บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงพฤติกรรม และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ซึ่งจะเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพื่อให้การวิจัยนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งเอาไว้ จึงได้กำหนดขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

- ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง อันได้แก่กากแร่สังกะสี (Zinc residue) และปูนขาว (Lime)
- ศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว โดยกำหนดให้ปริมาณปูนขาว ระยะเวลาในการบ่ม อุณหภูมิขณะทำการบ่มเป็นตัวแปรสำหรับการศึกษา

3.1 การศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ วัตถุดิบได้แก่ กากแร่สังกะสีและวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพกากแร่สังกะสี ได้แก่ปูนขาว

3.1.1 กากแร่สังกะสี (Zinc residue) เป็นวัตถุดิบที่เก็บจากสายพานที่เป็นผ้ากรองน้ำแร่ (Belf filter) ก่อนจะส่งไปยังบ่อเก็บกากแร่ (Residue pond) ของโรงงานบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด จ.ตาก โดยการบรรจุในถังขนาด 200 ลิตร ปริมาณของกากแร่สังกะสีที่ได้จัดส่งมาประมาณ 2,400 กิโลกรัม ซึ่งกากแร่สังกะสีนี้จะมีความชื้นอยู่ระหว่าง 80% - 90% โดยน้ำหนักในการเตรียมเพื่อใช้ในการทดสอบจะนำกากแร่สังกะสีที่มีความชื้นสูงไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 80 °ซ แล้วบดให้ร่วนด้วยฆ้อนยาง จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงมุ้งลวดดังมีรายละเอียดการศึกษาสมบัติดังนี้

ก. การศึกษาสมบัติพื้นฐานทางด้านวิศวกรรม ประกอบด้วยสมบัติทางด้านพลาสติก ค่าความถ่วงจำเพาะ การกระจายขนาดคละ ความหนาแน่นแห้งภายหลังการบดอัด และค่ากำลังรับแรงอัด

ข. การศึกษาสมบัติทางด้านแร่ เพื่อพิจารณาส่วนประกอบแร่ในกากแร่สังกะสีโดยใช้วิธี X-ray diffraction analysis, Scanning Electron Microscope (SEM)

และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)

X-ray Diffraction Analysis

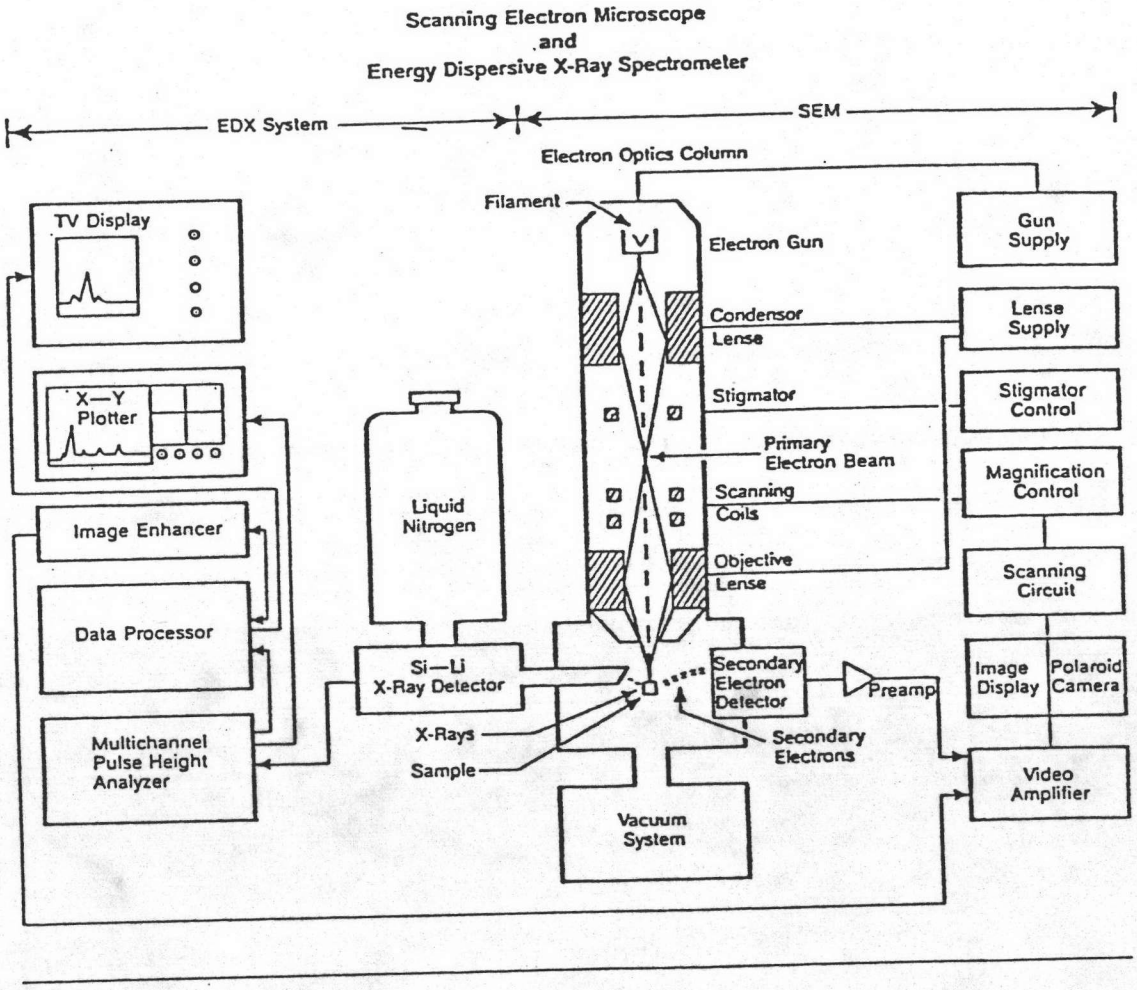
X-ray diffraction analysis เป็นวิธีการหนึ่งที่ทดลองเพื่อวิเคราะห์หาส่วนประกอบด้านแร่ของกากแร่สังกะสีที่ใช้เป็นวัตถุดิบและยังใช้หาสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมกากแร่สังกะสีด้วยปูนขาวที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กัน รายละเอียดเกี่ยวกับหลักการวิเคราะห์โดยวิธี X-ray diffraction นี้ได้สรุปไว้ในภาคผนวก สำหรับในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะขั้นตอนและวิธีการทดลองในการวิเคราะห์หาส่วนประกอบด้านแร่ของกากแร่สังกะสีที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

