สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1.) เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด
2.) เครื่องแก้วสำหรับวัดตวง
3.) ไมโครปิเปต
4.) ครกบดตัวอย่าง
5.) เตาอบวัสดุ
6.) ครกอะเกต
7.) เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
8.) เครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester)
9.) ขวดพลาสติกสำหรับบรรจุตัวอย่าง
10.) หลอดพลาสติกสำหรับ Centrifuge
11.) เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometer)
12.) เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscope)
13.) กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด, SEM (Scanning Electron Microscope)
14.) เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโตรมิเตอร์, XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer)
15.) เครื่อง AAs (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer)
16.) เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)

3.1.2 สารเคมี

1.) โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr)
2.) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
3.) กรดไนตริก (HNO_3)
4.) กรดบอริก (H_3BO_3)
5.) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)

6.) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

7.) สารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มก./ล. ของโลหะหนัก 18 ชนิด คือ Ag As Ba Be Cd Co Cr Cu Ga Hg Mn Ni Pb Se Sr Tl V และ Zn

8.) กรดไฮโดรเจนเปอร์คลอไรด์ ($HClO_4$)

9.) แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$)

10.) โซเดียมอะซิเตต (NaOAc)

11.) ไฮดรอกซีลามีน ไฮโดรคลอไรด์ ($NH_2.OH.HCl$)

12.) กรดอะซิติก (HOAc)

13.) แอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc)

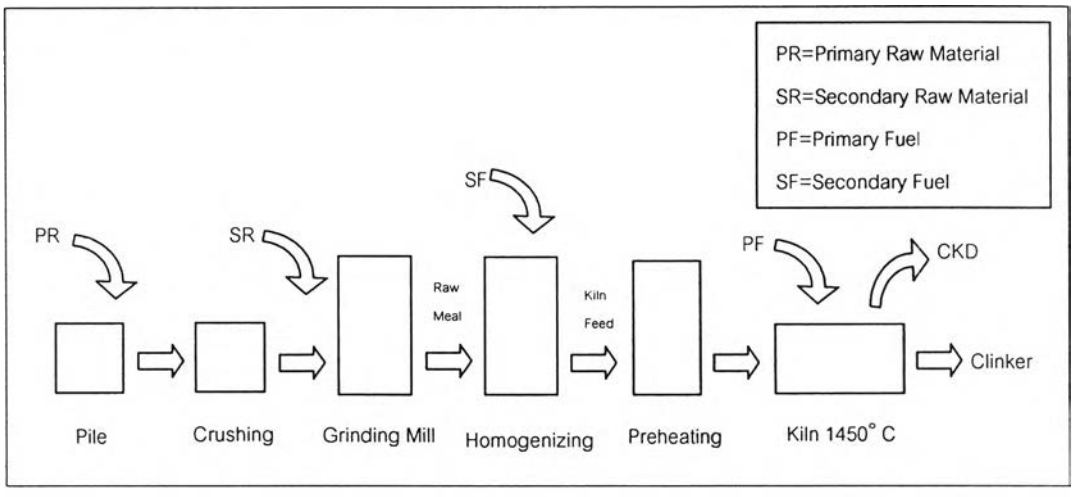
14.) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 ข้อมูลกระบวนการผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

จากการสอบถามข้อมูลจากทางบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่จังหวัดสระบุรี เชื้อเพลิงทดแทนที่เข้ามาส่วนใหญ่มักเป็นกากของเสียในรูปของแข็ง เช่น กากข้าวโพดและแกลบ มีปริมาณประมาณ 10-20 ตันต่อวัน ส่วนเชื้อเพลิงหลักซึ่งคือถ่านหินและลิกไนต์มีปริมาณประมาณ 1,000 ตันต่อวัน

