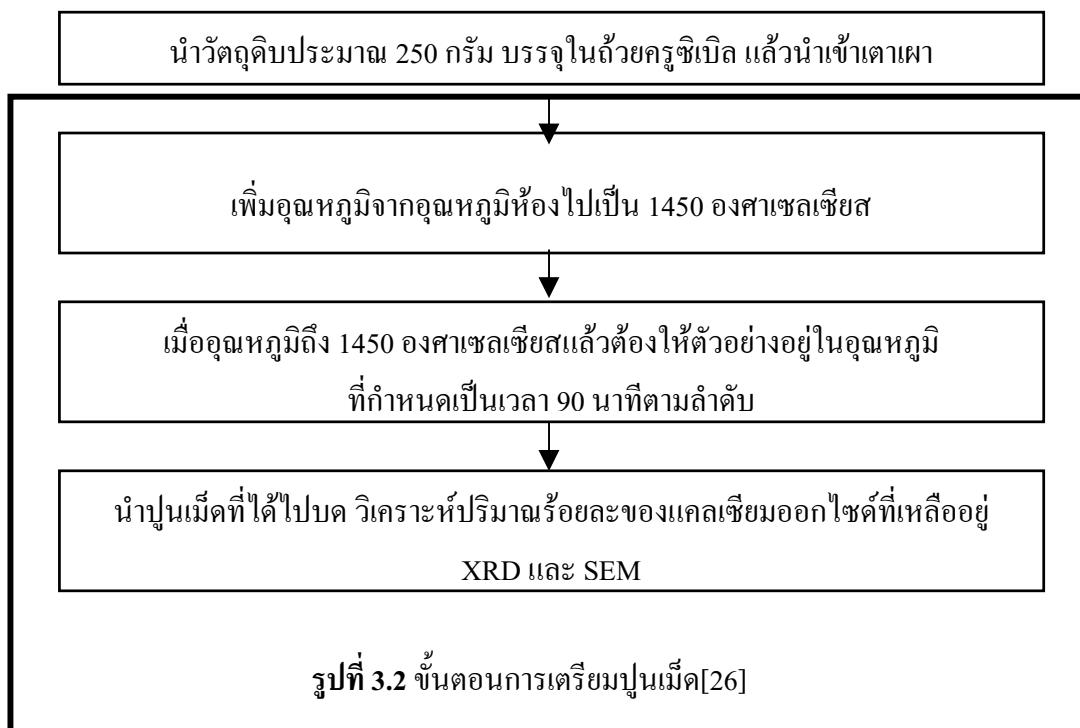
เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่จะล้างออกมาจากซีเมนต์

### 3.3 การเตรียมซีเมนต์ที่มีของเสียอันตรายที่มีโลหะหนัก

จากการทบทวนงานวิจัยที่มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ [11,12] พบว่าสภาวะที่นิยมใช้ในการเตรียมปูนเม็ด(clinker) ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง(electric furnace)ได้แก่ การเผาต่ำดูบจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส โดยมีรอบการเผาใหม้อよู่ในช่วง 10-30 องศา-เซลเซียสต่อนาที โดยต่ำดูบจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที แล้วจึงนำปูนเม็ดที่ได้มาทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลที่ได้จากการเผาจะทำให้ได้ปูนเม็ดที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ได้จากการเผาอุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที เพื่อให้แน่ใจได้ว่า ปูนเม็ดที่ได้มีลักษณะสมบัติที่สามารถเทียบเคียงได้จริง จึงมีการทดสอบคุณภาพของปูนเม็ดด้วยวิธีการวัดปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่โดยปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ที่วัดได้นี้จะเป็นสิ่งที่ชี้นำถึงขั้นของการเผาใหม่ (degree of burning) ที่เกิดขึ้นจริงในเตาเผา โดยการเผาที่ดีที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้ ไตรแคลเซียมซิลิกेटอยู่ในช่วงร้อยละ 40-70 โคลแคลเซียมซิลิกेटอยู่ในช่วงร้อยละ 20-30 โดยมี ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ อย่างละร้อยละ 1-2 โดยค่าปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่โดยที่วัดได้ในสภาวะดังกล่าวจะอยู่ในช่วงร้อยละ 1.0 – 2.5 โดยนำหนัก

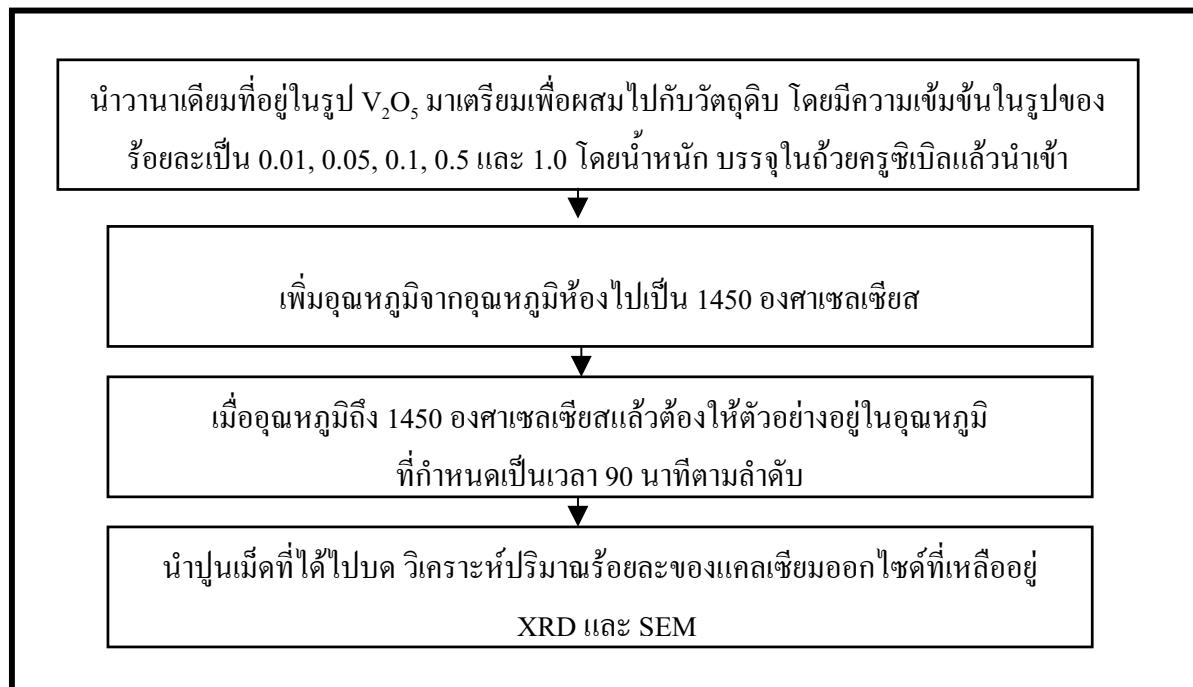
### 3.3.1 การเตรียมปูนเม็ด[11]

นำวัตถุดิบมาบดให้ละเอียด จนนั่นนำมารรจุลงในถ้วยครูซิเบิล แล้วนำเข้าเตาเผาเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องให้ไปเป็น 1450 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มเป็น 10 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1 นาที เมื่ออุณหภูมิห้องถึง 1450 องศาเซลเซียสแล้ว จะต้องให้ตัวอย่างอยู่ในอุณหภูมิ 90 นาที หลังจากการเผาให้ได้ปูนเม็ดตามที่ต้องการแล้ว นำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้โครงสร้างซิลิกาต์ซึ่งเกิดในรูปของเหลวันนี้ กลายเป็นของแข็ง และอยู่ในรูปของปูนเม็ดตามต้องการนำปูนเม็ดที่ได้ไปบดและวิเคราะห์หาค่าปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM ขั้นตอนการเตรียมปูนเม็ดแสดงดังรูป 3.2



### 3.3.2 การเตรียมปูนเม็ดที่มีวานาเดียมผสมอยู่

ในส่วนของการผสมโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันเข้าไปในวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ด และเข้าสู่เตาเผาร่วมกับวัตถุดิบนั้น โลหะหนักที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ วานาเดียม ขั้นตอนการเตรียม ปูนเม็ดที่มีวานาเดียมแสดงดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมปูนเม็ดที่มีวนานาเดียม

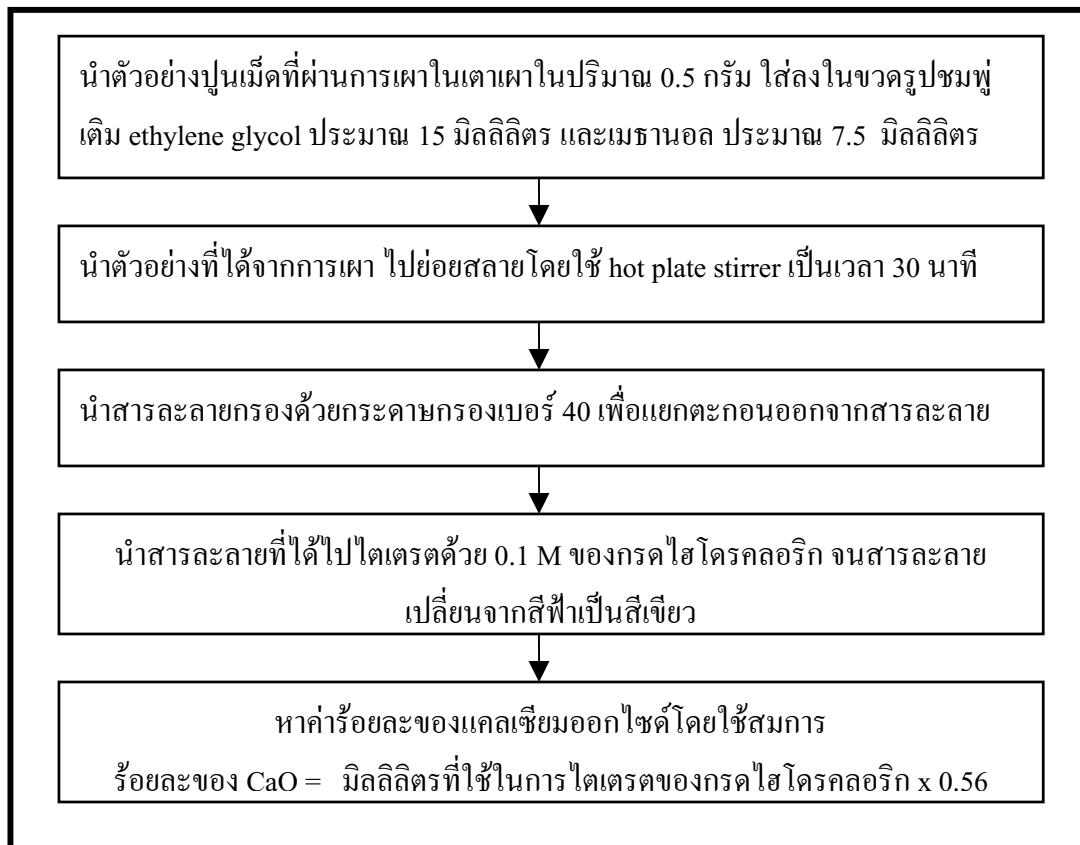
### 3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ (free lime)

การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เป็นการหาสัดส่วนของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกริยาในการเกิดเป็นไตรแคลเซียมซิลิกेटและไดแคลเซียมซิลิกेट โดยค่าที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่า ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ในช่วงร้อยละ 1-1.5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการผลิตปูนเม็ดของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ รายละเอียดในการทดสอบ มีดังนี้

นำตัวอย่างปูนเม็ดที่ผ่านการเผาในเตาเผาในปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชามพู่ แล้วเติม ethylene glycol ปริมาณ 15 มิลลิลิตร และเมทานอล ปริมาณ 7.5 มิลลิลิตรนำตัวอย่างที่ได้จากการเผา ไป ย่อysลายโดยใช้ hot plate stirrer เป็นเวลา 30 นาทีจากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง เพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลายนำสารละลายที่ได้ไปต่ำต่ำด้วย 0.1 M ของกรดไฮド록อลิก จนสารละลายเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีเขียวนำมาหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่โดยใช้สมการที่ 3.1 และขั้นตอนการหา ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่แสดงดังรูป

3.4

$$\text{ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์} = \text{มิลลิลิตรที่ใช้ในการกรดไฮด록อลิก} \times 0.56 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการหาร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่

### 3.3.4 การนำตัวอย่างของปูนเม็ดไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD SEM และEDS

นอกจากการทดสอบด้วยการหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ของปูนเม็ดที่ได้ว่ามีลักษณะสมบัติที่สามารถเทียบเคียงกับปูนเม็ดที่ผลิตได้จริงจากการบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ทางผู้วิจัยยังได้นำปูนเม็ดที่ได้จากการบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นคร-หลวงจำากัด และปูนเม็ดที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการทั้งในส่วนที่ไม่มีวานาเดียมและมีวานาเดียมไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ เครื่อง XRD และ SEM เพื่อเปรียบเทียบถึงเฟสที่เกิดขึ้นของปูนเม็ด

#### 1. การวิเคราะห์ X-ray Diffractometer (XRD)

การศึกษาโครงสร้างของสารและวัสดุโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เนื่องจากความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์มีขนาดในช่วงเดียวกับระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมของสาร แบบทุกชนิด ในกรณีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึก รูปแบบการเรียงตัวที่ซ้ำๆ กันของผลึกทำหน้าที่

เหมือนกับเป็นกรรมติงให้กับรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไป ทำให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการศึกษาทางด้านผลึกศาสตร์

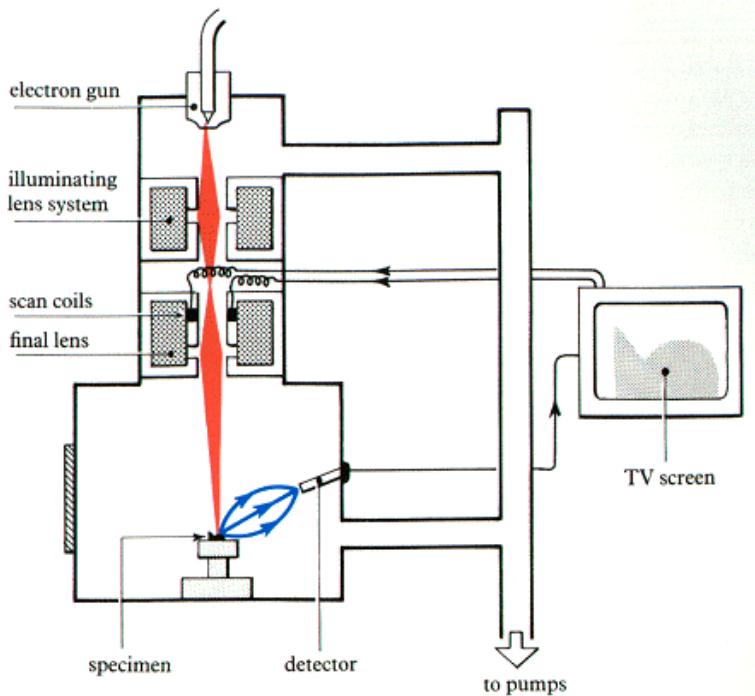
โดยในการศึกษานี้จะใช้เครื่อง XRD แสดงถึงเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดจากห้องสองแหล่ง ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิกะ ไดแคลเซียมซิลิกะ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ และเฟสของวานาเดียมเมื่อออยู่ในปูนเม็ด ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ XRD แสดงในตาราง 3.2

### ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ XRD

พารามิเตอร์	เงื่อนไขที่ใช้
มุม( $2\theta$ )	5-80 องศา
สเตปไซส์(step size)	0.02 องศา
สเตปไทม์(step time)	1 วินาที
ค่าความต่างศักย์	30 กิโลโวัลต์
กระแสไฟฟ้า	30 มิลลิแอมป์
อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส

## 2. การวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM)

หลักการทำงานของ SEM คือ การใช้ปืนอิเล็กตรอนเป็นตัวให้กำเนิดลำอิเล็กตรอนเพื่อขึ้นลงไปบนแผ่นเวเฟอร์ อิเล็กตรอนจะถูกเร่งจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 กิโลโวัลต์ โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยเลนส์คอนเดนเซอร์ (illuminating lens) ซึ่งจะทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดของหน้าตัดเล็กลงและปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอปเพอร์เจอร์(final lens) ซึ่งเป็นช่องเปิดที่มีขนาดต่างกัน จากนั้นเลนส์วัตถุจะปรับไฟกส์ลำอิเล็กตรอนให้ไปตอกกระแทบที่เป้าหมายโดยใช้คอยล์กวดภาพ(scan coil) ทำหน้าที่กวดลำอิเล็กตรอนบนผิวของแผ่นเวเฟอร์ แล้วนำสัญญาณที่ได้มาแปลงและแสดงผลทางภาพดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 หลักการทำงานของ SEM

ในการศึกษานี้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อบอกถึงลักษณะทางโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้ เช่น ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ได้ ไปจนถึงลักษณะพื้นผิวของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ด

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยยังได้นำปูนเม็ดไปวิเคราะห์เทียบเคียงร้อยละของโลหะหนักที่ปรากฏ อยู่ในปูนเม็ดหลังจากการเผาด้วยอุปกรณ์ Energy-Dispersive X-ray Spectrometer(EDS) ซึ่งเป็น อุปกรณ์เสริมสำหรับการวิเคราะห์ในชิ้นปริมาณของเครื่อง SEM

### 3.4 การทดสอบเวลาในการก่อตัว (setting time) ของซีเมนต์เพสต์

#### 3.4.1 การทดสอบหาความชันเหลวปกติ ASTM C187[13]

1. ชั้นซีเมนต์จำนวน 400 กรัม และใส่ลงในภาชนะสำหรับผสม
2. เกลี่ยซีเมนต์ให้มีลักษณะเป็นรูปกรวยภูเขาไฟ และเทน้ำที่ทราบปริมาณที่แน่นอนลงไป (ในการทดสอบครั้งแรกอาจใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.27) และในขณะที่เทน้ำนั้นให้ใช้ เกรียงเกลี่ยซีเมนต์ด้านนอกเข้าไปด้านในด้วยเพื่อกันการระเหยของน้ำ ให้เทน้ำให้หมดภายในระยะเวลา 30 วินาที

3. ปล่อยทิ้งไว้ให้ซีเมนต์ดุดซีเมนต์น้ำอีกเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นบีบ นวดซีเมนต์เพสต์อย่าง แรง เพื่อให้น้ำกับซีเมนต์ผสมเข้ากันอย่างทั่วถึงเป็นระยะเวลา 90 วินาที และบีบซีเมนต์เพสต์ที่ได้

ให้เป็นก้อนกลมๆอย่างรวดเร็ว แล้วโอนจากมือหนึ่งไปอีกมือหนึ่งสลับกันไป จำนวน 10 ครั้ง โดยให้มือทั้งสองห่างกันประมาณ 15 เซนติเมตร

4. อัดซีเมนต์เพสท์ที่เข้าไปทางด้านใหญ่ของแบบรูปกรวยของเครื่องมือไว้แคตปัจซีเมนต์เพสท์ที่เกินอยู่ทางด้านใหญ่ของแบบออกโดยใช้มือเลื่อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

5. วางแบบด้านใหญ่ลงบนแผ่นแก้ว แล้วปิดซีเมนต์เพสท์ที่เกินอยู่ทางด้านเล็กออกโดยใช้เกรียงตัดเฉียงๆ กับด้านบนของแบบ จากนั้นให้ตัดแต่งผิวน้ำให้เรียบร้อย โดยใช้ปลายเกรียงแตะๆ เท่านั้น ห้ามมิให้มีการอัดซีเมนต์เพสท์ด้วยแรงใดๆทั้งสิ้น