การวิเคราะห์โดยวิธี X-ray diffraction จะทำได้ก็เฉพาะสารประกอบที่มีส่วนประกอบของแร่ที่เป็นผลึกเท่านั้น เนื่องจากส่วนประกอบของกากแร่สังกะสีมีสารประกอบรวมกันหลาย ๆ ประเภท ดังนั้นการทดสอบโดยไม่เตรียมตัวอย่างก่อนอาจจะทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไม่ชัดเจน เช่นอาจเกิดการรวมตัวเป็นก้อน ในการทดสอบนี้จึงได้เตรียมตัวเพื่อทดสอบ X-ray diffraction ด้วยวิธี Random powder sample เท่านั้น ทั้งนี้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 ม.ม. มีน้อยมาก จึงมิได้เตรียมตัวอย่างแบบ Oriented aggregate sample การเตรียมตัวอย่างแบบ Random powder sample ทำได้โดยการนำกากแร่สังกะสีมาบดให้ละเอียด แล้วนำเอากากแร่สังกะสีส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มาใช้ในการวิเคราะห์โดยอัดใส่ Sample holder ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นกรอบพลาสติก

Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning electron microscope มักจะใช้วิเคราะห์ร่วมกับการทำ Energy dispersive X-ray spectrometer (EDX) เป็นส่วนใหญ่ การวิเคราะห์ SEM เป็นเครื่องมือที่มีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10 เท่าถึง 20,000 เท่า รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังการทำงานของ SEM กับ EDX

Scanning electron microscope คือการที่ยิงลำแสงอีเลคตรอนลงบนตำแหน่งที่ต้องการจะศึกษาโดยตัวอย่างที่ทำการทดสอบจะต้องนำไฟฟ้าได้ถ้าไม่สามารถนำได้จำเป็นจะต้องมีการฉาบด้วยสื่อที่นำไฟฟ้าบนผิวของตัวอย่าง การนำไฟฟ้าก็เพื่อให้ตัวอย่างปล่อยอีเลคตรอนออกมา ซึ่งอีเลคตรอนเหล่านี้จะแปลงเป็นภาพที่ขยาย แร่หรือสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปร่างของผลึกแตกต่างกันออกไป และเพื่อช่วยในการพิจารณามักจะทดสอบ EDX ด้วย จากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผังการทำงานของระบบ SEM และ EDX

จะเห็นว่าในการวิเคราะห์ด้วย SEM ก็สามารถที่จะวิเคราะห์ด้วย EDX ควบคู่ไปด้วย EDX อาศัยหลักการที่ว่าธาตุแต่ละธาตุ จะมีสมบัติในการให้รังสีแตกต่างกันซึ่งเป็นคุณสมบัติของแต่ละธาตุ โดยจะวัดในรูปของพลังงาน ตัวอย่างเช่นถ้าตัวอย่างที่ทดสอบ SEM ได้รูปร่างของโครงสร้างผลึกเป็น Hexagonal และผลจากการทดสอบ EDX พบว่ามีซิลิก้าแล้ว แสดงว่าพบพวก Quartz (SiO_2) ในตัวอย่าง

รูปที่ 3.2 แสดงวิธีการใช้Energy Dispersive X-ray Spectrometer วิเคราะห์ร่วมกับ Scanning electron microscope

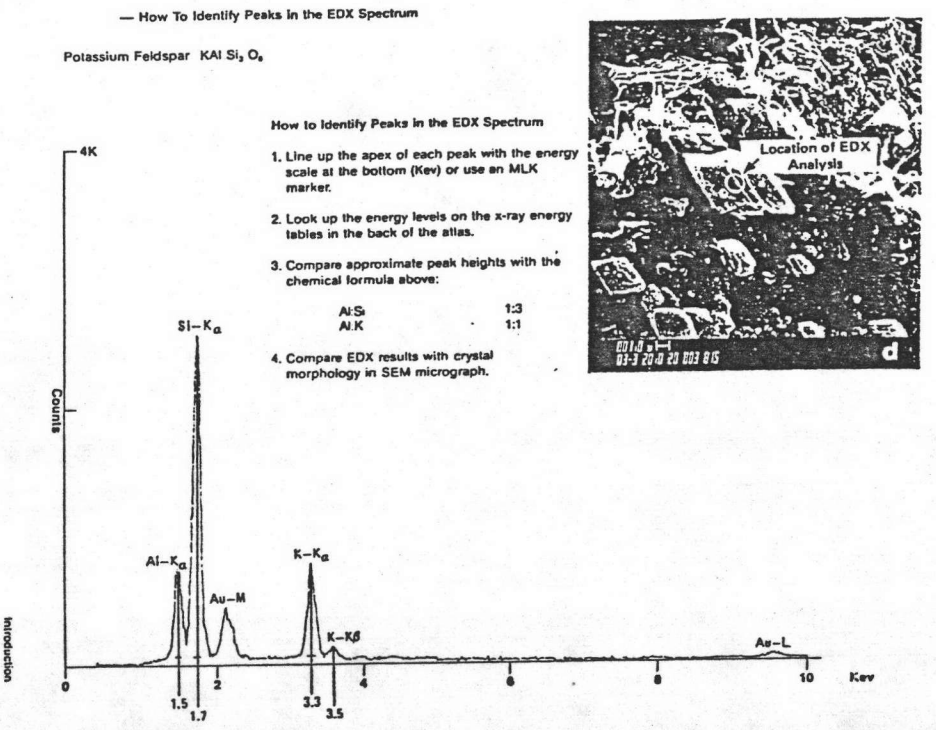
ค. การศึกษาสมบัติทางด้านเคมีเพื่อพิจารณาสมบัติทางด้านเคมี และองค์ประกอบทางเคมีของกากแร่สังกะสี

