



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพแฉก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว

Improvement of Bottom Ash-Marine Clay Mixture by using Fly Ash and Lime Powder

นามผู้วิจัย นายวุฒินันท์ เหล่ามะลอ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ \_\_\_\_\_ เดือน \_\_\_\_\_ พ.ศ. \_\_\_\_\_

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว

Improvement of Bottom Ash-Marine Clay Mixture by using Fly Ash and Lime Powder

โดย

นายวุฒินันท์ เหล่ามละอ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วุดินันท์ เหล่ามะลอ 2554: การปรับปรุงคุณภาพแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว  
โดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng. 86 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้สารผสมเพิ่ม  
คือเศษปูนขาวและเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว เพื่อพัฒนาคุณภาพของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้างทาง  
โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาว  
และเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว ซึ่งได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน, ปริมาณของแก็กั้นเตา ตะกอนดิน  
เหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาว, อายุการบ่ม สำหรับวัสดุทั้งหมดที่นำมาทดสอบในครั้งนี้มาจาก  
โรงงานไฟฟ้าจากถ่านหิน BLCF ซึ่งตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดจังหวัดระยอง โดยนำ  
อัตราส่วนที่ดีที่สุดของแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวมาผสมกับสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วน 5, 10, 20, 30  
และ 40 % โดยน้ำหนักแห้ง แล้วทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ, California  
Bearing Ratio, ดัชนีความเหนียวและค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ

ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดของแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวคือ 80:20 %  
โดยน้ำหนักแห้ง และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวและเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวมากขึ้นจะทำให้  
ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น, ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลง,  
ค่าดัชนีความเหนียวมีแนวโน้มลดลง, ค่า % CBR ทั้งแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำมีค่ามากที่สุด เมื่อผสม  
เศษปูนขาว 10 % โดยน้ำหนักแห้งและเมื่อผสมเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวค่า % CBR ทั้งแบบแช่น้ำและ  
แบบไม่แช่น้ำมีค่ามากที่สุดที่ 30% โดยน้ำหนักแห้ง ถ้าผสมมากกว่านี้ค่ากำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก, ค่า %  
CBR ทั้งแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม, ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเมื่อผสม  
เศษปูนขาวที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดเปรียบเทียบกับที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามีค่าสูงขึ้น ส่วนค่า  
สัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเมื่อผสมเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดเปรียบเทียบกับที่อายุ  
การบ่ม 28 วันพบว่ามีความต่ำลง

สรุปได้ว่าแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้สารผสมเพิ่มคือเศษปูนขาวและเถ้าลอยผสม  
เศษปูนขาวสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุงานทางได้เมื่อพิจารณาเฉพาะค่า % CBR และดัชนีความเหนียว

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Wutthinan Laomalor 2011: Improvement of Bottom Ash-Marine Clay Mixture by using Fly Ash and Lime Powder. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prateep Duangdeun, M.Eng. 86 pages.

This research aims to study improvement of bottom ash and marine clay by using lime powder and fly ash mixed with lime powder for using in road embankment construction. The study involved the engineering property of the above materials, such as grain size distribution, the amount of bottom ash, marine clay, fly ash and lime powder, with relation to curing time. All specimens obtained from the BLCP power plant which is located in Maptaphut industrial estate in Rayong province. The main objective was to find the best proportion between bottom ash and marine clay, for the admixture percentage of 5,10,20,30,40 by dry weight. Then the specimens were tested to find out modified proctor compaction, California bearing ratio, plasticity index and coefficient of permeability.

The results showed that the best proportion between bottom ash and marine clay was 80:20% by dry weight and when increasing lime powder and fly ash mixed with lime powder, the maximum dry density increased, while optimum moisture content and plasticity index decreased. For mixed lime powder the maximum values CBR of soaked and unsoaked were greatest for 10% by dry weight and when mix fly ash mixed lime powder. The maximum values CBR of soaked and unsoaked happened when 30% by dry weight. If the mixture were greater than this value will not increase. Soaked and unsoaked CBR values increased with increasing curing time. The coefficient of permeability increased when mixed lime powder were test immediately after compaction compare with tested 28 days the values. However the coefficient of permeability decreased when mix fly ash mixed lime powder were tested immediately after compaction compare with tested 28 days.

It can conclude that bottom ash and marine clay improved by using lime powder and fly ash mixed with lime powder is suitable for using in road embankment construction when considering only %CBR and plasticity index.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ประทีป ดวงเดือน ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการประสิทธิประสาทวิชาความรู้ เพื่อให้เกิดวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขึ้นมาพร้อมทั้งคณะกรรมการที่ปรึกษาประกอบด้วย รศ.ดร. ก่อโชค จันทรวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้ความรู้คำแนะนำและที่ขาดไม่ได้คืออาจารย์ในหมวดสาขาวิศวกรรมปฐพีและสาขาวิชาอื่นๆทุกท่านที่ทุ่มเทสั่งสอนให้ความรู้แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณบริษัท BLCP POWER จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุทดสอบและให้ทุนอุดหนุนด้วยดีตลอดมาจนการวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและวิธีปฏิบัติอย่างถูกต้อง เพื่อนๆพี่น้องๆในสาขาวิศวกรรมปฐพีที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอมาและที่ขาดไม่ได้คือน้องกิจจาที่ร่วมทดสอบวัสดุด้วยกันอย่างแข็งขันจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยสนับสนุนส่งเสริมในด้านการศึกษาและเป็นกำลังใจในการเรียนมาโดยตลอดและน้องชายที่แสนดี 2 คน ปิ๊กและปิ๊ก หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวม ผู้วิจัยขอขอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นให้แก่ บิดามารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถและประสบความสำเร็จในการศึกษา

วุฒินันท์ เหล่ามะลอ

พฤษภาคม 2554

## สารบัญ

### หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์การวิจัย	2
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
สรุป	79
ข้อเสนอแนะ	81
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	82
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	87

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618	15
2	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด	24
3	สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	29
4	การทดสอบ Atterberg 's Limits	34
5	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	35
6	การจำแนกประเภทของวัสดุทดสอบ	36
7	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างวัสดุทดสอบ	42
8	องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับถ้ำลอยชั้นคุณภาพ F และ C	43
9	องค์ประกอบทางเคมีในเศษปูนขาวเปรียบเทียบกับปูนขาวมาตรฐาน	44
10	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุทดสอบ	46
11	ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของวัสดุทดสอบ	46
12	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตา ตะกอนดินเหนียว ถ้ำลอย	47
13	เกณฑ์ลักษณะความชื้นน้ำ	48
14	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุทดสอบ	50
15	การทดสอบ Atterberg 's Limits ของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว	51
16	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของถ้ำกั้นเตาผสม ตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาว	54
17	ผลการทดสอบหาค่า %CBR ของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว โดยใช้เศษปูนขาว	55
18	การทดสอบ Atterberg 's Limits ของ BC:LP	62
19	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาผสม ตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาว	65
20	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของถ้ำกั้นเตาผสม ตะกอนดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาว	67

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	ผลการทดสอบหาค่า %CBR ของเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว โดยใช้เถ้าลอยผสมเศษปูนขาว	68
22	การทดสอบ Atterberg 's Limits ของ BC:FL	75
23	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตาผสม ตะกอนดินเหนียวโดยใช้เถ้าลอยผสมเศษปูนขาว	78
24	สรุปปริมาณร้อยละของอัตราส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ แต่ละชนิด	80

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนการวิจัยการปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว	32
2	การกระจายขนาดของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาว	35
3	การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าก้นเตา (กำลังขยาย 50 เท่า)	36
4	การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าก้นเตา (กำลังขยาย 250 เท่า)	37
5	การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าก้นเตา (กำลังขยาย 2,000 เท่า)	37
6	การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอย (กำลังขยาย 250 เท่า)	38
7	การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอย (กำลังขยาย 2,000 เท่า)	38
8	การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอย (กำลังขยาย 10,000 เท่า)	39
9	กราฟระหว่าง intensity และ theta ของเถ้าก้นเตาตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD	40
10	กราฟระหว่าง intensity และ theta ของเถ้าลอยตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD	41
11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของวัสดุ ทดสอบ	45
12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียวเถ้าลอย	47
13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่ เหมาะสมของเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว	49
14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง%CBR กับอัตราส่วน BA:CH	51
15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม	52

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของ BC:LP	53
17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:LP	56
18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:LP	57
19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:LP	58
20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำกับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	59
21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำกับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	60
22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำและแช่น้ำกับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	61
23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	62
24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	63
25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	63
26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของแฉกดินเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	64
27	กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของ BC:FL	66
28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:FL	69
29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:FL	70

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:FL	71
31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำกับถ้ำลอยเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	72
32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำกับถ้ำลอยเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	73
33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำกับถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	74
34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	75
35	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	76
36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	76
37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ	77

## การปรับปรุงคุณภาพถ้ำก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ เถ้าลอยและเศษปูนขาว

### Improvement of Bottom Ash-Marine Clay Mixture by using Fly Ash and Lime Powder

#### คำนำ

สืบเนื่องจากปัจจุบันถ้ำก้นเตาถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ปัญหาใหญ่ประการหนึ่งของโรงไฟฟ้าพลังงานถ้ำก้นเตาคือการจัดการถ้ำก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้ (By Product) จากการใช้ถ้ำก้นเตาเป็นเชื้อเพลิง ที่มีปริมาณการผลิตออกมามาก หากจัดการไม่เหมาะสมพอก็มีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ รวมทั้งปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและชุมชนรอบๆบริเวณได้ อีกประการหนึ่งในการขุดลอกทรายท้องทะเลมาถมเพื่อสร้างที่ดินใหม่ จะมีตะกอนดินเหนียวเป็นวัสดุเหลือใช้หลงเหลืออยู่จำนวนมาก ดังนั้นผลการศึกษาวิจัยการนำวัสดุเหลือใช้ที่มีอยู่เหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรม จึงมีความสำคัญซึ่งนอกจากจะช่วยลดปัญหาในการจัดการถ้ำก้นเตาของโรงไฟฟ้าลงได้อย่างมากแล้ว ยังอาจจะเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับถ้ำก้นเตาได้อีกด้วย

ในงานก่อสร้างทางโดยทั่วไปจะมีการนำดินในท้องถิ่นนั้น ๆ มาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างทาง แต่ทว่าวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นเริ่มขาดแคลนและมีคุณภาพต่ำกว่าเกณฑ์ที่ต้องการ ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาหาวัสดุหรือวิธีการใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงให้ดินมีคุณสมบัติดีขึ้น ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของถ้ำก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอย และเศษปูนขาว โดยจะทำการศึกษาคูณสมบัติของวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ แล้วทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุต่างๆเหล่านี้ โดยหวังว่าจะได้วัสดุใหม่ที่สามารถใช้ทดแทนดินธรรมชาติได้ เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะด้านวิศวกรรมการทางต่อไปในอนาคต

## วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนผสมสำหรับแก้กันเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาวที่เหมาะสม
2. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลในการปรับปรุงคุณภาพของแก้กันเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ เถ้าลอยและเศษปูนขาว อันได้แก่
  - การกระจายขนาดของวัสดุผสม
  - ปริมาณของแก้กันเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาว
  - อายุการบ่ม
3. ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาว ว่ามีผลต่อความเหนียว (Plasticity) ของวัสดุผสม
4. หาค่า CBR ของวัสดุปรับปรุงคุณภาพที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและที่จุดสูงสุด
5. ศึกษาและให้ข้อเสนอแนะถึงความเป็นไปได้ในการนำแก้กันเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาว มาใช้แทนวัสดุธรรมชาติเพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะด้านวิศวกรรมการทางต่อไป

## ขอบเขตของการวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้ใช้แก้กันเตาและตะกอนดินเหนียว จากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง
2. สารผสมเพิ่มที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ
  - เถ้าลอย จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

- เศษปูนขาวที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียด จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

3. ศึกษาอิทธิพลของสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วนผสมต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมสารผสมเพิ่ม

3.1 ทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานของ ASTM D 1557-91 โดยวิธี Modified Proctor Compaction Test จนได้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content)

3.2 ทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ตามมาตรฐาน ASTM D 1883-94 ทั้งแบบ Soaked CBR และ Unsoaked CBR

3.3 ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของตัวอย่างแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวและแก็กั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว

## การตรวจเอกสาร

### การปรับปรุงคุณภาพดิน

Hausmann (1990) กล่าวว่าในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อใช้เป็นฐานรากหรือวัสดุทางวิศวกรรมปฐพีนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินทางวิศวกรรมดังนี้

1. เพิ่มความสามารถในการรับกำลัง
2. ลดการเสยรูป (Distortion) ภายใต้ความเครียด (เพิ่ม Stress-Strain Modulus)
3. ลดความสามารถในการยุบตัว (Compressibility)
4. ควบคุมการเกิดการหดตัวและบวมตัว
5. ควบคุมความชื้นน้ำ
6. ป้องกันความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม (Freezing/Thawing, Wetting/Drying)
7. ลดการเกิด Liquefaction
8. ความแปรปรวนของดินที่นำมาใช้

ในการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถแบ่งเทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพดินออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่

1. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเชิงกล (Mechanical Modification) เป็นการเพิ่มความหนาแน่น (Soil Density) ด้วยการใช้แรงกระทำหรือการบดอัด (Compaction) เพื่อลดปริมาตรของช่องว่างของอากาศในมวลดินโดยปริมาตรของเนื้อดินและความชื้นยังคงเดิม

2. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินวิธีทางไฮดรอลิก (Hydraulic Modification) เป็นการนำน้ำออกจากมวลดิน (Dewatering) สำหรับมวลดินละเอียด การระบายน้ำออกทำได้ช้า ดังนั้นจึง Dewatering โดยการ Consolidation หรือ ใช้ Preload ช่วยเร่งกระบวนการ

3. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเชิงกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Modification) เป็นการใช้สารผสมเพิ่ม หรือ วัสดุผสม (Additive) เช่น กากจากอุตสาหกรรม (Industrial By-Products) วัสดุเหลือทิ้ง (Waste Materials) เม็ดกรวดทราย (Granular Materials) สารประเภทซีเมนต์ (Cementitious Materials) และ สารเคมีอื่นๆ เพื่อปฏิกิริยากับดิน หรืออาจจะเป็นการฉีดน้ำปูนลงไปดิน (Grouting) รวมถึงการให้ความร้อนหรือความเย็นเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบในดิน

4. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเสริมกำลัง (Modification by inclusions and confinement) เป็นปรับปรุงเสถียรภาพโดยการเสริมกำลังรับแรงดึงให้ดินด้วยการใช้เส้นใย (Fiber) ตาข่าย (Mesh) การยึด (Nailing and Anchor) และการสร้างกำแพงกันดิน (Retaining) ซึ่งเป็นการเสริมแรงด้านข้าง (Confinement) ให้ลาดดิน

### การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี

Mitchell (1982) ได้กล่าวไว้ว่า การใช้สารเคมีผสมลงในดิน มีวัตถุประสงค์โดยทั่วไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินได้แก่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรซึ่งพิจารณาได้จากการบวมตัว และการหดตัวของดิน ปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนัก หรือพฤติกรรมของ Stress-Strain ของดิน ปรับปรุงการไหลซึมของน้ำที่ผ่านดิน และเพิ่มความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

สารเคมี หรือสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ปูนขาว ซีเมนต์ ยิปซัม หรือเถ้าลอย เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย สำหรับความเหมาะสมของการเลือกใช้สารเพิ่มเสถียรภาพนั้น จะต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมืองค์ประกอบที่ไม่มีพิษ รวมทั้งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย

## ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี

1. คุณสมบัติของดิน (Soil Properties) ดินตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัว ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) อาจกล่าวสรุปได้ว่า การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) สารอินทรีย์ สารประกอบอื่นๆ เช่น แกลีซิลเฟต หรือคลอไรด์ และองค์ประกอบทางเคมี จัดเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดิน

2. สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizers) โดยทั่วไปแล้ว สารเพิ่มเสถียรภาพชนิดเดียวกันที่ผสมในปริมาณที่มากกว่าจะให้กำลังมากกว่าภายใต้เงื่อนไขตัวแปรอื่นคงที่และดินนั้นมีความชื้นเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ในทางกลับกัน สารเพิ่มเสถียรภาพต่างชนิดกันย่อมมีผลต่อการพัฒนากำลังของดินด้วยอัตราที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเชื่อมประสาน (Cementitious Compounds) รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อสารเพิ่มเสถียรภาพนั้นทำปฏิกิริยากับดิน

3. น้ำ (Water) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี เพราะน้ำจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเพิ่มกำลังของดิน ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา จะยังคงเหลือกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้กำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

4. เทคนิคการปรับปรุง (Techniques of Stabilization) นอกจากองค์ประกอบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว กำลังของดินยังขึ้นอยู่กับเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพ ระยะเวลาในการผสมที่แตกต่างกัน ความเร็วในการผสม เงื่อนไขในการบ่ม ตลอดจนการเตรียมสภาพดินก่อนการปรับปรุง และการดูแลหลังการผสม (Pre and post treatment) จะมีผลทำให้กำลังของดินที่แตกต่างกันไป

## ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ

1. การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Cation Exchange) โขเดียมอออนในดินจะถูกแทนที่โดย อีออนบวกอื่นๆ ซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่า หรือมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าโดยเรียงลำดับความสามารถ ในการแทนที่จากมากไปน้อย คือ  $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > H^+ > Na^+ > Li^+$  สำหรับอีออนลบที่พบ มากคือ  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$  และ  $NO_3^-$

2. การจับตัวกันของเม็ดดิน (Flocculation – agglomeration) การเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ ลงไปในดินจะทำให้อนุภาคดินเหนียว เกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวคือ อีออนบวกจากสารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเข้าไปในมวลดิน จะเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคของ ดินเหนียว สารซิลิเกตจะละลายเข้าสู่โพรงน้ำก่อให้เกิดสารเชื่อมประสาน ส่งผลให้เม็ดดิน มีโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อความเข้มข้นของอีออนสูงขึ้น จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ ดินเหนียว ซึ่งจะทำให้อิออนน้ำ Double Layer หดตัวแคบเข้า อนุภาคดินเหนียวจะเกิดการดึงดูดกันเป็น โครงสร้างแบบระกะระกะ อนุภาคของเม็ดดินจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง โครงสร้างของดินจะมีความมั่นคงขึ้น

3. การเชื่อมประสาน (Pozzolanic Reaction) สารซิลิกา ( $SiO_2$ ) และ/หรือ Alumina ( $Al_2O_3$ ) จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช่ผสมกับดินที่อุณหภูมิปกติและมีความชื้น ทำให้เกิด สารประกอบใหม่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานจัดเป็น ส่วนประกอบที่สำคัญอันหนึ่งที่ทำให้กำลังของดินเพิ่มมากขึ้น

4. การเกิดสารประกอบคาร์บอเนต (Lime Carbonation) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ ) ในสารเพิ่มเสถียรภาพจะทำปฏิกิริยา กับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$  หรือ  $3CaCO_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ ) อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้มีผลเพียงเล็กน้อยแต่ก็ไม่ควรให้เกิดขึ้นมากเนื่องจาก จะทำให้การทำปฏิกิริยาอื่นๆลดน้อยลง

## เถ้าก้นเตา

### ขั้นตอนการเกิดเถ้าก้นเตา

การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น เป็นการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำจนน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำดังกล่าวจะไปหมุนกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป เถ้าถ่านหิน (Coal Ash) เป็นวัสดุพลอยได้ (By Product) จากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เถ้าถ่านหินคือวัสดุอินทรีย์ที่ตกตะกอนทับถมและเจือปนอยู่ในเนื้อถ่านหิน เมื่อเผาถ่านหินให้ลุกไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิที่สูง แร่ธาตุในถ่านหินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นออกไซด์หลายชนิด โดยมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ประกอบ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

ในการเผาไหม้ถ่านหินในห้องเผาไหม้ มีผงเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่ ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ จะถูกหลอมจนมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเล็กๆ เถ้าถ่านหินส่วนนี้จะถูกลมร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้ พัดเอาเถ้าถ่านหินเล็กๆนี้ ลอยออกไปทางด้านบนของห้องเผาไหม้ แล้วลมร้อนจะถูกทำให้เย็นลงอย่างกะทันหัน ผงเถ้าถ่านหินส่วนที่มากพร้อมกับลมร้อนนี้ก็จะแข็งตัว เป็นผงละเอียดเล็กๆ เราเรียกเถ้าถ่านหินส่วนนี้ว่าเถ้าลอย (Fly Ash) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา มีขนาดประมาณ 1 ไมครอน ( 1/1000 เซนติเมตร) จนถึง 150 ไมครอน เมื่อนำไปส่องขยายดูด้วยกล้องกำลังขยายสูงจะพบว่า เถ้าลอยมีรูปร่างกลม เถ้าลอยที่มีขนาดเล็กละเอียดนี้สามารถทำปฏิกิริยากับต่างได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ กล่าวคือมีความแข็งแรงและเกาะยึดกันได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ผงเถ้าถ่านหินอีกส่วนหนึ่งประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ จะถูกลมและรวมตัวกันเป็นก้อนโตขึ้น แล้วตกลงสู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ เราเรียกเถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จากกันเดานี้ว่า เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) จะเป็นวัสดุที่ค่อนข้างแข็ง มีน้ำหนัก จะถูกนำออกจากด้านล่างของห้องเผาไหม้

### คุณลักษณะโดยทั่วไปของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตามีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและผงละเอียดปนกันอยู่แต่มีส่วนของเม็ดหยาบมากกว่า ซึ่งเม็ดหยาบนั้นมีลักษณะคล้ายกับทราย ซึ่งได้จากการเผาไหม้ผงถ่านหินตามกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าก้นเตาทั่วไปจะมีสีเทาถึงดำ หรือสีน้ำตาล จากตัวอย่างภาพถ่ายเถ้าก้นเตาจาก

การใช้เครื่อง scanning electron microscope จะพบว่าอนุภาคของเถ้าก้นเตานั้นมีขนาดแตกต่างกันไป โดย อนุภาคส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวเป็นแบบขรุขระและมีเหลี่ยมคมเมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค

### องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาโดยวิธี X-Ray Diffraction พบว่า เถ้าก้นเตาประกอบด้วยสารหลายชนิด ซึ่งเมื่อเทียบกับกราฟของสารมาตรฐานคาดว่า เถ้าก้นเตานี้มีองค์ประกอบของสารประเภทซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ quartz, cristobalite และ mullite

### การปรับปรุงคุณภาพที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าก้นเตา

นิรชร (2539) ได้ศึกษาในส่วนของคุณสมบัติของซีเถ้าก้นเตา จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยศึกษาคุณสมบัติด้าน ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าการคงตัว (Soundness) ค่าเทียบเท่าทราย (Sand Equivalent) และขนาดคละ เพื่อศึกษาแนวทางการนำซีเถ้าก้นเตาใช้เป็นมวลละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติในเรื่องค่าการคงตัวเท่านี้ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนด ซึ่งสามารถชดเชยโดยการพิจารณาแทนที่ซีเถ้าในมวลรวมละเอียดเพียงบางส่วน ทั้งนี้ในส่วนคุณสมบัติทางเคมีของซีเถ้าก้นเตา พบว่ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคุณสมบัติของการศึกษาถ้ำลอย ซึ่งเป็นสารปอซโซลาน

มนตรี และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในงานทาง โดยผสมกับผงปูนขาวแล้วทดสอบแบบ Modified Compaction ที่ความชื้นตาม OMC แช่น้ำไว้ 4 วันแล้วทำการทดสอบหาค่า CBR ปรากฏว่าที่ปริมาณปูนขาวที่ 5 % ให้ค่า CBR สูงสุดที่ 57.4 % และยังสรุปได้ว่าเถ้าก้นเตาสามารถพิจารณาใช้เป็นวัสดุมวลเบาในคันทางได้