สำหรับวัตถุดิบ เชื้อเพลิง ทั้งประเภทหลักและทดแทนมีการป้อนเข้าสู่กระบวนการในสามจุดด้วยกัน จุดแรกคือกองวัตถุดิบก่อนการย่อยขนาดเป็นชิ้นเล็กๆ (Pile) จะมีการเติมวัตถุดิบหลักในจุดนี้ จุดที่สองคือขั้นก่อนการบดละเอียดเป็นผงฝุ่นในหม้อบดขนาดใหญ่ (Grinding Mill) จะมีการเติมวัตถุดิบทดแทน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา เถ้าลอยและเถ้าหนักในจุดนี้ และจุดที่สามคือขั้นการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันในไซโลผสมวัตถุดิบ (Homogenizing Silo) จะมีการเติมเชื้อเพลิงทดแทนในจุดนี้ ส่วนเชื้อเพลิงหลักมีการเติมโดยตรงเข้าสู่เตาเผาปูนซีเมนต์ ซึ่งทางฝ่ายตรวจสอบคุณภาพหรือ QA ของทางบริษัทจะมีการสุ่มตรวจตัวอย่างชั่วโมงละ 1 ครั้งบริเวณจุดต่างๆของกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบให้ได้ตามมาตรฐาน ลักษณะการป้อนวัตถุดิบ เชื้อเพลิง ทั้งประเภทหลักและทดแทนสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รายละเอียดจุดที่มีการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลัก (Primary) และทดแทน (Secondary) เข้าสู่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

3.2.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยจะทำการเก็บตัวอย่างทั้งหมดครอบคลุมส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตจริงในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ (โรงงานที่ 2) ที่มีการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนร่วมกับวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลักในกระบวนการ

ในการเก็บตัวอย่างมีวิธีการเก็บเป็นแบบแบตช์ (Batch) จำนวน 3 ครั้งต่ออาทิตย์ จำนวนครั้งหรือตัวอย่างที่ต้องการคือ 30 กะ (1 กะ คือ 1 วัน) ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างเริ่มตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 ถึง กุมภาพันธ์ 2548 ในการเก็บตัวอย่างของปูนเม็ดจะเก็บจากส่วนที่ยังไม่มีการผสมยิปซัม ปริมาณที่ต้องการเก็บตัวอย่างคือ 7 กิโลกรัม ส่วนฝุ่นปูนจะทำการเก็บตัวอย่างจากเครื่องกำจัดฝุ่นละออง (Electrostatic Precipitators: EP) ปริมาณที่ต้องการเก็บตัวอย่างคือ 2 กิโลกรัม

สำหรับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย ฝุ่นปูน ปูนเม็ด ส่วนผสมของกากอาหารสัตว์ หินปูน (Limestone) เถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าหนัก (Bottom Ash) เชื้อเพลิงหลักในการเผา (Main Burner) หินเชลอะลูมินาสูง (Shale Mix) หินเชลซิลิกาสูง (Shale Core) หินดินดานหรือแร่เหล็ก (Iron-Ore) Kiln-Feed และคะตะลิสต์ (Catalyst) ซึ่งแต่ละตัวมีความหมายและแยกเป็นประเภทได้ดังนี้

1.) วัตถุดิบหลัก ได้แก่ หินปูน แร่เหล็ก หินเชลอะลูมินาสูง และหินเชลซิลิกาสูง

2.) วัตถุดิบทดแทน ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าหนัก และคะตะลิสต์ ซึ่งต่างเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมที่ใช้ร่วมในการผลิต

3.) ส่วนผสมที่ผ่านการผสมเป็นเนื้อเดียวกันก่อนเข้าสู่เตาเผาซีเมนต์ ได้แก่ Kiln Feed

4.) เชื้อเพลิงหลัก ได้แก่ Main Burner (ส่วนผสมของลิกไนต์ บิทูมินัส และถ่านหิน) ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้ในเตาเผา

5.) เชื้อเพลิงทดแทน ได้แก่ กากลิกไนต์ และส่วนผสมของกากอาหารสัตว์ ได้แก่ กากผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ กากข้าวโพด แกลบ และเศษถุงผลิตภัณฑ์(บรรจุอาหารสัตว์)