3.1.2 ปูนขาว

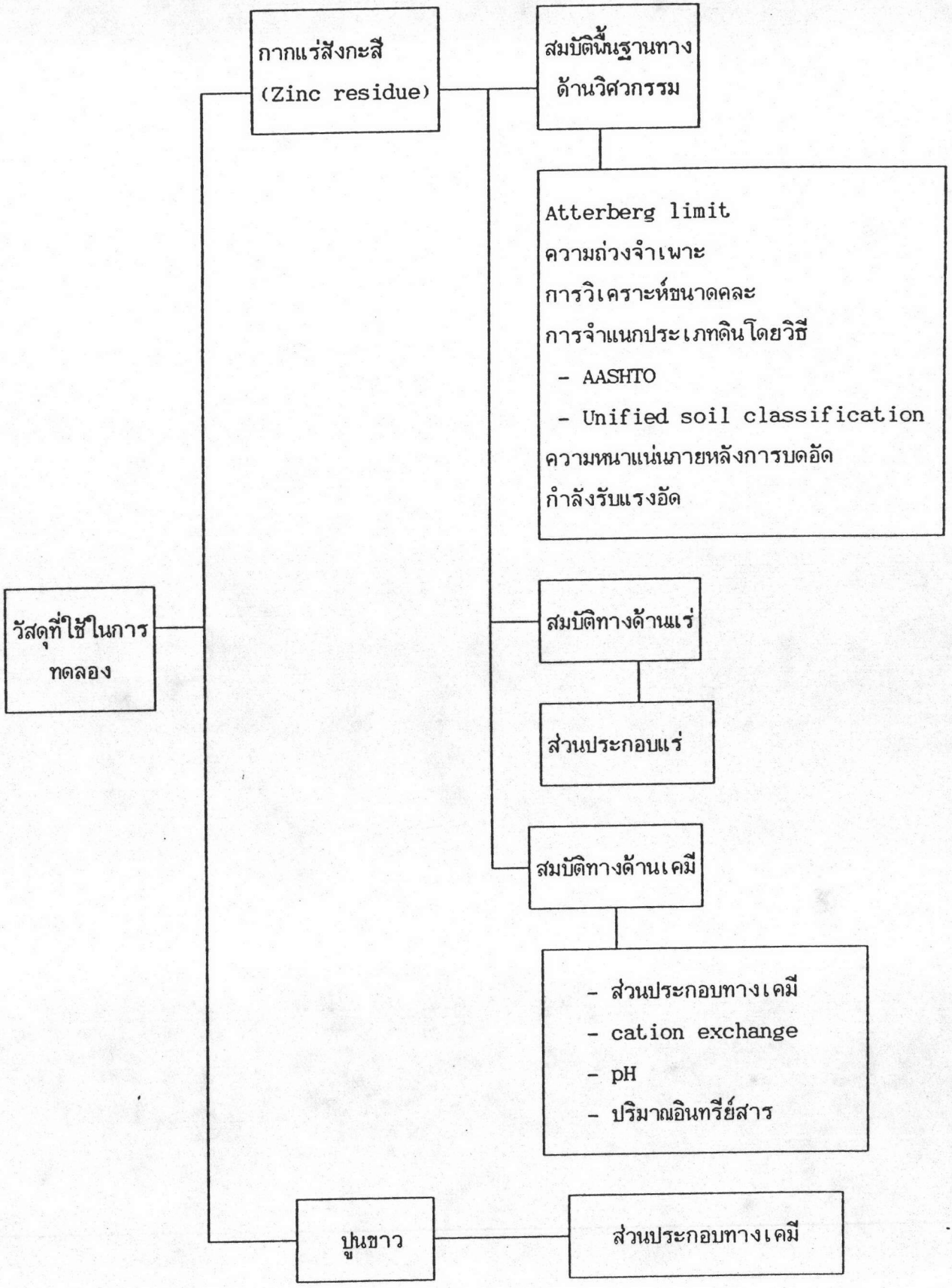
จากการศึกษาในอดีตพบว่าชนิดของปูนขาวมีผลต่อปฏิกิริยา pozzolanic อย่างมาก แต่งานวิจัยนี้มิได้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมอันเนื่องจากชนิดของปูนขาว เพียงแต่ศึกษาถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของกากแร่สังกะสีเมื่อผสมด้วยปูนขาว ปูนขาวที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ จะกำหนดใช้ปูนขาวที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด จังหวัดตาก

ปูนขาวที่ใช้ในการทดลองนี้ได้เก็บไว้ในถังพลาสติกที่มีฝาปิดเป็นแบบเป็นเกลียว เพื่อป้องกันปูนขาวที่ทำปฏิกิริยากับอากาศที่อาจเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น (Carbonation)

รูปที่ 3.3 แสดงแผนภูมิการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ กากแร่สังกะสี และปูนขาว