6. วางซีเมนต์เพสท์ให้อยู่ใต้เข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรของเครื่องมือไว้แคตเลื่อนปลายเข็มให้แตะกับผิวของเพสท์ตรงกลางแบบ จากนั้นอ่านสเกลหน้าปั๊มให้ปล่อยเข็มทันที เมื่อผ่านซีเมนต์เสร็จแล้ว 30 วินาที

7. อ่านสเกลหน้าปั๊มอีกครั้งหนึ่งหลังจากที่ปล่อยเข็มไปได้ 30 วินาที ซึ่งจะทำให้ทราบได้ว่าเข็มคงลงไปเท่าใด

8. ให้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณน้ำที่ใช้ กับระยะที่เข็มลง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

9. ให้ทำการทดลองซ้ำๆ หลายครั้ง (จากข้อ 1 ถึงข้อ 13) โดยใช้ซีเมนต์ใหม่ทุกครั้งโดยเพิ่มปริมาณน้ำอีกร้อยละ 2 ต่อครั้ง จนกระทั่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ใช้กับส่วนที่เข็มลงไป 10 มิลลิเมตร ได้จากกราฟ ปริมาณน้ำที่หาได้ก็คือ ความขั้นเหลวปกติของซีเมนต์นั้นๆ

### 3.4.2 การทดสอบหาระยะเวลา กอตัว ASTM C191[14]

1. ปฏิบัติตามขั้นตอนที่ 1 – 8 ของการทดสอบหาค่าความขั้นเหลวปกติของซีเมนต์ โดยใส่น้ำในปริมาณที่ทำให้ซีเมนต์มีความขั้นเหลวปกติ

2. ให้ทำการทดสอบหาระยะที่เข็ม (Vicat needle) ลงไปเมื่อปล่อยเข็มขนาด 1 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไปหลังจากที่เตรียมตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว 30 นาที และให้ทำการทดสอบซ้ำๆ 15 นาที หลังจากนั้น (ทุก 10 นาที สำหรับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม) จนกระทั่งได้ระยะเข็มลงน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร

3. ในการทดสอบแต่ละครั้งให้เลื่อนปลายเข็มให้แตะกับผิวของเพสท์จากนั้นให้อ่านสเกลหน้าปั๊ม (หรืออาจตั้งสเกลให้อ่านที่ศูนย์ก็ได้) แล้วปล่อยเข็มให้เลื่อนลงทันทีเป็นระยะเวลา 30 วินาที จากนั้นจึงอ่านสเกลอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ทราบว่าเข็มลงไปเท่าใด (ในกรณีที่เพสท์เหลวมาก อาจใช้มือช่วยเพื่อป้องกันเข็มงอได้)

4. ในการทดสอบแต่ละครั้งไม่ควรทดสอบใกล้กันกว่า 6.4 มิลลิเมตรจากจุดเดิมหรือ 9.5 มิลลิเมตร จากขอบด้านในของแบบรูปวงแหวน

5. หาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ผ่านไปในขณะที่เข้มงวดไป 25 มิลลิเมตร ได้จากการ ระยะเวลาที่หาได้คือระยะเวลา ก่อตัวของซีเมนต์นั้นๆ

### หมายเหตุ

- ระยะเวลา ก่อตัวที่หาได้จากการทดลองครั้งนี้ เป็นระยะเวลา ก่อตัวเบื้องต้น (Initial Setting Time) เท่านั้น ส่วนระยะเวลา ก่อตัวขั้นสุดท้าย (Final Setting Time) นั้น หมายถึง ระยะเวลาที่ผ่านไป เมื่อปั๊บอยเข้มไม่ถ่วงลงเลย
- ในการทดลองแต่ละครั้ง ควรทำความสะอาด เครื่องมือ ก่อน และ ดัดเข็มให้ตรงอยู่เสมอ



รูปที่ 3.6 เครื่องมือทดสอบการก่อตัวของซีเมนต์

## 3.5 การทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้า (ASTM C109-95) [15]

### 3.5.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

#### 1. การเตรียมแบบหล่อ

1. ทำแบบหล่อด้วยน้ำมัน ให้ทั่วค้านในแบบหล่อบางๆ
2. ประกอบแบบหล่อ เมื่อประกอบเสร็จแล้ว เช็ดน้ำมันส่วนเกินที่เหลือบนบริเวณผิวค้าน ตามข้อบกและกันแบบหล่อทุกอัน
3. วางแบบหล่อบนแผ่นวัสดุที่ได้รับอนุญาต ไม่ดูดซึมน้ำ ซึ่งทาน้ำมันไว้แล้ว
4. ใช้ชี้ผิ่งหรือน้ำมันพาราฟิน 3 ส่วน ต่อ น้ำมันสน 5 ส่วน โดยน้ำหนัก ทำอุดแนวยกต่อ ค้านออกของแบบหล่อและแผ่นรอง

#### 2. การเตรียมซีเมนต์มอร์ต้าและทดสอบการรับกำลังอัด

1. ส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ต้า ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.485
2. การผสมมอร์ต้า ให้ผสมด้วยเครื่องผสม (Mixer) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 2.1 ทำความสะอาดใบพาย หม้อผัด แล้วทำให้แห้งใส่น้ำที่คำนวณได้เทลงในหม้อผัด
- 2.2 ใส่ปูนซีเมนต์ที่ซึ่งไว้แล้วลงในน้ำ แล้วปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วต่ำ(140 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- 2.3 ในขณะที่ปิดเครื่องผสมความเร็วต่ำ ค่อยๆเติมทรายที่เตรียมไว้ลงในหม้อผัดอย่างช้าๆจนหมดภายในเวลา 30 วินาที
- 2.4 ปิดเครื่องผสม แล้วปรับความเร็วในระดับความเร็วปานกลาง (285 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- 2.5 ปิดเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที ระหว่างนี้ให้ปูนซีเมนต์ที่ติดอยู่ข้างๆหม้อผัด และใบพาย ให้มารวมกันอยู่ตรงกลางให้เสร็จภายในเวลา 15 วินาที แล้วนำฝาภาชนะปิดหม้อผัดไว้จนครบเวลาที่กำหนด
- 2.6 เปิดเครื่องผสมในระดับความเร็วปานกลาง อีกเป็นเวลา 1 นาที เสร็จแล้วปิดเครื่อง
3. ให้เริ่มหล่อก้อนทดสอบภายในเวลาไม่เกิน 4 นาที นับตั้งแต่ผสมเสร็จ เอ้าซีเมนต์ใส่ลงในแบบหล่อโดยแบ่งเป็น 2 ชั้น
4. กระทุบด้วยแท่งกระทุบชั้นละ 32 ครั้ง ในเวลา 10 วินาที โดยการกระทุบจะแบ่งชั้นตัวอย่างเป็น 8 ส่วน กระทุก่วนในแต่ละส่วนจนครบ 4 รอบ
5. ใช้เกรียงปัดหน้ามอร์ต้าส่วนที่เกินออกให้เสมอขอบเขตของแบบหล่อเพียง 1 ครั้ง ในลักษณะเหมือนการเลือย แล้วแต่งหน้ามอร์ต้าให้เรียบ
6. หลังจากหล่อชั้นตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้บ่อ ก้อนทดสอบทั้งแบบในห้องชีนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยปล่อยให้ผิวน้ำด้านบนสัมผัสถกับอากาศชีน แต่อย่าให้ถูกหมายด้านน้ำเมื่อครบ 24 ชั่วโมง ตัดแบบออกนำไปปั่นในน้ำตามระยะเวลาที่ต้องการ
7. เช็คผิว ก้อนตัวอย่างทดสอบแต่ละก้อนให้แห้ง
8. วางก้อนตัวอย่างทดสอบเข้าในเครื่องกดให้อยู่ใต้สูญญากาศเปลี่ยนกด ในระหว่างทำการทดสอบจะต้องไม่ทำการปรับแต่งกลไกความคุณการทำงานของเครื่องทดสอบ
- คำนวณหาค่าความต้านทานแรงอัดของซีเมนต์จากสมการ 3.2

$$F = P/A \quad (3.2)$$

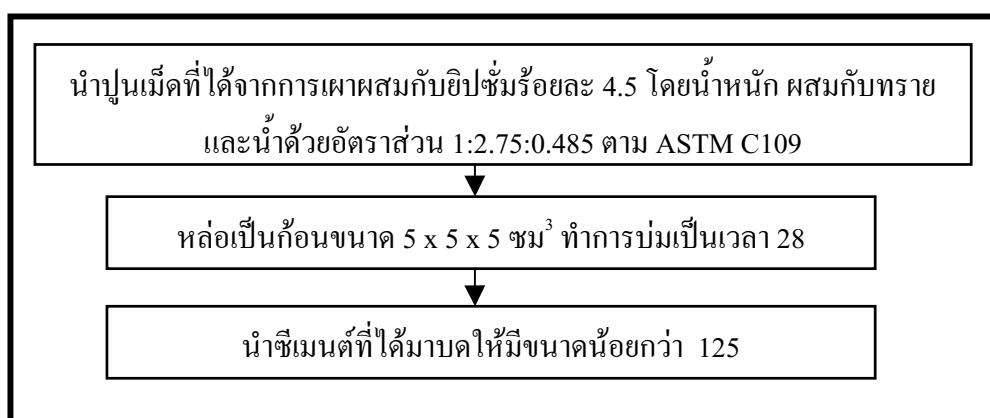
F = ค่าความต้านทานแรงอัดประลักษณ์หรือหน่วยแรงอัดประลักษณ์, N./mm<sup>2</sup>

P = แรงอัดประลักษณ์, N.