สมัชชา (2549) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบขอนแก่น โดยใช้สารปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าก้นเตาที่เป็นส่วนเหลือจากการเผาถิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า นำมาทำการบดโดยเถ้าก้นเตาที่นำมาใช้มีส่วนที่ค้างบนตะแกรง 325 ในช่วง 15 - 20% เป็นสารผสมเพิ่ม จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดขอบเขตของตัวอย่างดินที่ใช้สารผสมเพิ่ม 5% โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาในสารผสมเพิ่มพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม

ระหว่างซีเมนต์ต่อถ้ำกันเตาเป็น 60 ต่อ 40 และโดยการทดสอบความแข็งแรงแบบแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซพพบว่าใช้สารผสมเพิ่มประมาณ 2% ที่อายุ 28 วัน ทำให้ดินลมหอบขอนแก่นมีความแข็งแรงเท่ากับหินคลุก และสภาพแช่น้ำไม่ได้ทำให้ดินที่ได้รับการปรับปรุงแล้วลดความแข็งแรงลง นอกจากนี้ได้ทดสอบพฤติกรรมในการรับน้ำหนักโดยทำแบบจำลองขนาด 1.2 x 1.2 x .0.3 เมตร ให้น้ำหนักบรรทุกโดยแผ่นเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 เมตร แล้ววัดความดันที่กระจายลงไปใต้แบบจำลอง ซึ่งดินลมหอบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพสามารถลดการกระจายแรงลงได้เป็นอย่างดี

จุฑาทิพย์ (2552) ได้ศึกษาปริมาณถ้ำกันเตาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินทรายและหินคลุก โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน, ปริมาณของถ้ำและอายุการ บ่ม ได้นำหินคลุกผสมถ้ำกันเตาในอัตราส่วน 20,25 และ 30% และดินทรายผสมถ้ำกันเตาในอัตราส่วน 10,20 และ 30% จากปัจจัยดังกล่าวพบว่า หินคลุกผสมถ้ำกันเตาและทรายผสมถ้ำกันเตามีการพัฒนาค่า CBR สูงขึ้นทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณถ้ำกันเตาซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อผสมถ้ำกันเตาที่ 25% ของน้ำหนักดินแห้ง และพัฒนาค่า CBR เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

วิเศษ (2552) ได้ศึกษาปริมาณถ้ำกันเตาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณถ้ำกันเตามากขึ้นค่า Plasticity Index ลดลงโดยดินลูกรังเกรดผสม B มีค่าลดลงประมาณ 2-4 % ส่วนดินลูกรังเกรดผสม D มีค่าลดลงประมาณ 2-6 % ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง, ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. มีค่าเพิ่มสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วลดต่ำลงโดยให้ค่าที่เหมาะสมที่อัตราส่วนผสม 0-10 และ 25% ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ทดสอบทันทีของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมถ้ำกันเตาที่บ่มน้ำมากขึ้น แต่ในดินลูกรังเกรดผสม D ผสมถ้ำกันเตามีค่าสูงขึ้น ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2-10 เท่าทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D

กิตติศักดิ์ (2553) ได้ศึกษาพบว่า เมื่อผสมปริมาณถ้ำกันเตาและปูนขาวเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความเหนียวของดินลดลง, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง, ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น, ปริมาณถ้ำกันเตาและปูนขาวที่ทำให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. มีค่าเพิ่มสูงมากที่สุด คือประมาณ 40% ในดินลูกรังเกรดผสม B และ D เมื่อผสมเกินกว่าค่านี้อาจจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น,

ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นประมาณ 10 เท่าในดินลูกรังเกรด B และสูงขึ้นประมาณ 9 เท่าในดินลูกรังเกรด D และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้ดินลูกรังเกรด B มีค่าความชื้นน้ำต่ำลงประมาณ 6 เท่าและลูกรังเกรด D มีค่าต่ำลงประมาณ 8 เท่า

รณภูมิ (2553) ได้ศึกษาหาคุณสมบัติของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาว ซึ่งได้แก่การกระจายขนาดของเม็ดดิน, ปริมาณของเถ้าก้นเตา, ปริมาณเศษปูนขาวและอายุของการบ่ม โดยแบ่งเป็นสองเกรดได้แก่ เกรด B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยเกรด B ผสมเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวกับดินในอัตราส่วน 5, 10, 15 และ 20 % และเกรด D ผสมเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวกับดินในอัตราส่วน 10, 20, 25 และ 30 % โดยน้ำหนักของดินแห้ง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าสูงขึ้น ค่า Unsoaked และ Soaked C.B.R. ให้ค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 10 และ 25 % ของดินลูกรังเกรด B และ D ตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

อุมาพร (2553) ได้ศึกษาหาอัตราส่วนของสารผสมเพิ่มระหว่างเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวที่เหมาะสมคือ 3:7 โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่มและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ทุกอัตราส่วนผสม นำมาผสมกับดินลูกรังเกรด B และ D ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ซึ่งทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มสูงขึ้นและค่า C.B.R. แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม

ในต่างประเทศได้มีการศึกษาการนำเถ้าก้นเตาไปใช้ประโยชน์ ในส่วนของงานทางใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางในรูปแบบธรรมชาติ และโดยการปรับปรุงคุณภาพกับหินปูนเป็นวัสดุพื้นทาง ใช้เป็นวัสดุถมกลับในงานก่อสร้างถนน ใช้ทำคอนกรีตบล็อก และใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในงานคอนกรีต

Torii and Kawamura (1991) ได้ทำการศึกษานำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างถนน ปรากฏว่าเมื่อนำเถ้าลอยผสมเถ้าก้นเตาแล้วผสมสารผสมเพิ่มปูนขาวหรือซีเมนต์เพียงเล็กน้อยทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นและป้องกันการผุพังเวลาจมน้ำของชั้นพื้นทางและโครงสร้างตัวถนน

Chapman *et al.* (1996) ได้ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์กั้นเตาโดยการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ปูนขาวผสมที่จำนวน 1-6% พบว่าค่ากำลังแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) มีค่าเพิ่มขึ้นรวมถึงศึกษาการนำซีเมนต์กั้นเตามาใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางในรูปแบบธรรมชาติ และรูปแบบหลังการปรับปรุงคุณภาพแล้ว พบว่ามีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง

Forteza *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษานำซีเมนต์กั้นเตาซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาถ่านหิน มาใช้เพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในการก่อสร้างถนนในประเทศสเปน ปรากฏว่ามีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนดในประเทศสเปน

Bunjoo Kim *et al.* (2006) ได้ศึกษาหาอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยและซีเมนต์กั้นเตาเพื่อทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยขึ้นเรื่อยๆ มากกว่าซีเมนต์กั้นเตา จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดต่ำลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่ามากขึ้น

#### ตะกอนดินเหนียว

Kamon and Nontananandh (1990) ได้สำรวจดินตะกอนจากอ่าวโอซากาหรือที่เป็นที่รู้จักกันดีโดยทั่วไปคือ ดินตะกอน (Hedoro) ในญี่ปุ่น ที่มีความชื้นตามธรรมชาติประมาณ 200-300% และอาจจะถึง 400-500% สำหรับชั้นตะกอนส่วนบน จากการสังเกตด้วยสายตาพบว่ามีสีเทาเข้ม มีซากเศษเปลือกหอยปะปนอยู่ และมีกลิ่นของซากสิ่งมีชีวิต มีคุณสมบัติการหดตัวสูงซึ่งส่งผลต่อในเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาตร หลังจากการจำแนกดินด้วยวิธี USCS แล้วพบว่าจัดอยู่ในกลุ่มดินเหนียวปนสารอินทรีย์ (OH) ที่มีความเป็นพลาสติกสูง โดยมีขีดจำกัดของเหลว (Liquid limit, LL) 110.6% ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) 35.6% ความชื้นในมวลดินเริ่มต้น ( $w_L$ ) อยู่ในช่วง 100% - 110% และมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, Gs) เท่ากับ 2.739

Nontananandh (1990) พบว่าคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของตะกอนจากการขุดลอกจาก Hedoro มีเปลี่ยนแปลงไปตามแร่ดินเหนียว (Clay Minerals) ที่ประกอบอยู่ในตะกอนจากการขุดลอกและตำแหน่งของการขุดลอก ผลจากการศึกษาด้วยการวิเคราะห์ XRD แสดงให้เห็นว่า แร่ที่พบในตะกอนจากการขุดลอกจากทะเลสาบ Hedoro ประกอบด้วย Quartz, Feldspar และสารประกอบในแร่ดินเหนียว ได้แก่ Montmorillonite, Kaolinite, Halloysite และ Amorphous

จากการศึกษาการขุดลอกจากทะเลสาบ Kasumigaura ซึ่งมีปริมาณการตกตะกอนประมาณ 6 มม. ต่อปี ส่งผลต่อคุณภาพน้ำและอากาศโดยตะกอนจะก่อให้เกิดก๊าซพิษกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตะกอนจากการขุดลอกยังสามารถส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอีกหากไม่มีการจัดพื้นที่ทิ้งตะกอนอย่างเหมาะสม องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตะกอนจากการขุดลอกในทะเลสาบ Kasumigaura เป็นวัสดุที่ไม่เป็นอันตรายและมีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัสดุทางวิศวกรรมปฐพี โดยการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีด้วยซีเมนต์อย่างเหมาะสม (Nontananandh, 1990 อ้างถึง Japan Institute of Construction Engineering, 1988)

### การแก้ปัญหาของดินตะกอนโดยคำนึงถึงแนวความคิดทางด้านวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม (Geo-environmental Engineering)

ในสหรัฐอเมริกา US Army Corps of Engineer (1987) ได้กล่าวถึงการใช้ประโยชน์ของดินตะกอนจากการขุดลอกว่า มีสถานที่ก่อสร้างมากกว่า 1,300 แห่ง ในอเมริกาเหนือ มีการใช้ประโยชน์จากตะกอนจากการขุดลอก ได้แก่ การพัฒนาที่อยู่อาศัย การบำรุงรักษาชายหาด สวนสาธารณะหรือสถานที่พักผ่อนหย่อนใจ การเพาะปลูก ป่าไม้ การจัดการขยะ การปรับปรุงแนวชายฝั่ง การควบคุมการกัดเซาะ เป็นต้น การนำเอาดินตะกอนดังกล่าวมาใช้ในงานก่อสร้างนั้นมีหลายพื้นที่ที่มีประโยชน์ทางด้านระบบนิเวศ เนื่องจากความจำเป็นในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในพื้นที่นั้นและเป็นการทดแทนสถานที่ในการทิ้งดินตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานที่ทิ้งดินตะกอนในแหล่งน้ำเปิด เป็นการเพิ่มคุณค่าของชายฝั่งทะเลและพื้นที่ทางน้ำ แนวความคิดทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมจึงมีผลต่อการเลือกนำดินตะกอนมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง ดังนั้นดินตะกอนจากการขุดลอกนี้จึงถือเป็นแหล่งดินที่มีคุณค่า ที่จะเป็นอีกทางเลือกสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง

ประเทศนอร์เวย์เป็นอีกประเทศหนึ่งที่ประสบกับปัญหามลพิษในชายฝั่งทะเล ซึ่งเป็นปัญหาหลักทางสิ่งแวดล้อม ในปี 2003 ชายฝั่ง Trondheim ใช้งบประมาณถึง 56 ล้านบาท ในการปรับปรุงดินตะกอนไม่บริสุทธิ์ 5 แสนลูกบาศก์เมตร ให้สะอาดและมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยดินตะกอนจากการขุดลอกจะถูกผสมกับซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อขนย้ายไปยังเขื่อนกันคลื่น และมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำดินตะกอนนี้มาใช้เป็นแหล่งวัสดุในการสร้างพื้นที่แผ่นดินใหม่ได้ (Experts in Team, 2004)