รูปที่ 3.2 แสดงการวิเคราะห์ส่วนประกอบแร่ด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM) ร่วมกับวิธี Energy dispersive X-ray Spectrometer



รูปที่ 3.3 แผนภูมิการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.2 การศึกษาสมบัติของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

รูปที่ 3.4 แสดงแผนภูมิการศึกษาสมบัติของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

ผสมกากแร่สังกะสีกับปูนขาว ที่ปริมาณต่าง ๆ โดยน้ำหนัก และทำการทดลองเพื่อหาความหนาแน่นภายหลังการบดอัดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 698 โดยการแปรเปลี่ยนปริมาณความชื้นในส่วนผสมจะทำให้ทราบถึงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) ของส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ จากนั้นจะเตรียมตัวอย่างส่วนผสมที่ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เพื่อหาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่จะใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพทั้งในกรณี Engineering Approach และ Solidification Approach

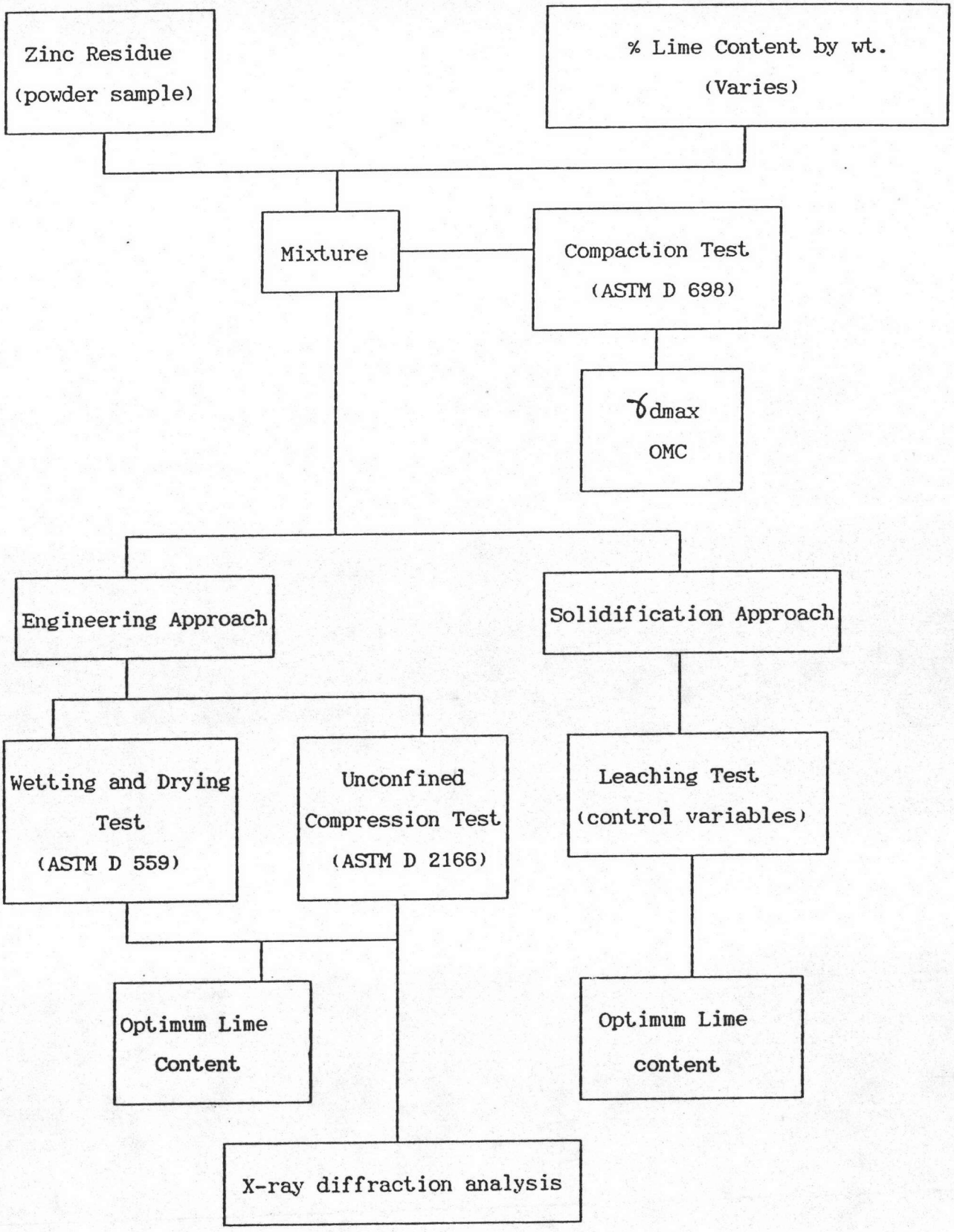
ในกรณีของ Engineering approach จะทำการทดสอบค่าความคงทนของก้อนตัวอย่างโดยการทดลอง Wetting & Drying ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 559 และค่ากำลังรับแรงอัดโดยยึดถือวิธีมาตรฐาน ASTM D2166 เป็นแนวทางในการทดสอบตัวอย่างของส่วนผสม

ภายหลังการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดจะนำไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบแร่ (สารประกอบ) โดยวิธี X-ray diffraction เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในของส่วนผสมในกรณีที่ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบเปลี่ยนไป ผลที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ นอกจากจะทราบถึงปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมแล้ว ยังจะทราบถึงขั้นตอนการพัฒนากำลังของส่วนผสมด้วย