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของชั้นตัวอย่างทดสอบ, mm<sup>2</sup>

### 3.6 การทดสอบการฉาบล้างวานาเดี่ยมจากซีเมนต์มอร์ต้า

นำซีเมนต์มอร์ต้าที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดโดยระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มาบดให้มีขนาดน้ำขอกว่า 125 ไมโครเมตร เพื่อนำไปทดสอบการฉาบล้างของวานาเดี่ยมจากซีเมนต์ ขั้นตอนแสดงดังรูป 3.7 โดยแบ่งการทดลองเป็นทั้งสิ้น 4 ส่วน โดยมีจุดมุ่งหมายและวิธีการที่แตกต่างกัน ดังนี้

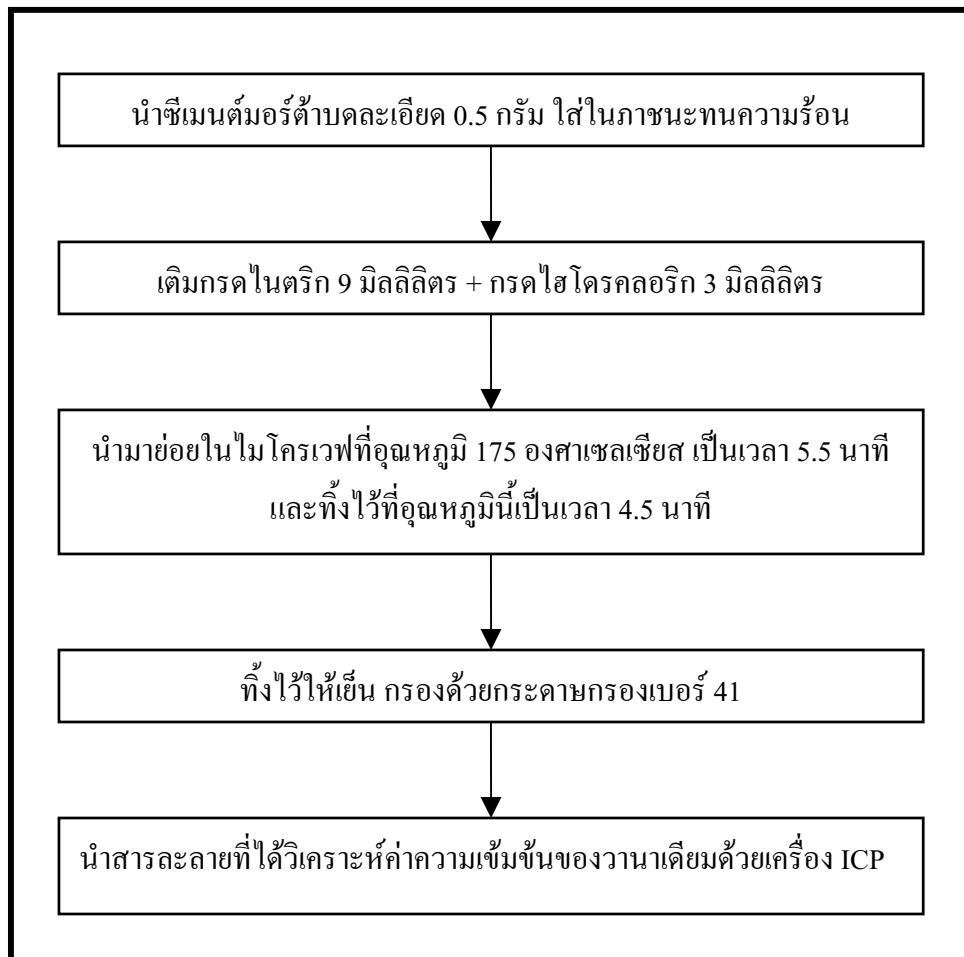


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์มอร์ต้าเพื่อทดสอบการฉาบล้าง

#### 3.6.1 การทดสอบวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A

การหาโลหะหนักที่มีโอกาสสูญฉาบล้างออกมาได้นั้น ทำได้โดยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A เพื่อหาสัดส่วนของการฉาบล้างโลหะหนักด้วยกรดเมื่อเทียบกับปริมาณโลหะหนักที่มีทั้งหมดในซีเมนต์ โดยวิธีการทดสอบได้ปฏิบัติตามมาตรฐานของ US.EPA คือ Microwave-assisted leach method 3051 A โดยมีรายละเอียด คือ นำซีเมนต์มอร์ต้าบดละเอียดมาอย่างสลายในกรดในครึ่งเข้มข้นในไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลาสี่นาทีครึ่ง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นกรองสารละลายที่ได้เพื่อไปหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย แล้วเทียบกับปริมาณโลหะหนักต่อปริมาณซีเมนต์ ขั้นตอนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.8

ในขั้นตอนนี้ โลหะหนักจากตะกอนจะสูญวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักที่มีอยู่ในซีเมนต์ที่สามารถฉาบล้างออกมาได้ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักนี้คือ Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP)



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A

### 3.6.2 การทดสอบวิธี Availability Leaching Test

การทดสอบนี้เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักที่มากที่สุดที่สามารถถูกละลายนอกมาได้ โดยการทดสอบ Availability Leaching Test นี้ ได้จำลองกรณีที่โลหะหนักสามารถถูกละลายนอกมาได้มากที่สุด การทดสอบนี้จึงเป็นการหาปริมาณที่มากที่สุดที่โลหะหนักจะถูกละลายนอกมาได้

การทดสอบนี้มีวิธีทดสอบคือ นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมาบดละเอียดแล้วนำมาสกัดด้วยการเติมตัวสกัด ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(L/S) เท่ากับ 50 โดยตัวสกัดในนี้คือน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีไอออนไดอิย์(deionized water) โดยการสกัดประกอบด้วยการสกัดสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกทำที่พื้นที่เท่ากับ 7 และขั้นตอนที่สองทำที่พื้นที่เท่ากับ 4 โดยใช้เวลาในการสกัด 3 ชั่วโมง จาก

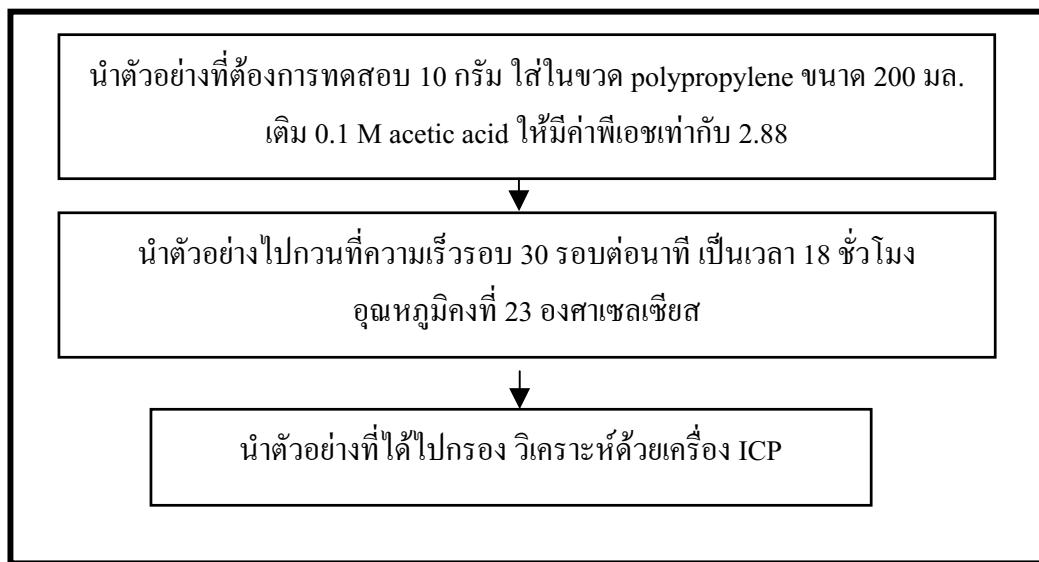
นี้น้ำสารละลายที่ได้จากการสกัดทั้งสองขั้นรวมกันเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี Availability Leaching Test

### 3.6.3 การทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (US.EPA)

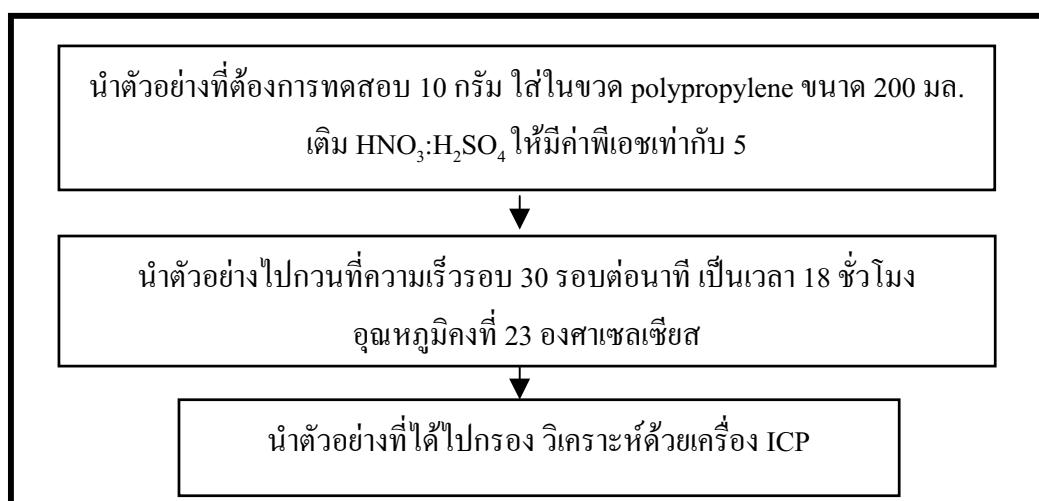
การทดสอบนี้เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างด้วยวิธี TCLP นั้นมีค่ามากกว่าที่มาตรฐานของ US. EPA กำหนดหรือไม่ ในการทดสอบ TCLP ประกอบด้วย การนำซีเมนต์มอร์ต้าบดมาใส่ในขวดทดลอง เติมกรดอะซีติกให้มีค่าพีอีอีประมาณ 2.88 แล้วนำตัวอย่างไปกรุณที่ความเร็วรอบประมาณ 30 รอบต่อนาที โดยมีอุณหภูมิคงที่ที่ 23 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปกรอง โดยสารละลายที่ได้ให้เติมกรดในตระกูลเพื่อให้ค่าพีอีอีต่ำกว่า 2 จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) และขั้นตอนการทดสอบดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA)