6.) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาซีเมนต์ ได้แก่ ฝุ่นปูน และปูนเม็ด

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน คือ

1.) การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจากส่วนต่างๆ ของกระบวน การผลิตปูนซีเมนต์

1.1) ตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP

2.) การศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพ

2.1) ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM

3.) การศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางเคมี

3.1) ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD

3.2) ตรวจวัดด้วยเครื่อง FTIR

3.3) ตรวจวัดด้วยวิธี Sequential Extraction

4.) การศึกษาสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ และการศึกษาหาความสัมพันธ์ของชนิด ที่มา และปริมาณของโลหะหนักด้วยโปรแกรมทางสถิติ SPSS

3.4 การดำเนินการวิจัย

3.4.1 **การศึกษาที่** 1 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจากส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

นำตัวอย่างของวัตถุดิบ เชื้อเพลิงทั้งชนิดหลักและทดแทน จากหัวข้อที่ 3.2.2 รวมทั้งผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตซีเมนต์ คือ ปูนเม็ดและฝุ่นปูน มาทำการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยใช้วิธีมาตรฐานที่ 3052 ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency: US EPA) เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างดังกล่าวด้วยเครื่อง ICP

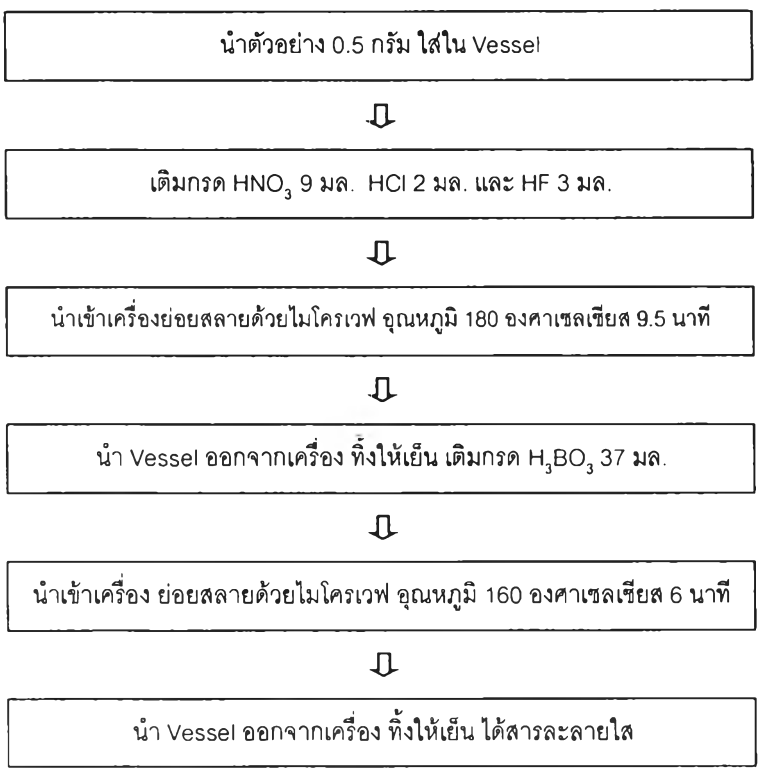
ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ สรุปดังรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.) นำตัวอย่างที่ต้องการย่อยสลายปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงใน Vessel

2.) เติมกรดไนตริก 9 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก 2 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรฟลูออริก 3 มิลลิลิตร ลงใน Vessel ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ กำหนดอุณหภูมิที่ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลาย่อยสลาย 9.5 นาที

3.) นำ Vessel ออกจากเครื่อง ทิ้งให้เย็นตัวลง จากนั้นเติมกรดบอริก 37 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟอีกครั้ง กำหนดอุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส ระยะเวลาย่อยสลาย 6 นาที