ในกรณีของ Solidification approach จะทำการทดสอบก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่ได้รับการบดอัดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 698 ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดโดยชะละลายก้อนตัวอย่างภายใต้การควบคุมตัวแปรต่าง ๆ การพิจารณาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมในกรณีนี้ นอกจากจะพิจารณาผลจากการทดสอบการชะละลายแล้ว จะคำนึงถึงขั้นตอนการพัฒนากำลังของส่วนผสม ซึ่งทราบจากการศึกษาในกรณีแรกประกอบด้วย

3.2.1 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

การทดสอบได้กระทำตามมาตรฐาน ASTM D 698:Moisture density relations of soils and soil-aggregate mixtures use 5.5 lb (2.49 kg) rammer and 12 in (305 mm.) drop. หรือที่เรียกว่า Standard proctor compaction



รูปที่ 3.4 แผนภูมิการศึกษาสมบัติของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

โดยใช้แบบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว ส่วนสูง 4.59 นิ้ว ทำการบดอัดเป็น 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะใช้ฆ้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนัก 5.5 ปอนด์ ยกสูง 12 นิ้ว ทำการบดอัดเป็นจำนวน 25 ครั้ง

อัตราส่วนผสมของปูนขาวที่ใช้คือ 0,1,2,3,4,6,8,10 และ 12 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก การเตรียมตัวอย่างก็ทำโดยการผสมกากแร่สังกะสีกับปูนขาวให้เข้ากันดีจากนั้น จึงผสมน้ำเข้าไปเล็กน้อย โดยใช้กระบอกฉีดน้ำเพื่อให้น้ำเป็นละออง จะได้ผสมเข้ากันอย่างทั่วถึง แล้วเก็บใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงให้สนิท เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาของปูนขาวกับอากาศแล้วเก็บเอาไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้กากแร่สังกะสีกับปูนขาวได้ทำปฏิกิริยากันจึงค่อยนำมาทำการทดลอง การทดลองจะค่อย ๆ เพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปจนถึงปริมาณน้ำปริมาณหนึ่งที่ทำให้หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ของส่วนผสมที่ทำการบดอัดลดลงหรือไม่เพิ่มขึ้นมาก จึงหยุดทำการทดลองสำหรับผลของการทดลองนี้จะแสดงในรูปของ Compaction Curve โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งของก้อนตัวอย่างภายหลังการบดอัดและปริมาณความชื้น ซึ่งจะทำให้ทราบถึงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density หรือ γ_{dmax}) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content หรือ OMC) ของก้อนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

3.2.2 <u>การทดสอบกำลังรับแรงอัด</u>

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนด Unconfined Compressive Strength เป็นค่ากำลังรับแรงอัดโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2166 : Test method for unconfined compressive strength of cohesive soil ยกเว้นการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบได้ใช้ตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 698 ซึ่งจะมีรูปร่างทรงกระบอกโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 ม.ม.และส่วนสูงประมาณ 116.6 ม.ม.ขนาดของก้อนตัวอย่างดังกล่าวจะไม่เป็นไปตามมาตรฐาน กล่าวคืออัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่าประมาณ 1.15 เท่า เท่านั้น ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์สูงเมื่อเทียบกับการเตรียมตัวอย่างตามมาตรฐาน อย่างไรก็ตามจุดประสงค์ของการทดสอบนี้ เพื่อที่จะใช้ค่ากำลังรับแรงอัดดังกล่าว เป็นเพียงดัชนีเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างต่อตัวอย่างเท่านั้น

ตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบหาค่าunconfined compressive strength ได้จากการอัดส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว อัตราส่วนต่าง ๆ ลงในแบบดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น โดยให้มีความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นเท่ากับความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่พอเหมาะ (Optimum moisture content) ที่ได้มาจากการทดสอบการบดอัดส่วนผสมกาก

แร่สังกะสี-ปูนขาว ที่อัตราส่วนเดียวกันตามหัวข้อที่ 3.2.1

การเตรียมตัวอย่างทำโดยชั่งน้ำหนักกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ที่จะใช้ให้พอเหมาะแล้วผสมให้เข้ากันจึงค่อยเติมน้ำให้เท่ากับความชื้นที่พอเหมาะโดยใช้กระบอกตวง แล้วทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันจนส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวมีเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงตักใส่แบบที่เตรียมไว้ และบดอัดตามวิธีตามมาตรฐาน ASTM D 698 (ตามหัวข้อ 3.2.1) สำหรับการเอาส่วนผสมออกจากแบบทำโดยใช้ hydraulic jack ค่อย ๆ ดันออกมาก เมื่อได้ส่วนผสมเรียบร้อยแล้วจะนำเอาส่วนผสมนี้ไปชั่งน้ำหนัก และใส่ในถุงพลาสติก โดยที่ปากถุงพลาสติกจะเปิดออก เพื่อที่จะบ่มตัวอย่างในอากาศ (Air dry) เช่นเดียวกันกับในสภาพที่เป็นจริงของกากแร่สังกะสีที่เก็บไว้ในบ่อเปิดที่มีอากาศถ่ายเท นำส่วนผสมที่เตรียมเสร็จแล้วนี้เก็บไว้ในกะบะซึ่งมีน้ำอยู่ข้างล่างเพื่อทำให้ความชื้นในกะบะสูงกว่าในส่วนผสมเป็นการป้องกัน การระเหยของน้ำในส่วนผสม

สำหรับส่วนผสมที่บ่มที่อุณหภูมิห้องจะบ่มในกะบะที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยระดับน้ำที่อยู่ในกะบะจะอยู่ใต้คานที่ตัวอย่างวางอยู่ เพื่อรักษาอุณหภูมิรอบตัวอย่างให้คงที่ ส่วนผสมที่บ่มที่อุณหภูมิอื่น จะบ่มในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิ โดยส่วนผสมที่บ่มไว้นี้จะหุ้มด้วยถุงพลาสติกที่ทนความร้อน เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในส่วนผสม