ในเยอรมนี Tresselt *et al.* (1998) ได้มีความพยายามในการศึกษาการนำเอาดินตะกอนทำเรือมาใช้เป็นวัสดุกันซึมปกคลุมในงานบ่อฝังกลบขยะโดยใช้ดินตะกอนจากท่าเรือของเมืองฮัมบวร์ค ประเทศเยอรมนี มาปรับปรุงคุณภาพและเก็บในที่น้ำท่วมไม่ถึง เพื่อนำไปปกคลุมบ่อฝังกลบขยะเหนือบนชั้นทรายระบายน้ำ ซึ่งผลการสำรวจในสนามเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ ในเรื่องดุลยภาพของน้ำ (water balance) และคุณภาพของน้ำ จากวัสดุที่ปกคลุมบ่อฝังกลบขยะที่ Francop ในเมืองฮัมบวร์ค พบว่าระบบที่ใช้ในการปกคลุมบ่อฝังกลบขยะ รวมถึงดินตะกอนที่ใช้กันซึมของน้ำมีประสิทธิภาพสามารถควบคุมการไหลซึมได้

## เถ้าลอย

### คุณลักษณะโดยทั่วไปของเถ้าลอย

เถ้าลอย คือ กากหรือตะกอนที่มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดซึ่งได้จากการเผาไหม้ผงถ่านหินตามกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยที่เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานตามธรรมชาติ เถ้าลอยทั่วไปจะมีสีเทาถึงดำ หรือสีน้ำตาล อนุภาคส่วนใหญ่จะมีรูปเป็นทรงกลมเล็กๆ เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกลายเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้

### องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยวิธี X-ray Fluorescence พบว่าเถ้าลอยประกอบด้วยออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ), แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะแตกต่างกันตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินที่มาของเถ้าลอย ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะเป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของเถ้าลอยซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้แก่ ชั้นคุณภาพ C (Class C) และชั้นคุณภาพ F (Class F) ดังแสดงในตารางที่ 1

สำหรับข้อกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 จะใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาออกไซด์ , อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ โดยแบ่งออกเป็นชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F โดยที่ชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F ซึ่งมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ ทั้งนี้การกำหนดองค์ประกอบดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างเพียงพออย่างน้อยเพียงใด นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวอีกด้วย

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพเถ้าลอย	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	>70	>50
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), max %	<10	>10
ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), max %	-	-
ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ), max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (Loss on Ignition , LOI), max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), max %	1.5	1.5

สำหรับปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซัลเฟตในเถ้าลอยมีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการรับน้ำหนักแรงอัด และเวลาในการก่อตัวได้ ทั้งยังมีผลเสียดต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย อย่างไรก็ตามยังมีส่วนช่วยเสริมในการเกิด Sulfate Attack

สำหรับปริมาณความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน (Handling Difficulty) และสำหรับชั้นคุณภาพ C แล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าของน้ำหนักร้อยละของน้ำหนักร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอย หากมีค่าของน้ำหนักร้อยละของน้ำหนักร้อยละ 6 ส่วนปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของไดโซเดียมออกไซด์มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 เนื่องจากในเถ้าลอยที่มีปริมาณปูนขาวอิสระสูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali Aggregate ขึ้นได้ อย่างไรก็ตามเถ้าลอยที่มีปริมาณของไดโซเดียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 1.5 จะนำมาใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาได้ก็ต่อเมื่อผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

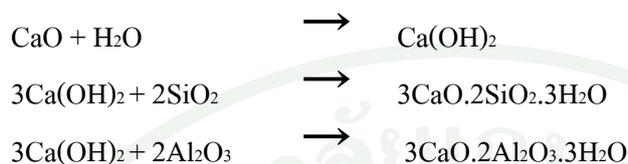
### ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการผสมเถ้าลอยลงไปในดิน

1. Flocculation (Cation Exchange) เมื่อผสมเถ้าลอยลงไปในดินเหนียว กลุ่มอออนบวกที่มีอยู่ในเถ้าลอยเช่น แคลเซียมและแมกนีเซียมอออนจะเข้าไปแทนที่หรือแลกเปลี่ยนกับโซเดียมอออนที่ผิวของอนุภาคของดินเหนียวจนกระทั่งสมดุล ทำให้ประจุลบตกค้างน้อยกว่า การผลักรันของอนุภาคของดินเหนียวน้อยลง ทำให้อนุภาคดินเหนียวมีโอกาสรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนได้ นอกจากนี้เมื่อมีการเติมเถ้าลอยลงในดิน ค่าความเป็นกรดต่างจะสูงขึ้นเนื่องมาจากเถ้าลอยมีค่า pH อยู่ระหว่าง 11 – 12.5 คือเถ้าลอยจะช่วยทำให้สภาวะแวดล้อมมีความเหมาะสมในการแลกเปลี่ยนอออนมากขึ้น (Nagamuthu , 1990)

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้ จะทำให้ความเหนียวของดินลดลงทำให้ดินร่วนขึ้น ดังนั้นเถ้าลอยจึงมีประโยชน์ที่จะนำมาใช้กับวัสดุที่มีความเหนียวสูงและดินที่มีปริมาณน้ำมาก เช่น ดินเหนียว ซึ่งยากต่อการนำมาใช้งานเพราะบดอัดลำบาก ซึ่งหากนำมาผสมกับเถ้าลอยจะทำให้บดอัดได้ง่ายขึ้น นอกจากการใช้เถ้าลอยลดค่าความเหนียวของดินแล้วยังสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินกระจายตัว โดยช่วยลดการกระจายตัวของดินได้เป็นอย่างดี

2. Cementation (Pozzolanic Reaction) เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานตามธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์, เหล็กออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ โดยทั่วไปจะมีลักษณะป็นฝุ่นเมื่อสัมผัสกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะภายใต้สภาวะอุณหภูมิปกติ แคลเซียมออกไซด์ที่มีอยู่บ้างในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์และต่อไปจะเกิดเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานีระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์

กับซิลิกา และอลูมินาที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในอนุภาคของเถ้าลอยกลายเป็นสารใหม่ คือแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปของสมการเคมีดังต่อไปนี้



การแข็งตัวของสารเชื่อมประสานนี้จะเพิ่มขึ้นตามอายุ ตั้งแต่เริ่มทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกไปนานนับปี เถ้าลอยลิกไนต์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมีเช่นนี้จะมีน้ำหนักไม่สูญเสียความแข็งแรงเมื่อเปียกน้ำ

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เถ้าลอย

สมชัย (2535) ได้ทดลองทำการสร้างชั้นรองพื้นทางโดยใช้ดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะดินที่ใช้เป็นดินเหนียวแข็ง , กรวดปนดิน และทราย ผสมเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะในอัตราส่วน 1 : 2, 1 : 2 และ 1 : 3 โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าค่า Field C.B.R. ในช่วงก่อสร้าง (อายุ 3 – 4 วัน) มีค่าอยู่ในช่วง 32 – 65% , 81 – 110% และ 51 – 135% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทดลองสร้างชั้นรองพื้นทางโดยใช้เถ้าลอยบดอัดเพียงอย่างเดียวพบว่ามีค่า Field C.B.R. มีค่าสูงกว่า 100% ทั้งสิ้น

อนิรุทธ์ (2540) ได้ทดลองปรับปรุงคุณภาพของดินเม็ดละเอียดในกลุ่ม CL ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ โดยใช้อัตราส่วนผสมในช่วง 0 – 15% ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การผสมเถ้าลอยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความชื้นเหนียวและคุณสมบัติด้านการบดอัดได้น้อยมาก โดยค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า Liquid Limit และ Plasticity Index มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ส่วนค่า C.B.R. นั้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุของการบ่ม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่า C.B.R. มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยอย่างชัดเจน โดยพบว่าส่วนผสมที่อัตราการผสมเถ้าลอย 15% บดอัดแน่นที่ 95% Relative Compaction(Modified) มีค่า Soaked C.B.R. ที่อายุ 28 วันสูงถึง 36 % และเมื่อผสมปริมาณเถ้าลอยมากกว่า 15% หรือที่อายุการบ่มมากกว่า 28 วันพบว่ามีค่า C.B.R. อาจเพิ่มขึ้นอีกไม่มากนัก

ศรัณย์รัฐ (2545) ได้ศึกษาถึงการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน โดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยเป็นดินชนิด CH มีค่าความเป็นพลาสติกสูงถึง 60.2 % มีค่ากำลังรับน้ำหนักเพียง 0.08 – 0.21 กก./ตร.ซม. ผลการปรับปรุงคุณภาพของดินพบว่าดินที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เพียงอย่างเดียวมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อยในระยะแรกเท่านั้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ขึ้นไม่ทำให้การพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ในขณะที่การใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมต่างๆสามารถช่วยในการพัฒนากำลังได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนควรมีการใช้ปูนขาวและเถ้าลอยร่วมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดประสิทธิผลในการพัฒนากำลังของดินได้เป็นอย่างดี

Timimi *et al.* (1998) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้ผสมดินเหนียวเพื่อลดการกำจัดเถ้าลอยและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมด้วย ผลการทดลองพบว่าดินเหนียวผสมเถ้าลอยให้ผลดีทางด้านกำลังและความทนทาน

Rhee (1981) ได้ทดลองนำดินที่จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นดินในกลุ่ม Silty Clay ซึ่งมีค่า Plasticity Index ประมาณ 28.6% มาผสมกับปูนซีเมนต์, ปูนขาว, ปูนขาวผสมเถ้าลอย, เถ้าลอยและเถ้าลอยผสมยิปซัมผลการทดสอบในดินผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 9% และ 18% ของน้ำหนักดินแห้ง พบว่ากำลังที่ 28 วันของดินที่ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 18% มีค่าใกล้เคียงกับดินที่ผสมซีเมนต์ 9% ซึ่งมีค่าประมาณ 200 ตันต่อตารางเมตร แสดงว่าสามารถนำเถ้าลอยไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินได้โดยไม่ต้องผสมสารผสมอื่นๆเพิ่มและยังพบว่าอัตราการเพิ่มของกำลังจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

## เศษปูนขาว

### คุณลักษณะโดยทั่วไปของเศษปูนขาว

เศษปูนขาว คือ กากหรือของเหลือทิ้งที่มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีเทาหรือขาวขุ่น มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานตามธรรมชาติ เนื่องจากประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะเป็นผงร่วนไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำในปริมาณที่เหมาะสมและอายุการบ่มมากขึ้นจะแข็งตัวได้ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่แข็งตัวได้อันเนื่องมาจากเศษปูนขาวมีปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) ปนอยู่มากพอที่จะ

ทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไปกับซิลิกาและอลูมินาจนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต

### ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการผสมเศษปูนขาว

เศษปูนขาวเป็นรูปแบบหนึ่งของปูนขาวโดยมีส่วนประกอบทางเคมี อันประกอบด้วย CaO ประมาณร้อยละ 53 ซึ่งอาจอยู่ในรูปของปูนขาวไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เมื่อมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องจะทำปฏิกิริยาไม่รุนแรง และเกิดสารผลิตภัณฑ์ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น

ปฏิกิริยาเคมีของดินหลังผสมแคลเซียมออกไซด์ประกอบด้วยปฏิกิริยา อันได้แก่ ปฏิกิริยา Hydration และ Flocculation ในช่วงเริ่มต้น และปฏิกิริยาในระยะยาว อันได้แก่ Cementation และ Carbonation ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระยะยาว (Hausmann, 1990)

1. Hydration ปูนขาวในรูปของแคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำในดินทันทีที่ถูกผสมก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และสร้างรูปร่างโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันมากบ้างน้อยมากตามขนาดคละของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ปรับปรุงแล้วยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างในมวลดิน ทำให้ลดการซึมน้ำและการบวมตัวของมวลดินรวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบ ๆ อีกด้วย การทำปฏิกิริยาเช่นนี้จะมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีความชื้นสูง ในการผสมจะทำให้เกิดความร้อน ซึ่งความร้อนที่แผ่ออกไปจะมีผลต่อการทรุดตัวของดินอีกด้วย