4.) นำ Vessel ออกจากเครื่อง ทิ้งให้เย็นลง จากนั้นนำสารละลายใสที่ได้มาปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI (Deionized Water) และใส่ในขวดพลาสติกที่เตรียมไว้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ต่อไป สำหรับชนิดของโลหะหนักที่สนใจมีทั้งหมด 18 ชนิด ประกอบด้วย Ag As Ba Be Cd Co Cr Cu Ga Hg Mn Ni Pb Se Sr Tl V และ Zn



รูปที่ 3.2 ผังแสดงขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ ตามวิธีมาตรฐาน 3052 ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US EPA)

3.4.2 **การศึกษาที่** 2 การศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพ

นำตัวอย่างของปูนเม็ด และฝุ่นปูนที่มาจากกระบวนการผลิตซีเมนต์ ใช้ปริมาณตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิกรัมบดให้ละเอียดและนำมาวิเคราะห์สถานภาพของโลหะหนัก โดยมีอุปกรณ์ดังนี้

1.) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM-6400 Scanning Electron Microscope: SEM) สำหรับตรวจสอบลักษณะการจับตัวกันและการกระจายตัวของโลหะหนักในซีเมนต์ในระดับ Microstructure โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะถูกยึดติดในแท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกเล็กๆ และฉาบผิวด้วยโลหะผสมระหว่างทองกับแพลเลเดียม (Gold-Palladium Alloy)

3.4.3 **การศึกษาที่** 3 การศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางเคมี

นำส่วนของปูนเม็ด และฝุ่นปูนที่มาจากกระบวนการผลิตซีเมนต์ บดให้ละเอียดและนำมาวิเคราะห์สถานภาพของโลหะหนัก โดยมีเครื่องมือวัดดังนี้

1.) เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscope) สำหรับวัดชนิดสารประกอบโลหะหนักที่มีพันธะกันหรือ Functional Group โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง 0.005 กรัม และใช้ปริมาณของโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) 0.250 กรัม กำหนดความถี่ 200 ครั้งต่อการวัด 1 ครั้ง สิ่งที่ได้จากการวัดคือ กราฟความถี่ของสารประกอบต่างๆ นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี เพื่อทราบชนิดของสารประกอบที่อยู่ในตัวอย่าง

2.) เครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) สำหรับวัดชนิดสารประกอบโลหะหนักที่มีลักษณะเป็นผลึก โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง 5 กรัม สิ่งที่ได้จากการวัดคือ กราฟความถี่ของสารประกอบต่างๆ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2θ (Degrees) และ Relative Intensity นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี ซึ่งทำให้สามารถระบุสารประกอบโลหะแต่ละชนิดได้

3.) วิธีการสกัดแยกองค์ประกอบทางเคมี หรือ Sequential Extraction สำหรับวัดชนิดสารประกอบโลหะหนัก โดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบโลหะซึ่งละลายได้ในน้ำสกัดที่ต่างชนิดกัน เป็นการเพิ่มความชัดเจนของสารประกอบที่ต้องการศึกษาและสามารถบอกได้ถึงในเชิงปริมาณ ในการศึกษานี้จะใช้วิธีสกัดตามแบบของ Tessier และคณะ (1979) (อ้างถึงใน Li, 2001) โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 การสกัดด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ สำหรับพันธะโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย ตัวอย่างจะถูกสกัดด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) 0.2 โมลาร์ ที่พีเอช 7 โดยใช้อัตราส่วนตัวอย่าง (ซนิดผง) ต่อน้ำสกัดเป็น 1 ต่อ 8 นำไปเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุน (Agitator) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