การทดลองค่ากำลังรับแรงอัด จะกระทำเมื่อส่วนผสมที่เตรียมเอาไว้นั้นบ่มที่ระยะเวลา 0,7,14,30,60,90, และ 180 วัน โดยใช้อัตราความเครียด 0.05 นิ้วต่อนาที

ขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้ ขั้นแรกนำตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในถุงพลาสติกปากเปิดไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นวัดขนาดของก้องตัวอย่าง โดยการวัดความสูงวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนผสมที่ระดับบน กลางและล่าง แล้วจึงนำไปทดสอบขั้นที่ 2 จะกดตัวอย่างส่วนผสมโดยเครื่อง Unconfined compression machine ด้วยอัตราความเครียดสม่ำเสมอประมาณ 0.05 นิ้วต่อนาที จนถึง จุดพิบัติแล้วบันทึก แรงกดสูงสุดและลักษณะของการพิบัติ ขั้นสุดท้ายจะนำส่วนผสมที่ทดลองเสร็จนี้ไปหาปริมาณความชื้น และจะแบ่งอีกส่วนหนึ่งไปทำการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของแร่โดยวิธี X-ray diffraction

เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีที่ได้กล่าวดังข้างต้น พบว่าการที่จะเตรียมตัวอย่างในชุดหนึ่ง ๆ ถ้าที่ระยะเวลาบ่มเวลาหนึ่งและอัตราส่วนผสมอันหนึ่ง การเตรียม

ใบหมายเลข 904

ตัวอย่างหลายก้อนจะไม่สะดวกและผิดพลาดได้มาก ดังนั้นในการเตรียมตัวอย่างในการวิจัยนี้จึงใช้เพียงตัวอย่างเดียวเป็นเกณฑ์

3.2.3 X-ray diffraction analysis

การวิเคราะห์หาส่วนประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นในส่วนผสมกากแร่สังกะสีปูนขาว ทำโดยใช้ส่วนผสมที่แบ่งมาจากส่วนผสมภายหลังจากการทดลอง Unconfined compression test เรียบร้อยแล้ว โดยนำส่วนผสมมาบดให้ละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จากนี้จึงนำมาทำการวิเคราะห์โดย X-ray diffraction โดยเตรียมตัวอย่างแบบ random powder รายละเอียดการทดสอบได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ก.

3.2.4 การทดสอบความคงทน

การทดสอบความคงทนของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสีปูนขาวได้กระทำการทดสอบด้วยขบวนการ Wetting & Drying ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D559 โดยการเตรียมตัวอย่างส่วนผสมที่บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ได้ทดสอบ หาค่ากำลังรับแรงอัด

ในการทดลอง จะนำก้อนตัวอย่างส่วนผสมที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน แล้ว ตามมาตรฐานไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 °ซ เป็นเวลา 42 ชั่วโมงแล้วนำก้อนตัวอย่างมาขัดด้วยแปรงลวดทองเหลืองรอบตัวอย่าง 2 รอบ การนำก้อนตัวอย่างไปแช่น้ำและอบให้แห้งดังกล่าว 1 ครั้ง ถือว่าเป็น 1 รอบ (Cycle) ซึ่งการทดสอบจะกระทำจนครบ 12 รอบแล้ว หาค่าน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่สูญเสียเมื่อเทียบกับก่อนเริ่มทำการทดสอบ

การเตรียมก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบความคงทน จะเริ่มที่ส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 12% แล้วก็ลดลงมาจนกระทั่งก้อนตัวอย่างวิบัติหรือเสียรูปในขณะที่ทำการทดสอบ

สำหรับการทดสอบความคงทนจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตร, การดูดซึมน้ำและน้ำหนักที่สูญเสียเป็นตัวบ่งชี้ถึงความคงทนของก้อนตัวอย่าง ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก้อนตัวอย่าง

ปริมาตรจริงของก้อนตัวอย่างไม่สามารถที่จะถูกวัดออกมาได้เพื่อความสะดวกจึงใช้ค่าเฉลี่ยความสูงของก้อนตัวอย่างเป็นตัวบ่งชี้แทนปริมาตร

$$\text{ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (\%)} = \frac{Ht - Hm}{Hm} * 100 \quad (\%)$$

Ht คือ ความสูงของก้อนตัวอย่างหลังจากการทดสอบ

Hm คือ ความสูงของก้อนตัวอย่างภายหลังการบดอัด

2. การดูดซึมน้ำ

เปอร์เซนต์ความชื้นที่ถูกดูดซึมในช่วงเวลาการทดสอบขบวนการเปียก (Wetting)

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ, \%} = \frac{Wt - Wm}{Ws} * 100 \quad (\%)$$

ที่ $$Ws = \frac{Wm}{1 + W/100}$$

W = ปริมาณความชื้นของก้อนตัวอย่าง

Wt คือน้ำหนักของก้อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบขบวนการเปียก (Wetting)

Wm คือน้ำหนักของก้อนตัวอย่างภายหลังการบดอัด

Ws คือน้ำหนักแห้งของก้อนตัวอย่าง

3. น้ำหนักที่สูญเสีย

ภายหลังจากก้อนตัวอย่างแช่น้ำแล้ว ให้ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างและทำการปรับแก้ปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในก้อนตัวอย่าง

$$\text{ค่าปรับแก้น้ำหนักแห้ง (Wsc)} = \frac{A}{B} * 100$$

ที่ A = น้ำหนักของก้อนตัวอย่างภายหลังการอบแห้งที่ 70 °ซ

B = เปอร์เซนต์ของน้ำที่คงเหลือในก้อนตัวอย่างบวกด้วย 100

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสีย, \%} = \frac{Ws - Wsc}{Ws} * 100 \quad (\%)$$