2. Flocculation หรือขบวนการจับตัวกันของเม็ดดิน (Agglomeration) หลังจากเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงในดิน ทำให้อนุภาคขนาดเท่าดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้นกล่าวคือ อีออนบวกจากสารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเข้าไปในมวลดิน จะเข้าไปจับตัวบนผิวของอนุภาคขนาดเท่าดินเหนียว สารซิลิเกตจะละลายเข้าสู่โพรงน้ำก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานส่งผลให้เม็ดดินมีโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อความเข้มข้นของอีออนสูงขึ้น จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดินเหนียว ทำให้ Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง โครงสร้างของดินจะมีความมั่นคงขึ้น

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้ จะทำให้ความเหนียวของดินเหนียวลดลงซึ่งทำให้ดินร่วนซุย ดังนั้นปูนขาวจึงมีประโยชน์ที่จะนำมาใช้กับวัสดุที่มีความเป็นพลาสติกสูงๆ และดินที่มีปริมาณน้ำมาก ซึ่งยากต่อการใช้งานเพราะบดอัดได้ลำบาก ซึ่งเมื่อผสมปูนขาวจะทำให้บดอัดง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ปูนขาวในการลดค่าความเหนียวของดินอีกด้วย

3. Cementation (Pozzolanic Reaction) หรือการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาในช่วงนี้มักจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ใหม่สารซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และ/หรืออลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งจะก่อให้เกิดคุณสมบัติเชื่อมประสานตัวซึ่งกันและกัน กล่าวคือในขบวนการของการเติมปูนขาวภายหลังการเติมลงดิน ค่าความเป็นด่างจะสูงขึ้นที่สภาวะ pH สูงเช่นนี้การชะละลายของ Silica และ Alumina ในดินเพิ่มมากขึ้น โดย Silicate ที่สลายตัวออกจากโครงสร้างของอนุภาคดินมาทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca}^{2+}$  แล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ ได้แก่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งเป็นสารที่แข็งแรงตามเวลาและเชื่อมประสานเม็ดดินเข้าด้วยกันส่งผลให้ดินมีกำลังสูงขึ้น

Diamond and Kinter (1965) พบว่าปฏิกิริยาระหว่างดินกับปูนขาวนั้น นอกจากจะได้สารประกอบ CSH แล้วยังได้สารประกอบประเภท Calcium Aluminate Hydrate (CAH) อีกด้วย ดังสมการ



สาร CSH ที่เกิดขึ้นจากดินผสมปูนขาวเป็นสารชนิดเดียวกันกับสารที่เกิดในดินผสมซีเมนต์ แต่แตกต่างกันที่สาร CSH ในดินผสมปูนขาวเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic ระหว่าง  $\text{Ca}^{2+}$  กับซิลิกาในดิน ส่วนสาร CSH ในดินผสมซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด CAH โดยพื้นฐานแล้วจะเกิดขึ้นทันที และจะเกิดที่จุดต่อระหว่างขอบและผิวหน้าของดินเดิม สำหรับสารประกอบ CSH จะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า แรงยึดเกาะซึ่งเกิดจากสารประกอบ CAH จะไม่มีความแข็งแรงเหมือนแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ของสารประกอบ CSH

Ruenkairergsa (1982) กล่าวว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดินความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอาจจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เต็มที่ หากมีสารประกอบอื่นๆ อยู่ในมวลดินนั้นด้วย เช่น สารอินทรีย์ และซัลเฟต จะทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง โดยจะแบ่ง  $\text{Ca}^{2+}$  มาจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction ทำให้อัตราการเพิ่มของความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง สารประกอบของเหล็ก เช่น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ที่เคลือบอยู่ในโครงสร้างของดินก็สามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลงได้เช่นกัน

ปฏิกิริยา Cementation เป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่จำกัดค่าหนึ่ง ถ้ามีการใช้ปูนขาวเพิ่มมากขึ้นกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดิน ปูนขาวที่เพิ่มขึ้นนี้จะไม่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้น และอาจทำให้กำลังลดลงด้วย

4. การเกิดสารประกอบคาร์บอเนต (Lime Carbonation) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ในสารเพิ่มเสถียรภาพจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$  หรือ  $3\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) กับน้ำ ดังสมการ



$\text{CaCO}_3$  ที่เกิดขึ้นจะทำให้ Ca อีออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ลดลง ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate ให้ช้าลงอันเป็นผลให้กำลังของดินผสมปูนขาวช้าลงกว่าปกติ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้มีผลเพียงเล็กน้อยแต่ก็ไม่ควรให้เกิดขึ้นมากเนื่องจากจะทำให้การทำปฏิกิริยาอื่นๆ ลดน้อยลง

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนขาว

ชนิดาวรรณ และ ชีรเชษฐ์ (2530) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยปูนขาวโดยผสมในปริมาณ 1- 12 % ของน้ำหนักดินแห้ง พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงและค่า UCS เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณปูนขาว 7 % เมื่อเพิ่มปริมาณปูนมากขึ้นค่า UCS ก็จะไม่เพิ่มขึ้นแล้ว

เกษม และคณะ (2531) ได้ศึกษาวิจัยโดยปรับปรุงดินเหนียวด้วย Hydrated Lime พบว่าค่า LL และค่า PI ของดินลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมปูนขาว 5% บ่ม 14 วัน ส่วนค่า PL, ค่ากำลังของดิน และค่า CBR จะเพิ่มขึ้นหลังจากบ่ม 14 วันขึ้นไปและยังสรุปว่าควรใช้ปูนขาวผสมที่ 5% เหมาะสมที่สุดเนื่องจากประหยัดและ Workability สูง ซึ่งการนำไปใช้งานถนนได้สรุปความเหมาะสมของดินเมื่อปรับปรุงแล้วได้ดังนี้

- ผสมปูนขาว 5% บ่ม 7 วัน ให้ค่า CBR 10% เหมาะใช้เป็นวัสดุคัดเลือก
- ผสมปูนขาว 7% บ่ม 30 วัน ให้ค่า CBR 25% เหมาะใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง
- ผสมปูนขาว 9% บ่ม 30 วัน ให้ค่า CBR 42% เหมาะใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

บุญเทพ (2539) ได้กล่าวว่ปูนขาวเหมาะกับการผสมดินเหนียวมากกว่าดินทราย และเหมาะกับพื้นที่ที่มีอากาศร้อน ปกติดินเม็ดหยาบใช้ปูนขาว 3-7 % โดยน้ำหนักดินแห้ง และดินเม็ดละเอียดใช้ปูนขาว 5-10 % โดยน้ำหนักดินแห้ง

พานิช และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปูนขาว ซิลิกาซีเมนต์ และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ต่อความสามารถในการซึมน้ำของดินกำแพงแอสโดยผสมดินกำแพงแอสด้วยปูนขาว ซิลิกาซีเมนต์ และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ในอัตราส่วน 0% 2% 4% 6% 8% และ 10% โดยน้ำหนัก ด้วยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่อายุการบ่ม 4, 7 และ 28 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินกำแพงแอสที่ผสมปูนขาว ซิลิกาซีเมนต์ และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 จะมีแนวโน้มลดลงตามเปอร์เซ็นต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 4% ค่า % CBR ของดินที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 จะมีค่ามากกว่า 20 และมากกว่าดินที่ผสมซิลิกาซีเมนต์และปูนขาวตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ยังมีค่าต่ำกว่าดินที่ผสมซิลิกาซีเมนต์และปูนขาวตามลำดับ แม้ว่าราคาของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 จะสูงกว่าซิลิกาซีเมนต์ และต่ำกว่าปูนขาวแต่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ก็ยังมีความเหมาะสมกว่าซิลิกาซีเมนต์ และปูนขาว ดังนั้นปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 4% ขึ้นไปจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินกำแพงแอสทั้งในระยะสั้น ระยะยาว และทางเศรษฐศาสตร์

ศิริศักดิ์ (2550) ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวจากบริเวณภาคเหนือตอนล่างด้วยการผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวในปริมาณต่างๆ (0%, 2%, 5%, 8% และ 10%) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยทำการทดสอบ CBR (soaked) และวัดการบวมตัวหลังแช่น้ำหลังจากถูกบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน พบว่าเมื่อผสมซีเมนต์ในปริมาณ 8% ของน้ำหนักดินแห้ง ดินจะมีคุณสมบัติเป็น Frictional material และเมื่อผสมที่ปริมาณซีเมนต์ 10% ดินจะมีคุณสมบัติเป็น Non frictional material สำหรับการปรับปรุงด้วยการผสมปูนขาวจะมีคุณสมบัติด้านกำลังต่ำกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ และมีค่า Stiffness ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีคุณสมบัติเด่น คือ สามารถลดการบวมตัวได้ดีและเร็วกว่าดินผสมซีเมนต์

Wang (1963) ได้ทำการวิจัยและแนะนำว่าควรใช้ปูนขาว 2-5% ในการปรับปรุงดินที่มีขนาดเม็ดหยาบ และควรใช้ปูนขาว 3-7% ในการปรับปรุงดินเม็ดละเอียด

Woo (1971) ได้ศึกษาวิจัยการใช้ปูนขาวผสมดินลูกรังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณปูนขาวมากขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลง ค่าปริมาณความชื้นจะมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Wet Compressive Strength กับปริมาณปูนขาว จะมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งพาราโบลาต่ำกว่า ปริมาณปูนขาวชนิด Hydrated Lime ร้อยละ 3 จะให้ค่า Wet Compressive Strength สูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่าง Activity Ratio กับ Wet Compressive Strength เป็นเส้นตรง

Ruenkraitersa (1982) ได้กล่าวว่า ปริมาณปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปในดินที่มี Plasticity Index สูงก่อนที่จะผสมซีเมนต์จะให้ค่า Plasticity Index ของดินลดลงได้มากและทำให้ดินผสมกับซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น

Brom (1984) กล่าวว่า เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงคุณภาพดินในพื้นที่แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การใช้ซีเมนต์จะมีความเหมาะสมกว่าการใช้ Quicklime เพราะ ซีเมนต์มีราคาถูกกว่า Quicklime อีกทั้งการเก็บรักษา Quicklime ทำได้ยากเพราะสภาพภูมิอากาศมีความชื้น และซีเมนต์สามารถปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติสูงขึ้นอย่างชัดเจนและ Quicklime จะมีขีดจำกัดในการปรับปรุงคุณภาพของดินอยู่

จากวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้สามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