#### 3.6.4 การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540

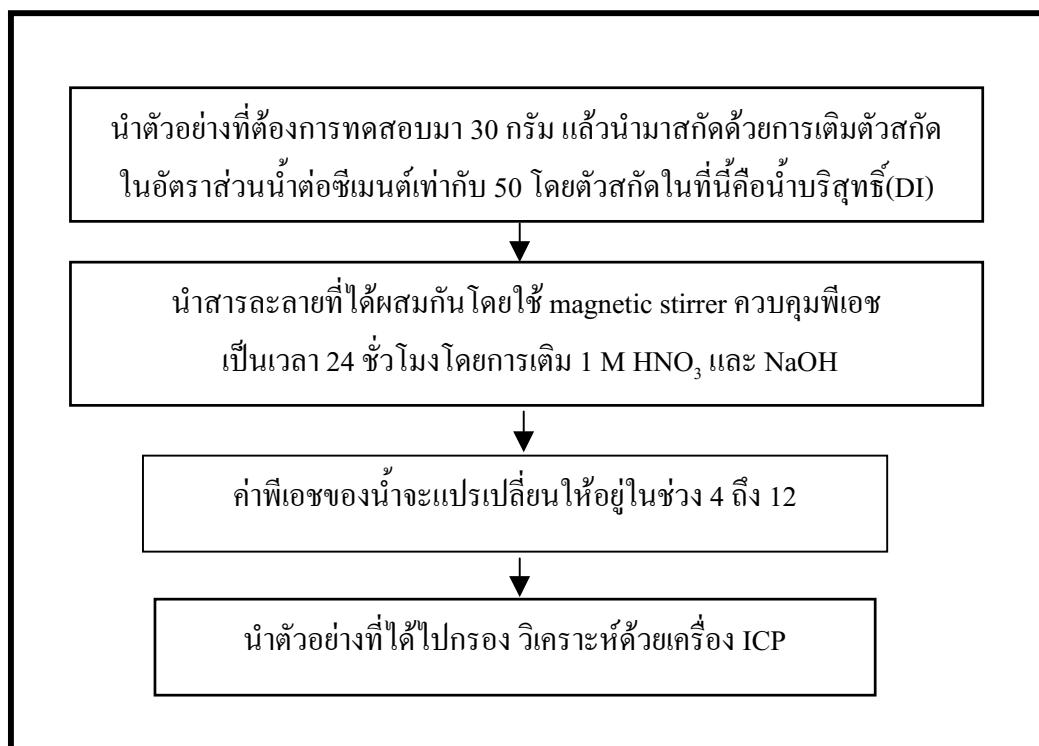
การทดสอบนี้เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างด้วยวิธี TCLP นั้นมีค่ามากกว่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 หรือไม่ ประกอบด้วย การนำเข็ม.en ต้มหรือต้มความใส่ในขวดทดสอบ เติมกรดไฮดริกและกรดซัลฟูริกเป็นอัตราส่วน 80:20 ให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 แล้วนำตัวอย่างไปกวนที่ความเร็วรอบประมาณ 30 รอบต่อนาที โดยมีอุณหภูมิกึ่งที่ 23 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปกรอง โดยสารละลายนี้ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) แสดงขั้นตอนการทดสอบดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540

### 3.6.5 การทดสอบ pH Static Leach Test

การทดสอบนี้เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักที่สามารถถูกชักด้วยเมื่อผลิตภัณฑ์ซีเมนต์นั้นๆ ต้มผัดกับน้ำที่มีค่าพีเอชต่างๆ กัน การทดสอบประกอบด้วยการนำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมาสกัดด้วยการเติมตัวสกัดในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(L/S) เท่ากับ 10 โดยตัวสกัดในที่นี่คือน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่ไอออนไดอิซีด (deionized water) ค่าพีเอชของน้ำจะแปรเปลี่ยนให้อยู่ในช่วง 4 ถึง 12 โดยใช้เวลาในการสกัด 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการสกัดมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) และดูขั้นตอนการทดสอบดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทดสอบ pH Static Leach Test

ในการวิเคราะห์หาค่าโลหะหนักแต่ละชนิดในการศึกษานี้จะใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP) เป็นหลัก ซึ่งอาจมีการพิจารณาใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AA) ร่วมด้วย

### 3.7 แผนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 3.3 แผนการดำเนินการวิจัย

กิจกรรม	เดือนที่								
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18
1. การเตรียมปูนเม็ด	↔	↔							
2. การทดสอบหาลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อมีวันเดียวน		↔↔	↔↔						
3. การทดสอบหาเวลาในการก่อตัว (setting time) ของชิ้นต์			↔↔		↔↔				
4. การทดสอบหากำลังอัด (compressive strength) ของชิ้นต์				↔↔					
5. การทดสอบ Microwave-assisted leach method 3051 A					↔↔				
6. การทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)						↔↔			
7. การทดสอบ Availability Leaching Test							↔↔		
8. การทดสอบpH Static Leach Test								↔↔	
9. การจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์									↔↔

### 3.8 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ตารางที่ 3.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับทุก 6 เดือน

กิจกรรม	ผลที่คาดว่าจะได้รับ
<b>เดือนที่ 1-6</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>การเตรียมปูนเม็ด</li> <li>การทดสอบหาลักษณะสมบัติของปูนเม็ด เมื่อมีวันเดียวน</li> <li>การทดสอบหาเวลาในการก่อตัว (setting time) ของซีเมนต์</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ได้ปูนเม็ดที่มีวันเดียวนปูนอยู่เพื่อนำไปทดสอบต่อไป</li> <li>ได้ลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อมีวันเดียวนปูนอยู่</li> <li>ได้เวลาในการก่อตัวของซีเมนต์</li> </ol>
<b>เดือนที่ 7-12</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>การทดสอบห้ากำลังอัด (compressive strength) ของซีเมนต์</li> <li>การทดสอบ Microwave-assisted leach method 3051 A</li> <li>การทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ได้ผลของกำลังอัด(compressive strength)ของซีเมนต์</li> <li>ได้ผลของปริมาณวันเดียวนที่มีหั้งหมดในซีเมนต์</li> <li>ได้ผลจากการทดสอบด้วยวิธี TCLP เพื่อระบุถึงความเข้มข้นของวันเดียวนที่สามารถถูกทดสอบออกมานได้ตามมาตรฐานของ EPA</li> </ol>
<b>เดือนที่ 13-18</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>การทดสอบ Availability Leaching Test</li> <li>การทดสอบ pH Static Leach Test</li> <li>การจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ได้ปริมาณมากที่สุดของวันเดียวนที่สามารถถูกทดสอบออกมานได้</li> <li>ผลของการทดสอบด้วยวิธี pH ต่างๆ ที่สภาวะค่า pH ต่างๆ</li> <li>ได้รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการนี้ ซึ่งรวมผลงานวิจัยทุกส่วนไว้</li> </ol>

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่ไม่มีวานาเดียม

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเผาปูนเม็ดในห้องปฏิบัติการจากรายงานการศึกษาการ ชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ที่ใช้กากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต[11] ซึ่งจากรายงานดังกล่าวได้รายงานว่าลักษณะของปูนเม็ดที่เผาในห้องปฏิบัติการ โดยใช้อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาทีนั้น จะมีลักษณะเหมือนกับปูนเม็ดที่ได้จากการทดลอง การทดลองนี้จึงได้นำ ข้อมูลส่วนนี้มาใช้ในการเผาปูนเม็ด และได้เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของปูนเม็ดที่ได้จากการทดลองนี้กับปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตซึ่งประกอบด้วย การห้าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ผลของการห้าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่( free lime) ของปูนเม็ดที่ได้จากการทดลองทั้งสิ้น 3 ครั้ง แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การห้าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ได้จากการทดลองทั้งสิ้น 3 ครั้ง แสดงในตารางที่ 4.1

การเผา ปูนเม็ด ครั้งที่	% free lime ตัวอย่างที่ 1	% free lime ตัวอย่างที่ 2	% free lime ตัวอย่างที่ 3	% free lime เฉลี่ย
1	1.30	1.40	1.46	1.38
2	1.43	1.42	1.45	1.43
3	1.46	1.31	1.34	1.37
				Avg = 1.39

หมายเหตุ: ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่( free lime) ที่ต้องการอยู่ในช่วง 1-1.5

การวิเคราะห์ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ นี้แสดงให้เห็นถึงปริมาณของแคลเซียมออกไซด์(CaO) ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและไม่เปลี่ยนรูปไปเป็นไตรแคลเซียมซิลิกेट และได้แคลเซียมซิลิกेट ซึ่งเป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ จากผลการทดสอบ เมื่อใช้อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ให้ผลของร้อยละแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เป็น 1.39 ซึ่งค่าดังกล่าวนี้อยู่ในช่วงของค่าแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ที่เกิดขึ้นเมื่อทดสอบกับปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิต

ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากการห้องปฏิบัติการที่เวลาในการเผาปูนเม็ดที่เวลา 90 นาที โดยแสดงในรูปที่ 4.1

จากราฟในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าเฟสที่ได้ของปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการมีลักษณะเดียวกันกับปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิต โดยพิจารณาไฟล์โครงสร้างหลักของปูนเม็ดที่ปรากฏจากตำแหน่งของพีคของ XRD ที่เกิดขึ้น โดยตำแหน่งหลักของพีคของเฟสหลักของปูนเม็ด มีดังนี้