Ws คือน้ำหนักแห้งของก้อนตัวอย่างเริ่มต้น

3.2.5 การทดสอบการชะละลาย

การทดสอบการชะละลายของก้อนตัวอย่างส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ได้จากการจำลองแบบชะละลายโลหะหนักตามธรรมชาติ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการทดสอบการชะละลายนี้ได้สรุปไว้ในภาคผนวก ข. สำหรับในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ปริมาณปูนขาวที่จะพิจารณาในการศึกษาส่วนนี้จะเป็นปริมาณปูนขาวฝในกรณีของ Solidification approach ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2

การเตรียมตัวอย่างกระทำเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างที่ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดกล่าวคือบดอัดส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาวที่ปริมาณความชื้นเหมะสม (Optimum moisture content)

ในการทดลอง จะนำก้อนตัวอย่างใส่ในบีกเกอร์ ขนาด 5 ลิตรจากนั้นเติมน้ำลงไป 4,000 ลบ.ซ.ม. แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 70 °ซ และควบคุมอุณหภูมิไว้ ทำการกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อกวนจนครบเวลาจึงนำน้ำในภาชนะมาแยกสารแขวนลอย แล้วนำของเหลวที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักโดยส่งไปทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยวิธี ICP atomic emission spectroscopic method เครื่อง Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer model ICPS-50

ปริมาณปูนขาวเริ่มที่ 10% แล้วจึงค่อย ๆ ลดปริมาณปูนขาวลงจนกระทั่งการทดสอบการชะละลาย พบปริมาณโลหะหนักในของเหลวที่ทำการวิเคราะห์โลหะหนัก มีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม

3.2.6 CBR test

การทดสอบหาค่า California Bearing Ratio (CBR) ของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว ได้กระทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 1833 : Bearing ratio of

laboratory compacted soils ซึ่งเป็นวิธีการทดลองที่กำหนดขึ้นเป็นมาตรฐาน เพื่อหาค่าเปรียบเทียบ Bearing value ของวัสดุที่ทดลองกับหินมาตรฐาน โดยใช้แบบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6 นิ้ว สูง 7 นิ้ว เมื่อใช้แผ่นเหล็กรอง (Space disc) สูง 2.5 นิ้ว วางรองขณะบดอัดตัวอย่าง จะทำให้ตัวอย่างดินที่บดอัดแล้วมีความสูง 4.5 นิ้ว เท่ากับความสูงแบบบดอัดดิน (Compaction Mold) ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่บดอัดกับการทดลองการบดอัด

อัตราส่วนของปูนขาวที่ใช้จะพิจารณาในกรณีของ Solidification approach และ Engineering approach ตามลำดับ โดยการเตรียมตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนจะเตรียมขึ้น 2 ชุด ชุดหนึ่งใช้กดทดลองหาค่า Penetration ในสภาพไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และอีกชุดหนึ่งทดลองหาค่า penetration ในสภาพแช่น้ำ (Soaked) ตัวอย่างที่ทดสอบแบบแช่น้ำจะแช่น้ำเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ขณะทำการแช่น้ำอยู่จะมีน้ำหนักขนาด 10 ปอนด์วางกดทับบนดินตัวอย่าง (Surcharge) เมื่อแช่น้ำเป็นเวลาเท่ากับที่ได้กล่าวดังข้างต้น จึงนำไปกดด้วย Loading device สำหรับตัวอย่างที่ทดสอบแบบไม่แช่น้ำ ตัวอย่างจะถูกบรรจุในถุงพลาสติกที่ปิดปากถุงให้สนิท เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปทำปฏิกริยากับปูนขาว เป็นเวลาเท่ากับที่ทดสอบแบบแช่น้ำ โดยทั่วไปการทดสอบแบบไม่แช่น้ำนี้จะทดสอบทันที ที่ได้เตรียมตัวอย่างเสร็จ แต่เนื่องจากผลของปฏิกิริยา Pozzolanic เกิดขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องบ่มเป็นเวลาเท่ากัน แล้วจึงจะนำไปกดหาค่า penetration เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบกันได้

3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้บ่มส่วนผสมสามารถถือเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ในขบวนการเพิ่มเสถียรภาพของกากแร่สังกะสีด้วยวัสดุผสมเพิ่ม และเนื่องจากการปรับปรุงเสถียรภาพในทางปฏิบัติทั่วไปจะกระทำภายนอกอาคาร หรือไม่ก็ทำการเก็บกักกากแร่สังกะสีที่เพิ่มเสถียรภาพแล้วไว้ภายนอกอาคาร ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการปรับปรุงเสถียรภาพของกากแร่สังกะสี โดยมีแผนภูมิการศึกษาตามรูปที่ 3.5

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดทดลองส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 27 °ซ และ 50 °ซ โดยที่