นักวิจัย	วัสดุที่เกี่ยวข้อง				ผล
	BA	CH	FA	LP	
นิรชร (2539)	●				ได้ศึกษาได้ศึกษาเกี่ยวกับเตาแม่เมาะ โดยนำมาใช้เป็นมวลละเอียด ในแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่าคุณสมบัติในเรื่องค่าการคงตัวเท่านั้น ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนด
มนตรีและ คณะ(2549)	●				ที่ปริมาณปูนขาวที่ 5 % ให้ค่า CBR แบบแช่น้ำ สูงสุดที่ 57.4 % และ เกี่ยวกับเตาสามารถพิจารณาใช้เป็นวัสดุมวลเบาในคันทางได้
สมัชชา (2549)	●			●	ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบขอนแก่น โดยใช้ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเกี่ยวกับเตา โดยใช้เกี่ยวกับเตาที่ล้างบน ตะแกรง 325 ในช่วง 15 - 20% เป็นสารผสมเพิ่ม
จุฑาทิพย์ (2552)	●				ศึกษาปริมาณเกี่ยวกับเตาที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินทราย และหินคลุก หินคลุกผสมเกี่ยวกับเตาและทรายผสมเกี่ยวกับเตา มีการ พัฒนาค่า CBR สูงขึ้นทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ เมื่อผสมเกี่ยวกับเตาที่ 25% มีค่าสูงสุด และค่า CBR เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม
วิเศษ (2552)	●				ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเกี่ยวกับเตามาก ขึ้นค่า Plasticity Index ลดลง ค่า Unsoaked และ Soaked CBR มีค่า เพิ่มสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วลดต่ำลง โดยให้ค่าที่เหมาะสมที่อัตรา ส่วนผสม 0-10 และ 25% ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D
กิตติศักดิ์ (2553)	●			●	เมื่อผสมปริมาณเกี่ยวกับเตาและปูนขาวเพิ่มขึ้น ค่า PI ลดลง, $\gamma_d$ max ลดลง, $W_{opt}$ เพิ่มขึ้น, ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. มีค่าเพิ่มสูงมาก ที่สุด คือประมาณ 40% ในดินลูกรังเกรดผสม B และ D
รณภูมิ (2553)	●			●	เมื่อดินลูกรังผสมเกี่ยวกับเตาและเศษปูนขาว เมื่อปริมาณเกี่ยวกับเตา เพิ่มขึ้น $\gamma_d$ max ลดลง, $W_{opt}$ เพิ่มขึ้น, ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. มีค่าเพิ่มให้ค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 10 และ 25 % ของดินลูกรังเกรด B และ D และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม
อุมพร (2553)	●			●	อัตราส่วนของสารผสมเพิ่มระหว่างเกี่ยวกับเตาและเศษปูนขาวที่ เหมาะสมคือ 3:7 โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม
K. Torii and M. Kawamura (1991)	●		●	●	นำถ้ำลอยผสมเกี่ยวกับเตาแล้วผสมสารผสมเพิ่มปูนขาวหรือซีเมนต์ เพียงเล็กน้อยทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นและป้องกันการรุกราน เวลาจมน้ำของชั้นพื้นทางและ โครงสร้างตัวถนน
Chapman และคณะ (1996)	●			●	เกี่ยวกับเตาผสมปูนขาวที่จำนวน 1-6% พบว่าค่ากำลังแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) มีค่าเพิ่มขึ้น

## ตารางที่ 2 (ต่อ)

นักวิจัย	วัสดุที่เกี่ยวข้อง				ผล
	BA	CH	FA	LP	
Forteza และคณะ(2004)	●				นำเถ้ากั้นเตามาใช้เพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางและรองพื้นทางปรากฏว่ามีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนดในประเทศสเปน
umjoo Kim และคณะ (2006)	●		●		อัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยและเถ้ากั้นเตา เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยมากกว่าเถ้ากั้นเตา จะทำให้ $\gamma_d$ max ลดลง, Wopt เพิ่มขึ้น
Samon and Montananandh (1990)		●			ดินตะกอนจากอ่าวโอซากา จัดอยู่ในกลุ่มดิน OH ที่มีค่า PI สูง, LL เท่ากับ 110.6%, PL เท่ากับ 35.6% ,wi% อยู่ในช่วง 100% - 110%, Gs เท่ากับ 2.74
Montananandh (1990)		●			คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของตะกอนจาก Hedoro มีเปลี่ยนแปลงไปตามแร่ดินเหนียว แร่ที่พบ Quartz, Feldspar และสารประกอบได้แก่ Montmorillonite, Kaolinite, Halloysite และ Amorphous
US Army Corps of Engineer (1987)		●			มีการใช้ประโยชน์จากตะกอนจากการขุดลอก การนำเอาดินตะกอนดังกล่าวมาใช้ในการก่อสร้าง
Experts in Team(2004)		●	●		ดินตะกอนจากนอร์เวผสมกับซีเมนต์และเถ้าลอย มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งวัสดุในการสร้างพื้นที่แผ่นดินใหม่ได้
resselt et al. (1998)		●			นำเอาดินตะกอนท่าเรือของเมือง ฮัมบรูค ประเทศเยอรมนี มาใช้เป็นวัสดุกันซึมปกคลุมในงานบ่อฝังกลบขยะ
มชัย (2535)			●		ทำการสร้างชั้นรองพื้นทางโดยใช้ดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะ
อนิรุทธิ์ (2540)			●		การปรับปรุงคุณภาพของดิน CL ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความชื้นเหนียวและการบดอัดได้น้อยมาก
ศรัณย์รัฐ (2545)	●		●	●	การปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน โดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ พบว่าดินที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เพียงอย่างเดียวมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อยในระยะแรกเท่านั้น การใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยที่สัดส่วนผสมต่างๆ สามารถช่วยในการพัฒนากำลังได้เป็นอย่างดี

## ตารางที่ 2 (ต่อ)

นักวิจัย	วัสดุที่เกี่ยวข้อง				ผล
	BA	CH	FA	LP	
Timimi et al. (1998)		●	●		การนำเถ้าลอยมาใช้ผสมดินเหนียวพบว่าดินเหนียวผสมเถ้าลอยให้ผลดีทางด้านกำลังและความทนทาน
Rhee (1981)			●		สามารถนำเถ้าลอยไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน Silty Clay ได้โดยไม่ต้องผสมสารผสมอื่นๆเพิ่ม
Luenkraiters-a (1982)				●	การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดินความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอาจจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เต็มที่ หากมีสารประกอบอื่นๆ อยู่ในมวลดินด้วย เช่น สารอินทรีย์และซัลเฟต
ชนิดาวรรณ และ วีรเชษฐ (2530)				●	การปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยปูนขาวโดยผสมในปริมาณ 1- 12 % พบว่าค่า $\gamma_{dmax}$ ลดลงและค่า UCS เพิ่มขึ้นสูงสุดจนถึงปริมาณปูนขาว 7 %
เกษม และ คณะ (2531)		●		●	การปรับปรุงดินเหนียวด้วย Hydrated Lime พบว่าค่า LL และค่า PI ของดินลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมปูนขาว 5% บ่ม 14 วัน ส่วนค่า PL, ค่ากำลังของดิน และค่า CBR จะเพิ่มขึ้นหลังจากบ่ม 14 วันขึ้นไป
บุญเทพ (2539)		●		●	ปูนขาวเหมาะกับการผสมดินเหนียวมากกว่าดินทราย และเหมาะกับพื้นที่ที่มีอากาศร้อน ดินเม็ดหยาบใช้ปูนขาว 3-7 % และดินเม็ดละเอียดใช้ปูนขาว 5-10 % โดยน้ำหนักดินแห้ง
พานิช และ คณะ (2547)				●	ศึกษาผลกระทบของปูนขาว ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดิน กำแพงแฉกที่ผสมปูนขาวมีแนวโน้มลดลงตามเปอร์เซ็นต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น
ศิริศักดิ์ (2550)		●		●	ทำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวจากบริเวณภาคเหนือตอนล่างด้วยการผสมปูนขาว พบว่าสามารถลดการบวมตัวได้ดีและเร็วกว่าดินผสมซีเมนต์
Wang (1963)				●	ควรใช้ปูนขาว 2-5% ในการปรับปรุงดินที่มีขนาดเม็ดหยาบ และควรใช้ปูนขาว 3-7% ในการปรับปรุงดินเม็ดละเอียด
Woo (1971)				●	ปูนขาวผสมดินลูกรังเมื่อใช้ปริมาณปูนขาวมากขึ้น ค่า $\gamma_{dmax}$ ลดลง, $W_{opt}$ เพิ่มขึ้น ปริมาณปูนขาว 3% ให้ค่า Wet Compressive Strength สูงสุด
Luenkraiters-a (1982)				●	ปริมาณปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปในดินจะทำให้ค่า Plasticity Index ของดินลดลงได้มาก

## มาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในงานทาง

กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532) ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับชั้นพื้นทางไว้  
ดังนี้

1. Liquid limit ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่ระบุในแบบ
2. ดัชนีพลาสติกไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่ระบุในแบบ
3. เปอร์เซ็นต์การซัดสีไม่เกินร้อยละ 40
4. Lab CBR. ไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่กำหนดในแบบ

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. ชุดเครื่องมือทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน (มาตรฐาน ASTM D 422-63)
2. ชุดเครื่องมือทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (มาตรฐาน ASTM D 854-98)
3. ชุดเครื่องมือทดสอบ Atterberg 's Limits Test (มาตรฐาน ASTM D 2216-80 , D 4318-98)
4. ชุดเครื่องมือทดสอบ Atterberg's Limits Test (มาตรฐาน BS 1377:1990)
5. ชุดเครื่องมือทดสอบการบดอัดดินแบบ Modified Proctor Compaction Test (มาตรฐาน ASTM D 1557-91)
6. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบแกนเดียว Unconfined Compressive Strength (มาตรฐาน ASTM D 2166-00)
7. ชุดเครื่องมือทดสอบ California Bearing Ratio (มาตรฐาน ASTM D 1883-94)
8. ชุดเครื่องมือทดสอบความชื้นน้ำของดิน (มาตรฐาน ASTM D 2434-68)

### วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ถ้ำกั้นเตาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง
2. ตะกอนดินเหนียวจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง
3. ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง
4. เศษปูนขาวจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
5. น้ำ ที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำประปา

## สัญลักษณ์

### ตารางที่ 3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์	ความหมาย
BA	เถ้าก้นเตา
CH	ตะกอนดินเหนียว
FA	เถ้าลอย
LP	เศษปูนขาว
BC	เถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวในอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 80:20
FL	เถ้าลอยผสมเศษปูนขาว
ZAV	Zero air void line (เส้นแสดงปริมาณอากาศเป็นศูนย์)
Un	การทดสอบ CBR แบบไม่แช่น้ำ
So	การทดสอบ CBR แบบแช่น้ำ

### วิธีการ

#### คำจำกัดความ

วัสดุตั้งต้น คือ วัสดุผสมที่ได้จากการผสมเถ้าก้นเตาและตะกอนดินเหนียว

สารผสมเพิ่ม

1. เศษปูนขาว
2. เถ้าลอยผสมเศษปูนขาว

## ขั้นตอนการวิจัย

1. ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุเช่น ใ้ก้านเตา ใ้ลอย ตะกอนดินเหนียว และเศษปูนขาวด้วยการทดสอบ Atterberg's Limits Test, การทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน และการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

2. ทดสอบการบดอัดวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนที่จะผสมเช่น 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 ฯลฯ ของน้ำหนักแห้ง ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

3. ทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Unsoaked ของวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น

4. นำวัสดุตั้งต้นที่เตรียมไว้ในอัตราส่วนที่ดีที่สุดมาทดสอบหาค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plastic Index

5. หาอัตราส่วนที่ดีที่สุดของใ้ลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการทดสอบ Unconfined Compressive Strength

6. ทดสอบการบดอัดวัสดุตั้งต้นผสมกับสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วนต่างๆ ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