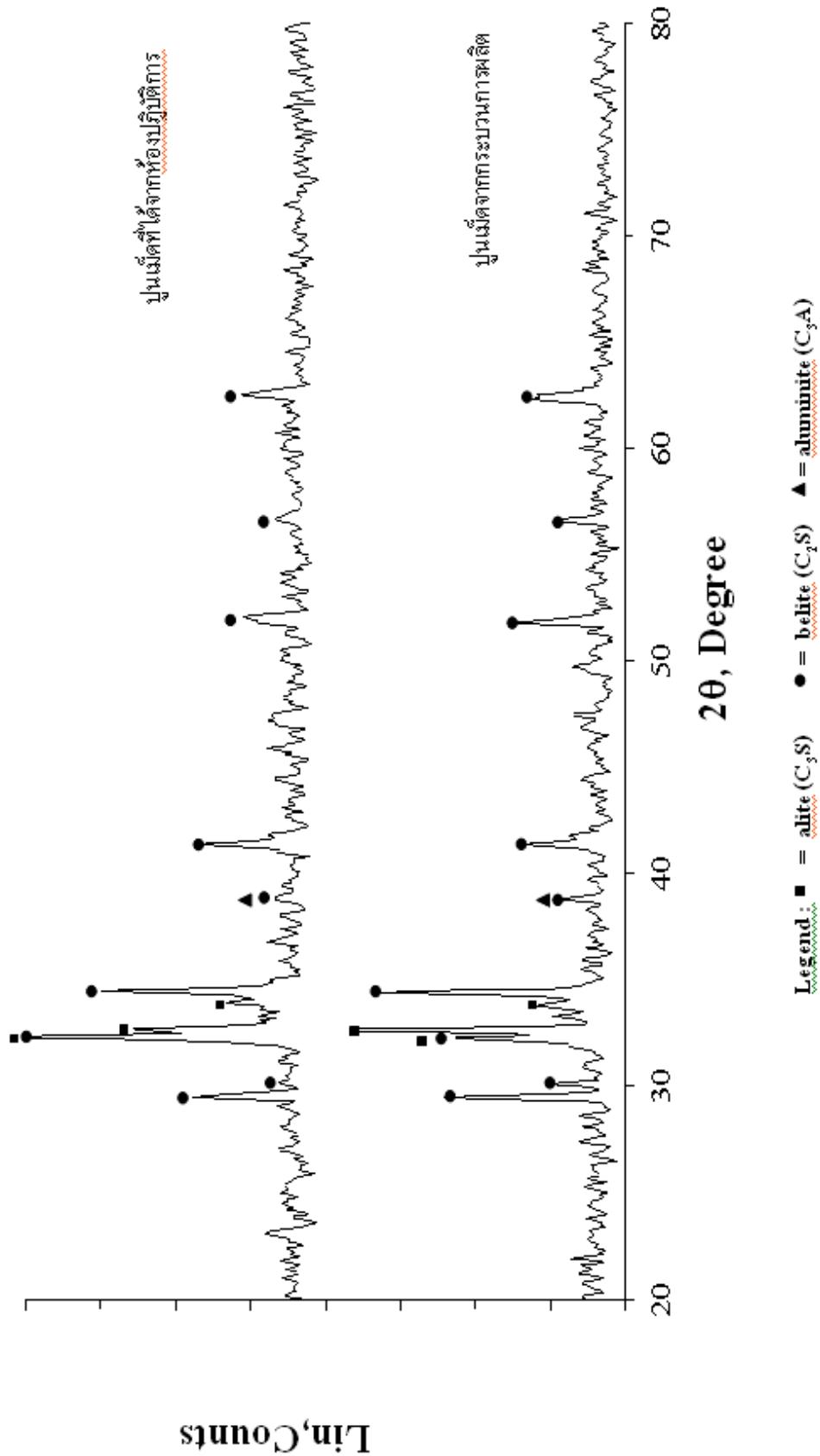
ไตรแคลเซียมซิลิกेट ตำแหน่งพีคหลักจะอยู่ที่มุม  $2\theta = 32.24, 32.66$  และ  $33.92$

ไดแคลเซียมซิลิกेट ตำแหน่งพีคหลักจะอยู่ที่มุม  $2\theta = 29.35, 30.44, 32.24, 34.16, 38.57, 41.40, 51.61$  และ  $62.69$

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ตำแหน่งพีคหลักจะอยู่ที่มุม  $2\theta = 38.575$

จากราฟ XRD พบว่าเฟสของปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีความสอดคล้องกันคือ มีโครงสร้างในรูปของไตรแคลเซียมซิลิกेट( $C_3S$ ) เป็นหลัก โดยมีโครงสร้างของไดแคลเซียมซิลิกेट( $C_2S$ ) ปะปนอยู่ และมีโครงสร้างของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) เล็กน้อย ในขณะที่เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์( $C_4AF$ ) ไม่ปรากฏในการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ด หากพิจารณาถึงปริมาณของเฟสโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตซึ่งแสดงโดยความสูงในภาพรวมในพีคกราฟ XRD จะพบว่าปริมาณของเฟสของปูนเม็ดทั้งในส่วนของไตรแคลเซียมซิลิกेट( $C_3S$ ) ไดแคลเซียมซิลิกेट( $C_2S$ ) และ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) จะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

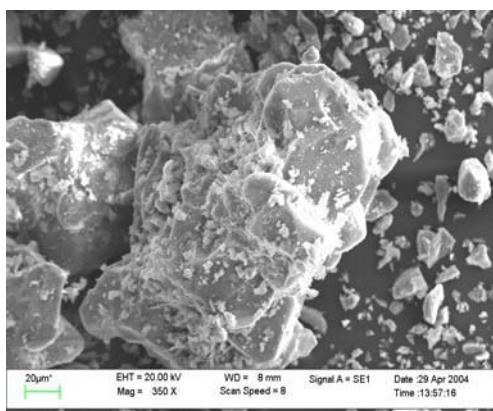
ผลของการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของ ปูนเม็ดและลักษณะของเฟสต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตกับปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตของโรงงาน และในรูปที่ 4.2 ภาพของปูนเม็ดจะเห็นได้ชัดเจนว่าลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นของปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตมีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะของ ปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตของโรงงาน ทั้งนี้หากเพิ่มกำลังขยายของการใช้เครื่อง SEM เพื่อพิจารณาลักษณะของเฟสต่างๆที่เกิดในปูนเม็ดจะได้ลักษณะโครงสร้างของเฟสของปูนเม็ด ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ซึ่งมีลักษณะของเฟสต่างๆ ดังนี้



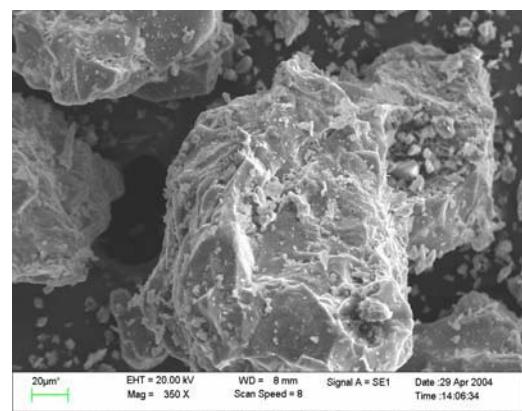
រូបភាព 4.1 ការវិគរាយការបង្កើតការស្រាវមនុស្សដែលត្រូវបានធ្វើឡើងក្នុងការរំលែករាយការណ៍របស់ខ្លួន XRD

ไตรแคลเซียมซิลิกเกต( $C_3S$ ) จะมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยม ซึ่งเป็นเฟสที่พบได้มากที่สุด ไตรแคลเซียมซิลิกเกต( $C_3S$ ) จะมีลักษณะกลมมนเป็นเฟสที่พบได้รองลงมาจากไตรแคลเซียมซิลิกเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนต( $C_3A$ ) มีลักษณะเป็นเกล็ดขาว มักแทรกตามเฟสปูนเม็ด

จากผลข้างต้น spacious ที่ใช้ในการเผาปูนเม็ดในการศึกษานี้ คือการเผาปูนเม็ดที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มเป็น 1 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 10 นาทีและเผาเป็นเวลา นาน 90 นาที จากนั้น ปล่อยให้ปูนเม็ดเย็นตัว ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการเตรียมปูนเม็ดแล้ว ได้ลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิต นอกจากนี้ปูนเม็ดที่ได้จะนำไปใช้ในการทดสอบเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์ การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์และการ扯ล้างนานาเดิมต่อไป โดยคาดว่าจะให้ผลที่เทียบเคียงกับผลที่เกิดขึ้นจริง



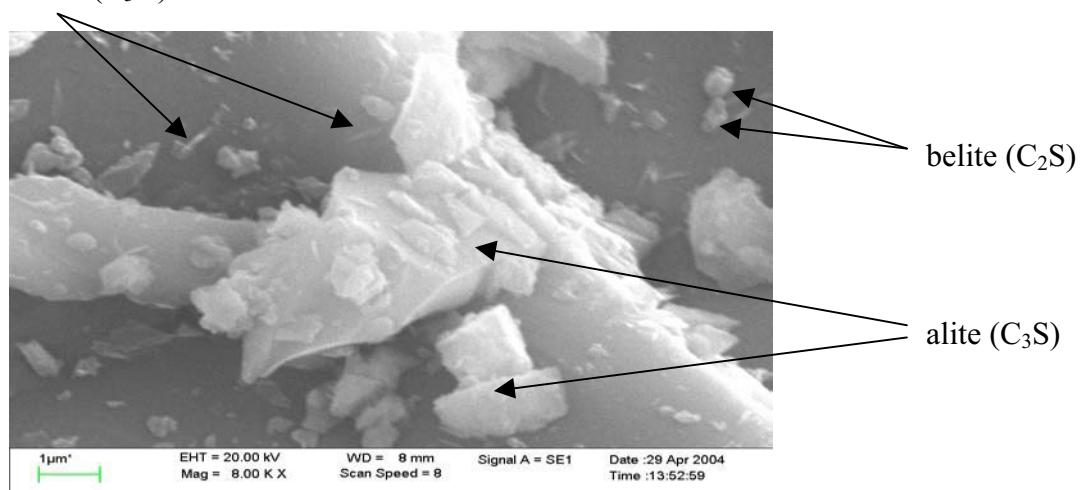
(ก) ปูนเม็ดจากการกระบวนการผลิตของโรงงาน



(ข) ปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 350 เท่า

aluminite ( $C_3A$ )