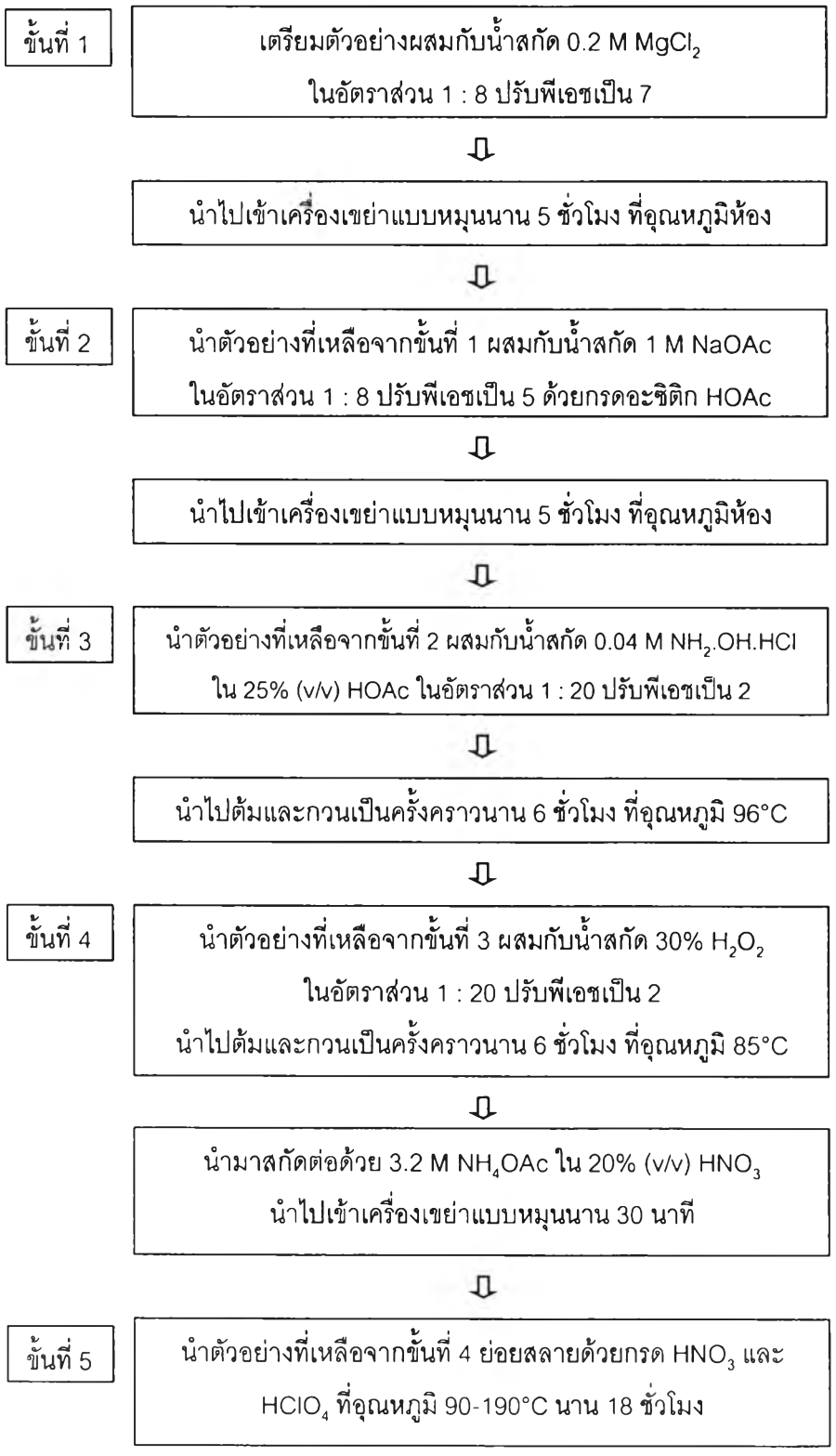
ขั้นที่ 2 การสกัดด้วยโซเดียมอะซิเตต สำหรับโลหะที่มีพันธะคาร์บอเนต นำตัวอย่างที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาสกัดด้วยโซเดียมอะซิเตต (NaOAc) 1 โมลาร์ ปรับพีเอชเป็น 5 ด้วยกรดอะซิติก HOAc ใช้อัตราส่วนตัวอย่างต่อน้ำสกัดเป็น 1 ต่อ 8 นำไปเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