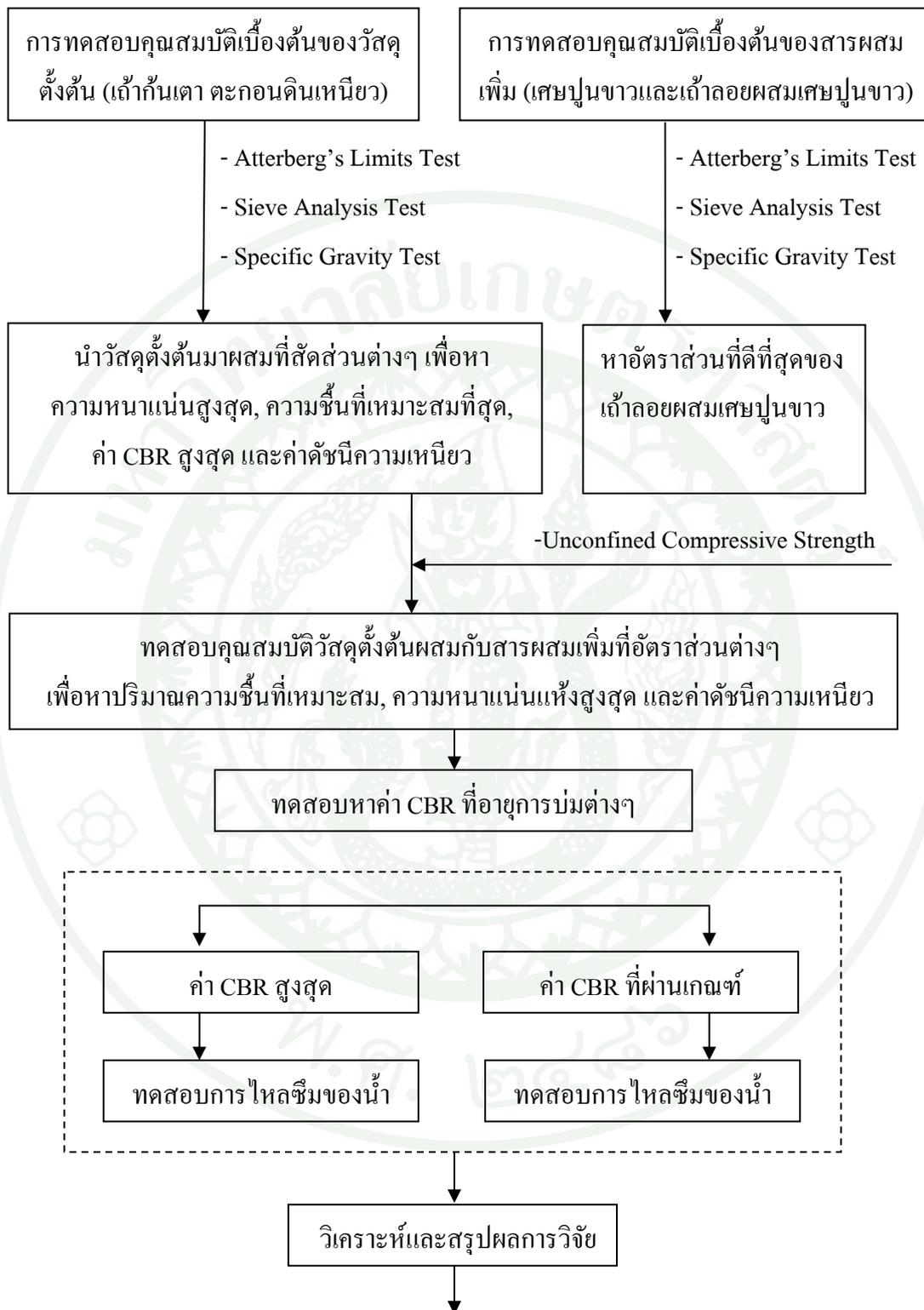
7. ทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Unsoaked และ Soaked ของวัสดุตั้งต้นผสมกับสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน

8. นำวัสดุตั้งต้นผสมกับสารผสมเพิ่มในอัตราส่วนต่างๆ โดยเพิ่มสารผสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และนำมาทดสอบหาค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plastic Index

9. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุตั้งต้นผสมกับสารผสมเพิ่ม ซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยวัสดุตั้งต้นผสมกับสารผสมเพิ่มจะทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

10. ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ





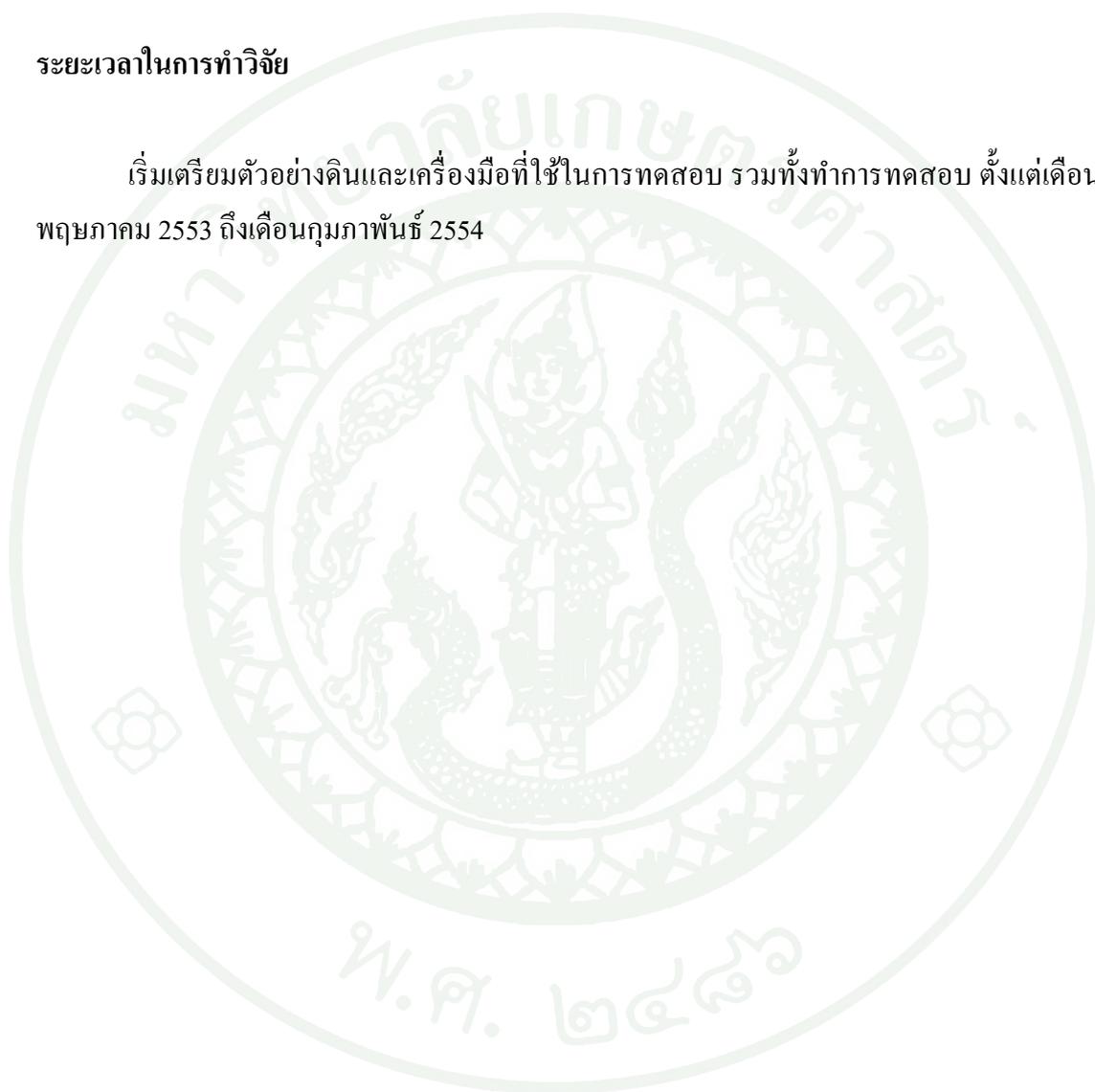
ภาพที่ 1 ขั้นตอนการวิจัยการปรับปรุงคุณภาพถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว

## สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย  
เกษตรศาสตร์

## ระยะเวลาในการทำวิจัย

เริ่มเตรียมตัวอย่างดินและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งทำการทดสอบ ตั้งแต่เดือน  
พฤษภาคม 2553 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2554



## ผลและวิจารณ์

### ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพและด้านวิศวกรรมของตัวอย่าง

ตัวอย่างเก้าก้อนเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาวที่ใช้ในการทดสอบ ได้จากการสุ่มตัวอย่าง จากกองเก้าก้อนเตา บ่อดินตะกอน กองเถ้าลอยและกองเศษปูนขาวของบริษัท BLCPPower นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมืองระยอง จังหวัดระยอง โดยตัวอย่างเก้าก้อนเตาส่วนใหญ่มีสีเทาเข้ม มีรูปร่างค่อนข้างเป็นเหลี่ยม ดินตะกอนมีลักษณะสีน้ำตาล เถ้าลอยมีสีเทาอ่อน มีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายซีเมนต์ เศษปูนขาวสีเทาปนด้วยปูนขาว จากการสุ่มตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินธรรมชาติที่ได้ดำเนินการไปแล้วมีดังนี้

### ผลการทดสอบ Atterberg 's Limits

#### ตารางที่ 4 การทดสอบ Atterberg 's Limits

กลุ่มตัวอย่าง	Atterberg's Limits		
	Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index
เก้าก้อนเตา	NP	NP	-
ตะกอนดินเหนียว(CH)	60	26	34
เถ้าลอย	36.71	26.31	10.40
เศษปูนขาว (Typical Lime, TL)	NP	NP	-

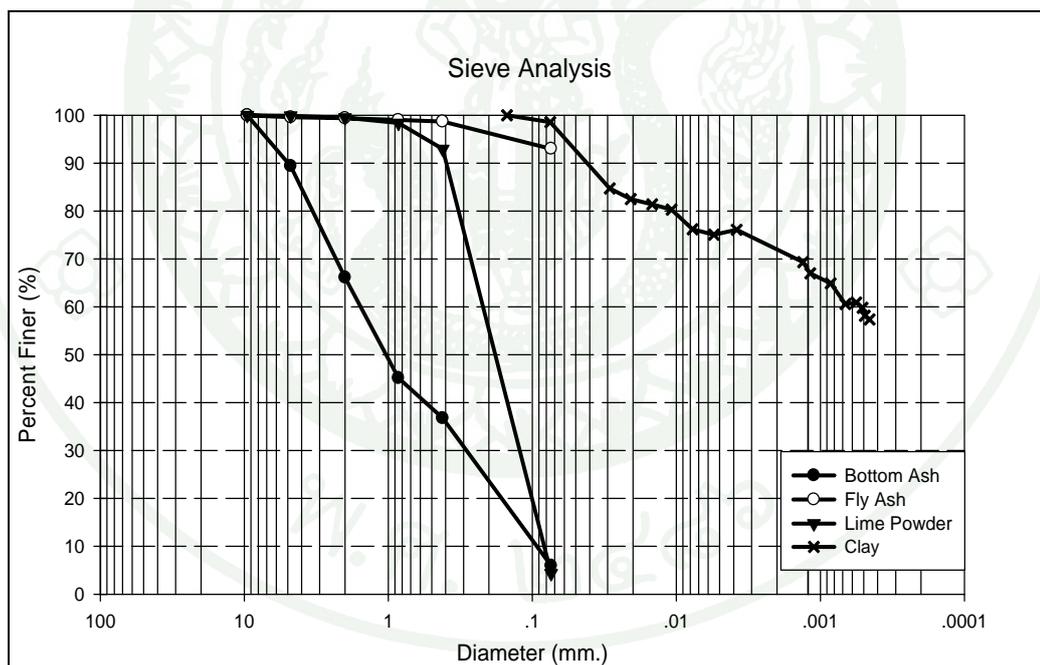
### ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

สุ่มตัวอย่างเก้าก้อนเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาวที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะต้องทำอย่างน้อย 3 ตัวอย่างแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

วัสดุที่ทดสอบ	ความถ่วงจำเพาะ
เถ้าก้นเตา	2.315 ( $\pm 0.050$ )
ตะกอนดินเหนียว	2.800 ( $\pm 0.100$ )
เถ้าลอย	2.265 ( $\pm 0.050$ )
เศษปูนขาว	2.880 ( $\pm 0.020$ )

ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน



ภาพที่ 2 การกระจายขนาดของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาว

จากภาพที่ 2 สามารถจำแนกดินตามระบบ AASHO Classification และระบบ Unified Soil Classification ดังแสดงตารางที่ 6

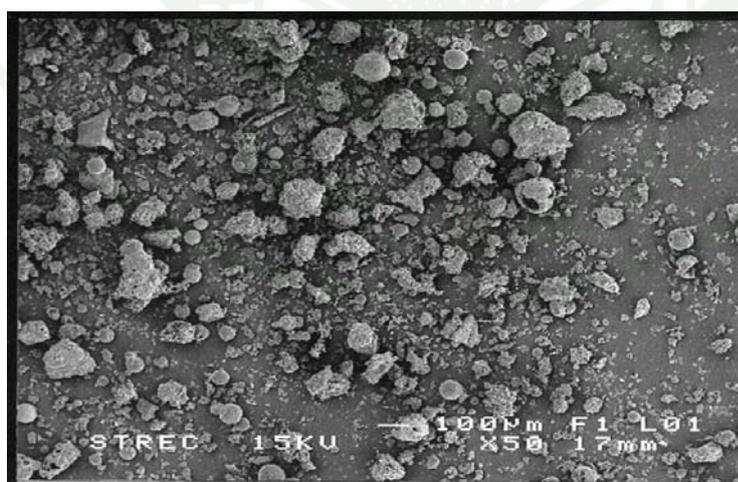
## ตารางที่ 6 การจำแนกประเภทของวัสดุทดสอบ