รูปที่ 4.3 เฟสต่างๆ ของปูนเม็ดที่ได้จากการกระบวนการผลิตของโรงงานที่กำลังขยาย 8000 เท่า[26]

## 4.2 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่มีวานาเดียมผสมอยู่

การทดลองในส่วนนี้เป็นการเติมวานาเดียมในรูปของ  $V_2O_5$  ลงไปในวัตถุคิบที่นำมาศึกษา โดยส่วนประกอบของวัตถุคิบที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ดแสดงในตารางที่ 4.2 ส่วนวานาเดียมที่ใช้ในการทดลองจะมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็นร้อยละ 0.01 0.05 0.10 0.50 และ 1.00 โดยน้ำหนัก โดยทำการทดลองทีละค่าความเข้มข้น และศึกษาลักษณะสมบัติของปูนเม็ดที่ได้จากการวานาเดียมเริ่มต้นที่ต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของวัตถุคิบในการผลิตปูนเม็ดซึ่งในการทดลองนี้

สารประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
$SiO_2$	14.25
$Al_2O_3$	3.33
$Fe_2O_3$	2.21
CaO	43.08
MgO	1.22
$K_2O$	0.46
$Na_2O$	0.00
$SO_3$	0.26

### 4.2.1 ผลของการทดลองร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ด

ผลของการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีวานาเดียมผสมที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0.01 0.05 0.10 0.50 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบในสภาวะเดียวกัน 3 ค่าซึ่งได้จากการผ่านปูนตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.3 และกราฟแสดงแนวโน้มในการเพิ่มหรือลดของร้อยละแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ ที่ความเข้มข้นของวานาเดียมที่ต่างๆ ได้นำมาแสดงเป็นสองช่วง คือ กราฟของร้อยละแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เมื่อมีความเข้มข้นของวานาเดียมในช่วง 0-0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.4 และความเข้มข้นของวานาเดียมในช่วง 0.10-1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.5

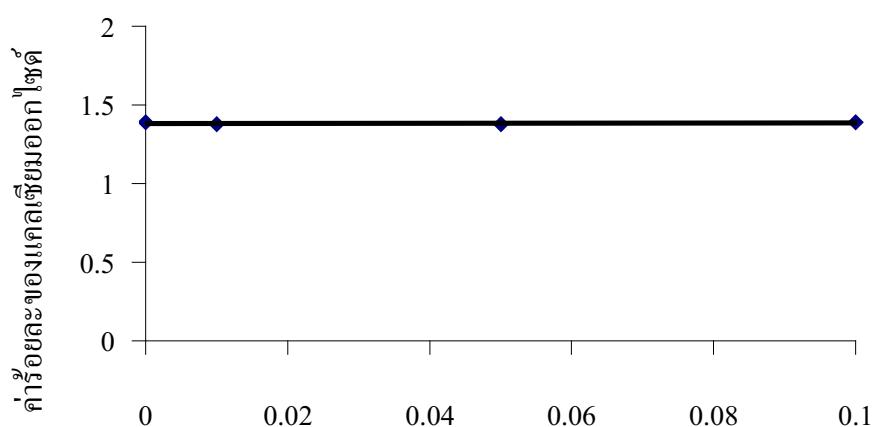
จากราฟรูปที่ 4.4 ผลของการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ที่ช่วงความเข้มข้นของวานาเดียมน้อยกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลักษณะกราฟมีแนวเป็นเส้นตรง โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของวานาเดียม 0.01 0.05 และ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าของร้อยละของ

แคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เท่ากับ  $1.38 - 1.38$  และ  $1.34$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้ค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ปูนเม็ดที่ไม่มีวานาเดียม ซึ่งค่าที่ได้ประมาณ  $1.39$  เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองส่วนนี้แสดงว่าวานาเดียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นน้อยมีแนวโน้มที่จะไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาในการนำแคลเซียมออกไซด์(free lime)ไปเป็นไตรแคลเซียมซิลิกาตและไดแคลเซียมซิลิกาต

ตารางที่ 4.3 ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ของปูนเม็ดเมื่อมีวานาเดียมผสมอยู่ในค่าความเข้มข้น 0-1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความเข้มข้นเริ่มต้นของวานาเดียมในปูนเม็ด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยของร้อยละแคลเซียมออกไซด์
0	1.39
0.01	1.38
0.05	1.38
0.10	1.34
0.50	1.64
1.00	1.82

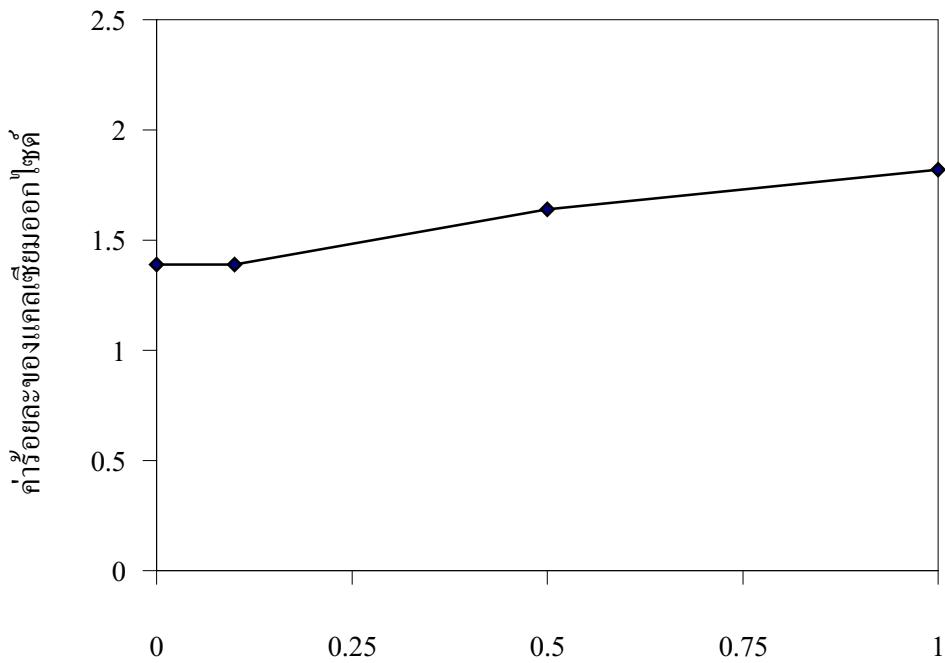
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยของร้อยละของแคลเซียมออกไซด์นี้ได้มาจากการทดลองในสภาวะเดียวกัน 3 ค่า



ความเข้มข้นเริ่มต้นของวานาเดียม, เปอร์เซ็นต์โดยน้ำ

รูปที่ 4.4 แสดงร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของวานาเดียม

อยู่ในช่วง 0-0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ความเข้มข้นเริ่มต้นของวานาเดียม, เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.5 แสดงร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เมื่อความเข้มข้นของวานาเดียมเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0-1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

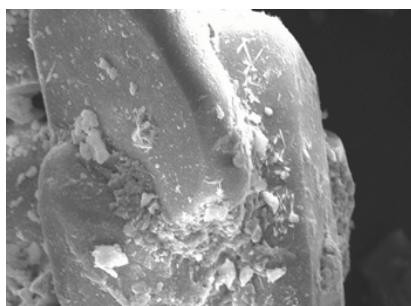
รูปที่ 4.5 สร้างเกตได้ว่าเมื่อมีวานาเดียมปราบภูมิในปูนเม็ดสูงกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ความเข้มข้นของวานาเดียม 0.50 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะได้ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เท่ากับ 1.64 และ 1.82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากผลการทดลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าวานาเดียมที่ค่าความเข้มข้นสูง (ในที่นี่มากกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อาจมีผลต่อการขัดขวางการเปลี่ยนรูปของแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นไครแคลเซียมชิลิกเกตหรือไดแคลเซียมชิลิกเกต ทำให้มีแคลเซียมออกไซด์เหลือจากการทำปฏิกิริยามากกว่าเมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีวานาเดียม

#### 4.2.2 ผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ด

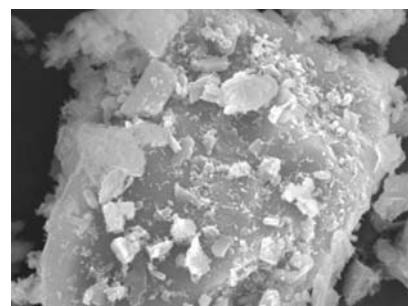
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีวานาเดียมเจือปนอยู่เบริยบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีวานาเดียมอยู่ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 8000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปจะพบว่า เมื่อมีวานาเดียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.01 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลักษณะของพื้นผิวทางกายภาพจะมีลักษณะค่อนข้างใกล้เคียงกับพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีวานาเดียมอยู่ ซึ่งจากการ

วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีวานาเดียมด้วยเครื่อง SEM นั้นปรากฏว่าไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ว่าวานาเดียมได้เข้าไปอยู่ในองค์ประกอบของปูนเม็ดหรือไม่ ดังนั้นจึงได้นำอุปกรณ์เสริมของเครื่อง SEM นั่นคือ EDS มาช่วยในการวิเคราะห์