ขั้นที่ 3 การสกัดด้วยไฮดรอกซีลามีน ไฮโดรคลอไรด์ สำหรับโลหะที่มีพันธะเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ นำตัวอย่างที่เหลือจากขั้นที่ 2 มาสกัดด้วยไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($NH_2.OH.HCl$) 0.04 โมลาร์ในกรดอะซิติก (HOAc) 25% โดยปริมาตร ให้พีเอชเริ่มต้นที่ 2 และอัตราส่วนตัวอย่างต่อน้ำสกัดเป็น 1 ต่อ 20 นำไปต้มและกวนเป็นครั้งคราวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 96°C

ขั้นที่ 4 การสกัดด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต สำหรับโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ นำตัวอย่างที่เหลือจากขั้นที่ 3 มาสกัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% ให้พีเอชเริ่มต้นที่ 2 และอัตราส่วนตัวอย่างต่อน้ำสกัดเป็น 1 ต่อ 20 นำไปต้มและกวนเป็นครั้งคราวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85°C จากนั้นสกัดด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) 3.2 โมลาร์ในกรดไนตริก 20%โดยปริมาตร และนำไปเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 30 นาที

ขั้นที่ 5 การสกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก นำตัวอย่างที่เหลือจากขั้นที่ 4 ไปย่อยสลายด้วยกรดไนตริกและกรดไฮโดรเจนเปอร์คลอไรด์ ($HClO_4$) ที่อุณหภูมิ 90-190°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

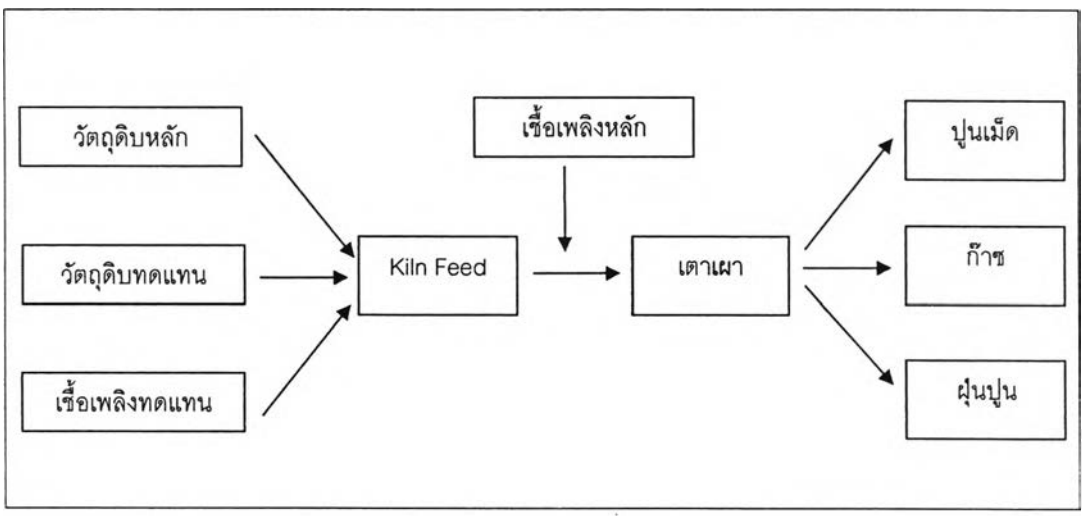
หลักการของการวิเคราะห์ด้วยวิธี Sequential Extraction คือการใช้สารสกัดซึ่งเป็นสารเคมีหลายชนิดในการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ละลายอยู่ในตัวอย่างตามแต่ละขั้นของการสกัด สิ่งที่ควรทราบโดยทั่วไปคือในโลหะซนิดต่างๆ ที่ผ่านขั้นต่างๆ ของการสกัดแยกวิธีนี้ มักหมายถึงผลที่มาจากปัจจัยของการทดลองหลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบทางเคมีของระบบตัวอย่างนั้น (Usero และคณะ, 1998 อ้างถึงใน Li, 2001) เมื่อสิ้นสุดการสกัดแยกในทุกขั้นตอน นำน้ำที่ได้จากการสกัดแต่ละขั้นวัดค่า pH และวิเคราะห์หาสารประกอบของโลหะหนัก แผนผังขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผังแสดงขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction

3.4.4 **การศึกษาที่** 4 การศึกษาสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์และการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาที่ 1 และข้อมูลสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ทั้งลักษณะทางกายภาพและทางเคมีทั้งหมด มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลการผลิตเดิมของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด เพื่อเป็นการตรวจสอบที่มาของโลหะหนักที่ปรากฏอยู่ในซีเมนต์ก่อนที่จะมีการผสมน้ำ หรือปฏิกิริยาไฮเดรชัน สิ่งที่จะได้จากการศึกษานี้ คือผังสมดุลมวลเข้าและออก ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผังการศึกษาสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์

ส่วนในสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของวัตถุที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ โปรแกรมที่ใช้ช่วยในการวิเคราะห์คือ โปรแกรมทางสถิติ SPSS (Statistical Package for Social Science) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่สามารถสร้างแฟ้มข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแสดงผลลัพธ์ในรูปตาราง ข้อความ และกราฟ สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในการศึกษานี้ได้แก่ การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่าสองตัวขึ้นไป

สำหรับตัวแปรอิสระ n ตัว ($X_1, X_2, \ldots, X_n$) ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y โดยที่ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น (ให้ตัวแปร Y และ X ทุกตัวเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ) จะได้สมการถดถอยเชิงพหุดังนี้

$$Y = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + \ldots + C_nX_n$$

เพื่อให้สัมพันธ์กับการศึกษาในครั้งนี้

กรณีปูนเม็ดและฝุ่นปูนให้ Y แทนมวลโลหะหนักแต่ละชนิดที่ออกจากระบบ ($W_{Cement} \times M_{jCement}$)

X แทนมวลโลหะหนักแต่ละชนิดที่เข้าระบบ ($W_i \times M_{ij}$)

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาที่ 1 ถึงการศึกษาที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลของชนิดที่วัตถุที่เข้าและออกจากระบบการผลิต และปริมาณความเข้มข้นของโลหะในแต่ละส่วนของการผลิต สามารถใช้ป้อนโปรแกรมทางสถิติ เพื่อวิเคราะห์หาที่มา และปริมาณของโลหะหนักในกระบวนการผลิตซีเมนต์ทั้งระบบ โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการดังต่อไปนี้

กรณีปูนเม็ดและฝุ่นปูน $\sum_{i=1}^{n} C_{ijCement}(W_i \times M_{ij}) = W_{Cement} \times M_{jCement}$

กรณีก๊าซ $\sum_{i=1}^{n} C_{ijGas}(W_i \times M_{ij}) = W_{Gas} \times M_{jGas}$

โดย W_i คือ ปริมาณของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (i) ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (กก.)

M_{ij} คือ ความเข้มข้นของโลหะหนัก (j) ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (i) (มก./กก.)

n คือ จำนวนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทน (ชนิด)

$C_{ijCement}$ คือ Partitioning Coefficient ของโลหะหนัก (j) จากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (i) ที่ไปสู่ปูนเม็ดและฝุ่นปูน

C_{ijGas} คือ Partitioning Coefficient ของโลหะหนัก (j) จากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (i) ที่ไปสู่ก๊าซ

W_{Cement} คือ ปริมาณการผลิตปูนเม็ดและฝุ่นปูนของระบบ (กก.)

W_{Gas} คือ ปริมาณการผลิตก๊าซของระบบ (กก.)

$M_{jCement}$ คือ ความเข้มข้นของโลหะหนัก (j) ในปูนเม็ดและฝุ่นปูน (มก./กก.)

M_{jGas} คือ ความเข้มข้นของโลหะหนัก (j) ในก๊าซ (มก./กก.)