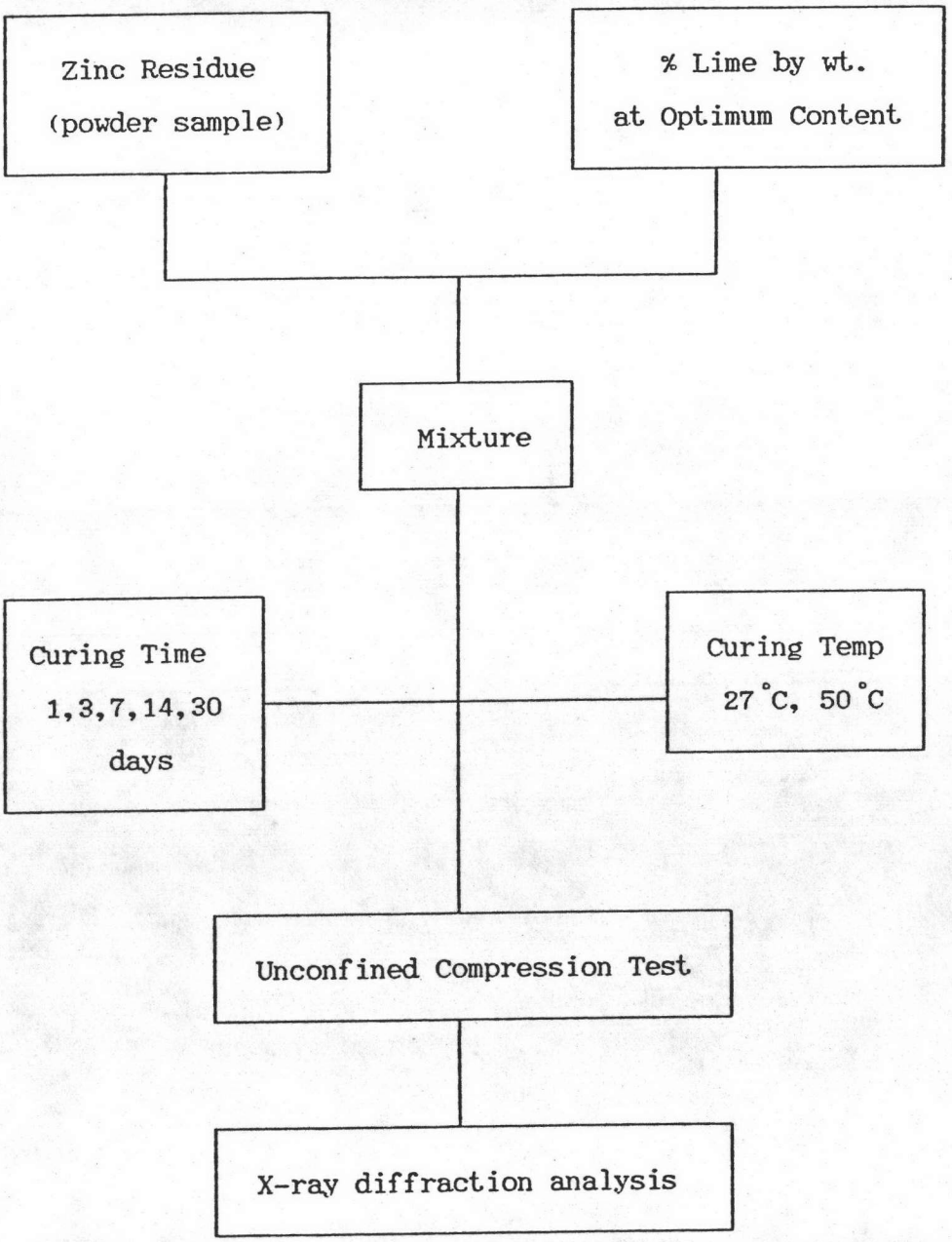
อุณหภูมิ 27 °ซ เป็นอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการโดยเฉลี่ย

อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นอุณหภูมิโดยเฉลี่ยบริเวณรอบ ๆ โรงงานบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด ที่จังหวัดตาก ที่กำหนดเป็นแหล่งรวบรวมกากแร่สังกะสี

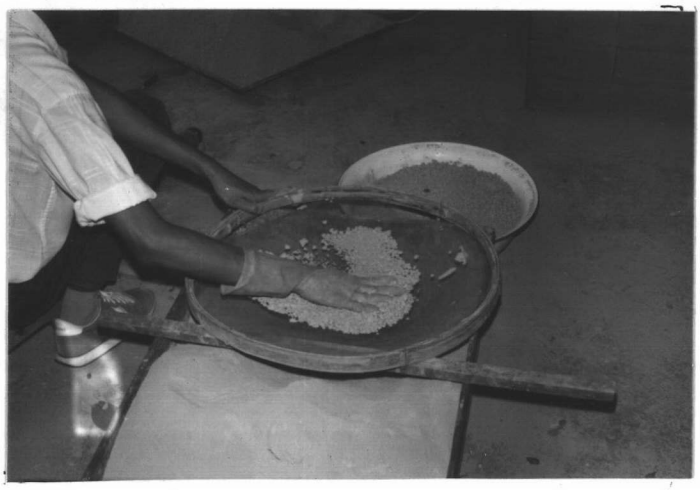
สำหรับอัตราส่วนของปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการศึกษาส่วนนี้ จะใช้อัตราส่วนของปูนขาวที่ปริมาณ Solidification approach และ Engineering approach ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่างและทดสอบจะกระทำเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ ในหัวข้อ 3.2.2 เพียงแต่ว่าพลาสติกที่บรรจุอยู่จะปิดปากถุง ไม่ให้อากาศเข้าไปได้ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการสูญเสียความชื้นจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง ซึ่งการศึกษาในส่วนนี้ต้องการทราบผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดจะกระทำเมื่อส่วนผสมที่เตรียมเอาไว้นั้นบ่ม เป็นระยะเวลา 1วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, และ 30 วัน ตามลำดับ

การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50 °ซ จะบ่มในตู้อบที่เตรียมเอาไว้ โดยมีเทอร์โมมิเตอร์ควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบ ส่วนที่อุณหภูมิบ่ม 27 °ซ จะกระทำเช่นเดียวกันกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.2



รูปที่ 3.5 แผนภูมิการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสม



การเตรียมตัวอย่างกากแร่สังกะสี
โดยร่อนผ่านตะแกรงมุ้งลวด

การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง

การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของก้อน
ตัวอย่างด้วยเครื่อง VERSATESTER 30M