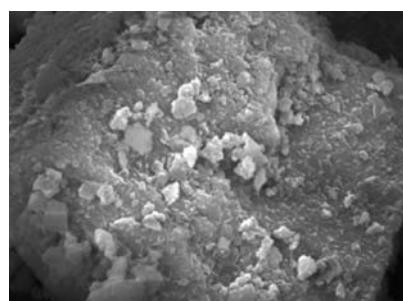
จากการวิเคราะห์ด้วย Energy-Dispersive X-ray Spectrophotometer (EDS) ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วย SEM ได้แสดงให้เห็นว่าวานาเดียมได้เข้าไปแทรกตัวอยู่ในปูนเม็ด โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



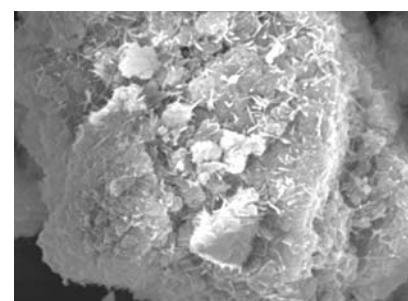
(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีวานาเดียม



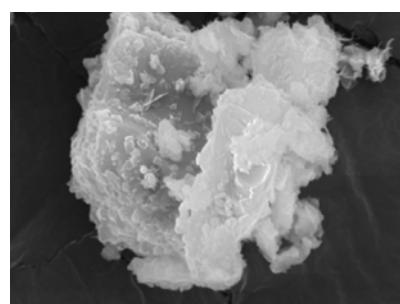
(ข) ปูนเม็ดที่มีวานาเดียม 0.01 เปอร์เซ็นต์



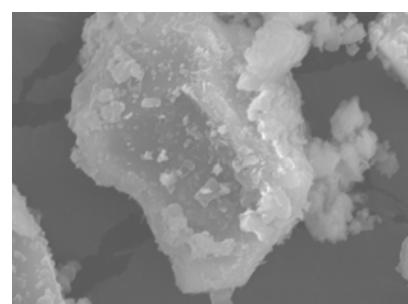
(ค) ปูนเม็ดที่มีวานาเดียม 0.05 เปอร์เซ็นต์



(ง) ปูนเม็ดที่มีวานาเดียม 0.10 เปอร์เซ็นต์

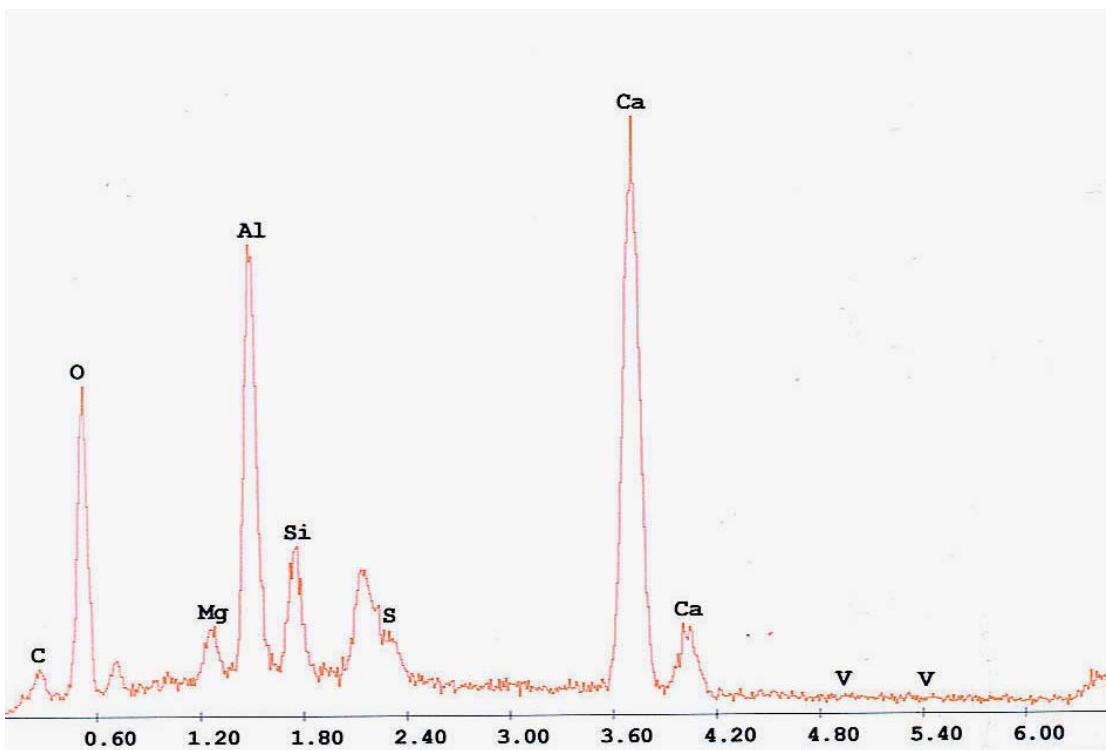


(จ) ปูนเม็ดที่มีวานาเดียม 0.50 เปอร์เซ็นต์



(ก) ปูนเม็ดที่มีวานาเดียม 1.00 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.6 พื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 8000 เท่า



รูปที่ 4.7 ผลของการวิเคราะห์ปูนเม็ดด้วยเครื่อง Energy-Dispersive X-ray Spectrophotometer

ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย EDS นี้จะแสดงในรูปของร้อยละของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในปูนเม็ด ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ ในการทดสอบนี้เพื่อศึกษาว่าวานาเดียมที่แทรกอยู่ในปูนเม็ดนั้น ได้เข้าไปอยู่ในเฟสโครงสร้างไดของปูนเม็ด จึงได้ทำการวิเคราะห์หาร้อยละของวานาเดียมโดยละเอียด โดยวิเคราะห์ถึงร้อยละของวานาเดียมที่ปรากฏในเฟสของไตรแคลเซียมซิลิกेट ไดแคลเซียมซิลิกेट และไตรแคลเซียมอลูมิเนต ตามลำดับ ซึ่งแต่ละตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะทำการสุ่มตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์ทั้งหมด 3 ตำแหน่งต่อ 1 ตัวอย่าง โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.4

จากข้อมูลที่แสดงในตารางจะพบว่า ในปูนเม็ดที่มีวานาเดียมความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วานาเดียมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนเม็ดโดยปรากฏในส่วนของไตรแคลเซียมอลูมิเนตเป็นหลัก และปรากฏอยู่ในส่วนของไตรแคลเซียมซิลิกेट และไดแคลเซียมซิลิกेटในปริมาณที่ต่ำกว่า และเมื่อความเข้มข้นของวานาเดียมเพิ่มเป็น 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณของวานาเดียมที่ปรากฏในเฟสไตรแคลเซียมอลูมิเนต จะลดลงอย่างชัดเจน และปรากฏในเฟสไตรแคลเซียมซิลิกेट และไดแคลเซียมซิลิกेट แตกต่างไปจากเดิม จากข้อมูลดังกล่าวแสดงว่า วานาเดียมมีแนวโน้มในการทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต และไม่ส่งผลต่อไตรแคลเซียมซิลิกेट และไดแคลเซียมซิลิกेट มากนัก ผลจากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าวานาเดียมไดแทรกเข้า

ไปในส่วนประกอบหลักของปูนเม็ด โดยเข้าไปแทรกใน ไตรแคลเซียมซิลิกेट ไดแคลเซียมซิลิกेट ไตรแคลเซียมอลูมิเนต และ เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ โดยผลจากการวิเคราะห์ XRF ได้แสดงให้เห็นว่ามีวิวานาเดียมส่วนใหญ่ ( $> 90\%$ ) ได้ค้างอยู่ในปูนเม็ด และ ไม่ได้ระเหยไปเมื่อมีการเผา ร่วมกับวัตถุดิบของการผลิตปูน ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ด้วย EDS ดังกล่าวข้างต้น

ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีวิวานาเดียมผสมอยู่ในช่วง 0-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ร้อยละของ วิวานาเดียม โดยน้ำหนัก	เพสของ ปูนเม็ด	ร้อยละโดยน้ำหนัก								
		C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	V	รวม
0.01	alite	6.71	34.17	0.70	0.98	10.17	2.11	44.59	<b>0.57</b>	100
	belite	<b>4.25</b>	29.63	0.69	0.92	11.35	2.99	49.43	<b>0.78</b>	100
	aluminite	<b>3.76</b>	26.33	1.69	11.5	4.87	3.00	47.9	<b>0.95</b>	100
0.05	alite	<b>4.38</b>	28.75	0.56	1.23	11.08	2.48	50.74	<b>0.60</b>	100
	belite	<b>5.32</b>	28.47	0.95	1.14	13.4	2.25	47.92	<b>0.55</b>	100
	aluminite	<b>4.91</b>	26.22	3.21	12.81	7.21	3.28	41.42	<b>1.04</b>	100
0.10	alite	<b>8.74</b>	31.84	0.50	1.02	10.78	1.91	44.74	<b>0.60</b>	100
	belite	<b>6.87</b>	28.80	0.89	1.08	10.47	1.01	50.44	<b>0.60</b>	100
	aluminite	<b>4.79</b>	33.80	6.63	9.42	6.51	1.88	36.28	<b>0.70</b>	100
0.50	alite	<b>6.46</b>	38.45	1.21	2.18	8.46	2.19	40.55	<b>0.59</b>	100
	belite	<b>5.30</b>	36.93	0.68	1.29	11.31	0.92	42.89	<b>0.68</b>	100
	aluminite	<b>4.31</b>	35.40	0.70	0.81	10.09	2.51	45.55	<b>0.63</b>	100
1.00	alite	<b>6.88</b>	39.95	1.15	1.71	9.73	1.29	38.47	<b>0.82</b>	100
	belite	<b>6.11</b>	39.44	1.08	0.95	10.42	1.69	39.59	<b>0.72</b>	100
	aluminite	<b>4.82</b>	43.14	2.52	5.97	4.09	5.01	33.84	<b>0.62</b>	100