วัสดุที่ทดสอบ	AASHTO Classification	Unified Soil Classification
เถ้าก้นเตา	A-3(0)	SP
ตะกอนดินเหนียว	A-7-6(16)	CH
เถ้าลอย	A-4(8)	ML
เศษปูนขาว (Typical Lime )	A-3(0)	SP

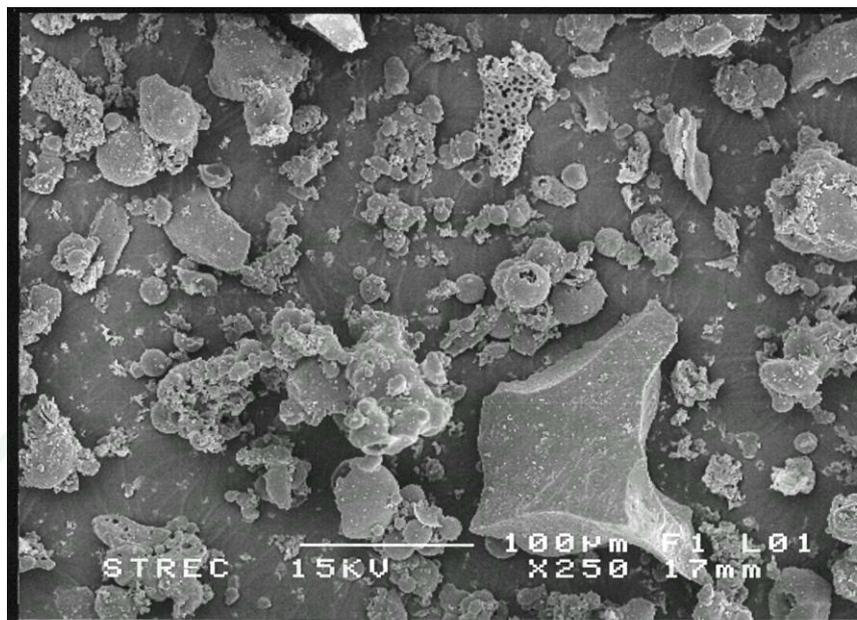
### ผลการทดสอบเพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวภายนอกของเถ้าก้นเตา

ทำการเตรียมเถ้าก้นเตาโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปใส่ไว้ในโถไล่ความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่ความชื้นออกจากเถ้าก้นเตา หลังจากนั้นนำไปใส่ในภาชนะที่จัดเตรียมไว้ก่อนนำไปทำการตรวจวิเคราะห์

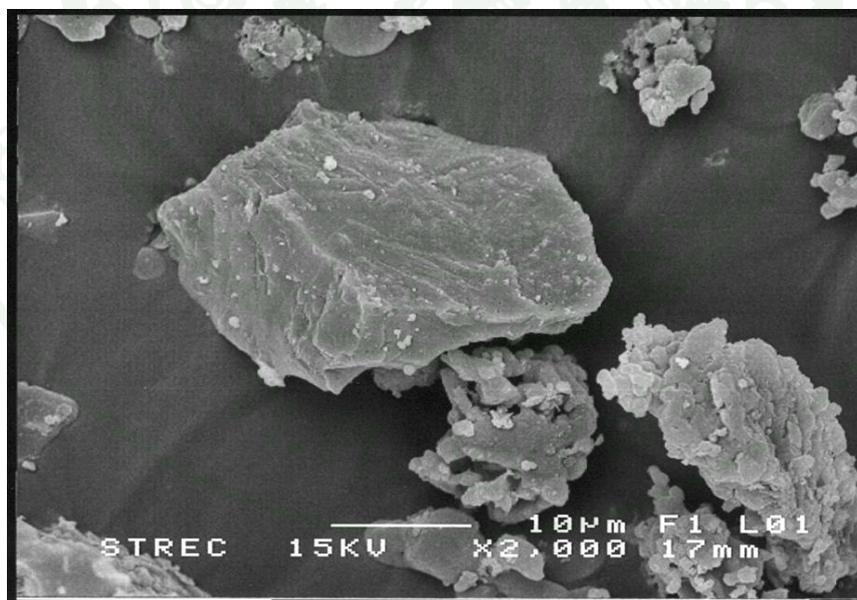
จากตัวอย่างภาพถ่ายเถ้าก้นเตาจากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ตรวจสอบที่กำลังขยายแตกต่างกัน จะพบว่าอนุภาคของเถ้าก้นเตานั้นมีขนาดที่แตกต่างและรูปร่างที่แตกต่างกันไปโดยจะมีลักษณะพื้นผิวทั้งที่เรียบและที่เป็นเป็นแบบขรุขระและมีลักษณะความเป็นเหลี่ยมคม ที่มุมของอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าก้นเตา (กำลังขยาย 50 เท่า)



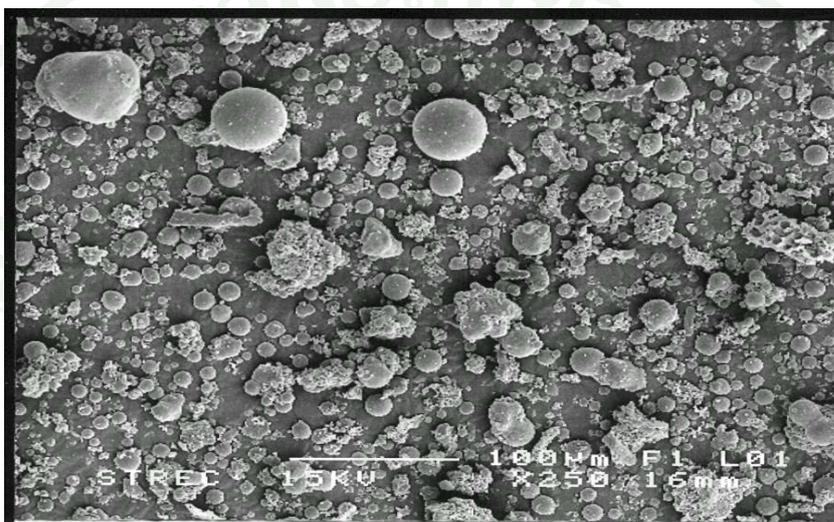
ภาพที่ 4 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคไคทินเตา (กำลังขยาย 250 เท่า)



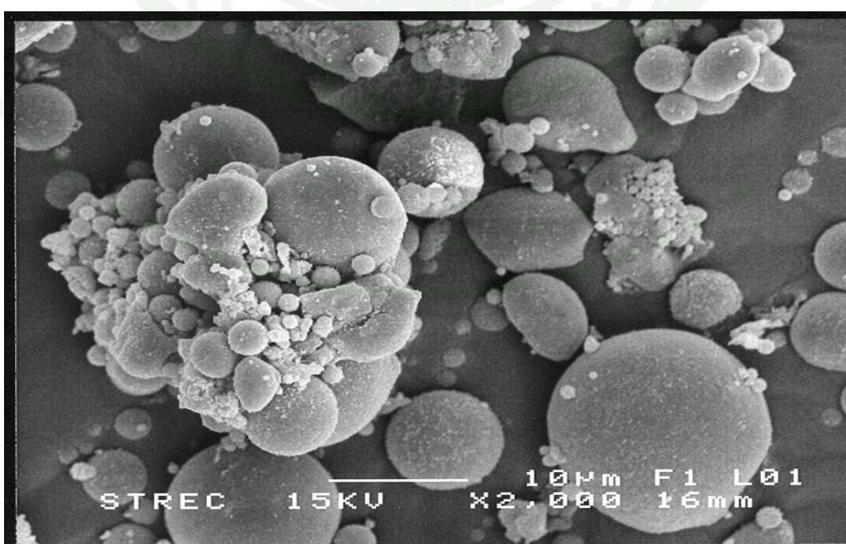
ภาพที่ 5 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคไคทินเตา (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

### ผลการทดสอบเพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวภายนอกของเถ้าลอย

เถ้าลอย มีลักษณะเป็นผงสีเทาคล้ายกับซีเมนต์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมครอน - 150 ไมครอน จากภาพถ่ายเถ้าลอย ในการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) มีลักษณะค่อนข้างกลม หรืออาจพบรูปร่างที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา และชนิดของถ่านหินดังแสดงในภาพที่ 6-8



ภาพที่ 6 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอย (กำลังขยาย 250 เท่า)



ภาพที่ 7 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอย (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

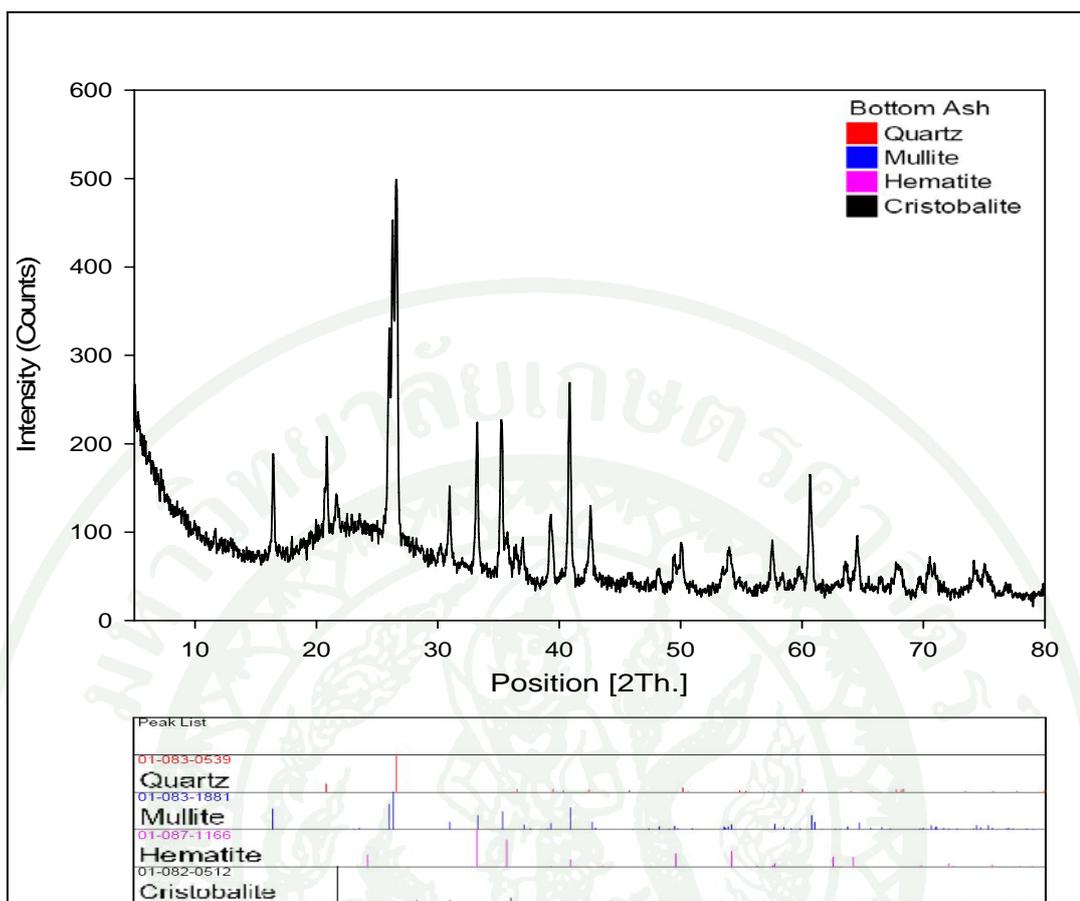


ภาพที่ 8 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอย (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

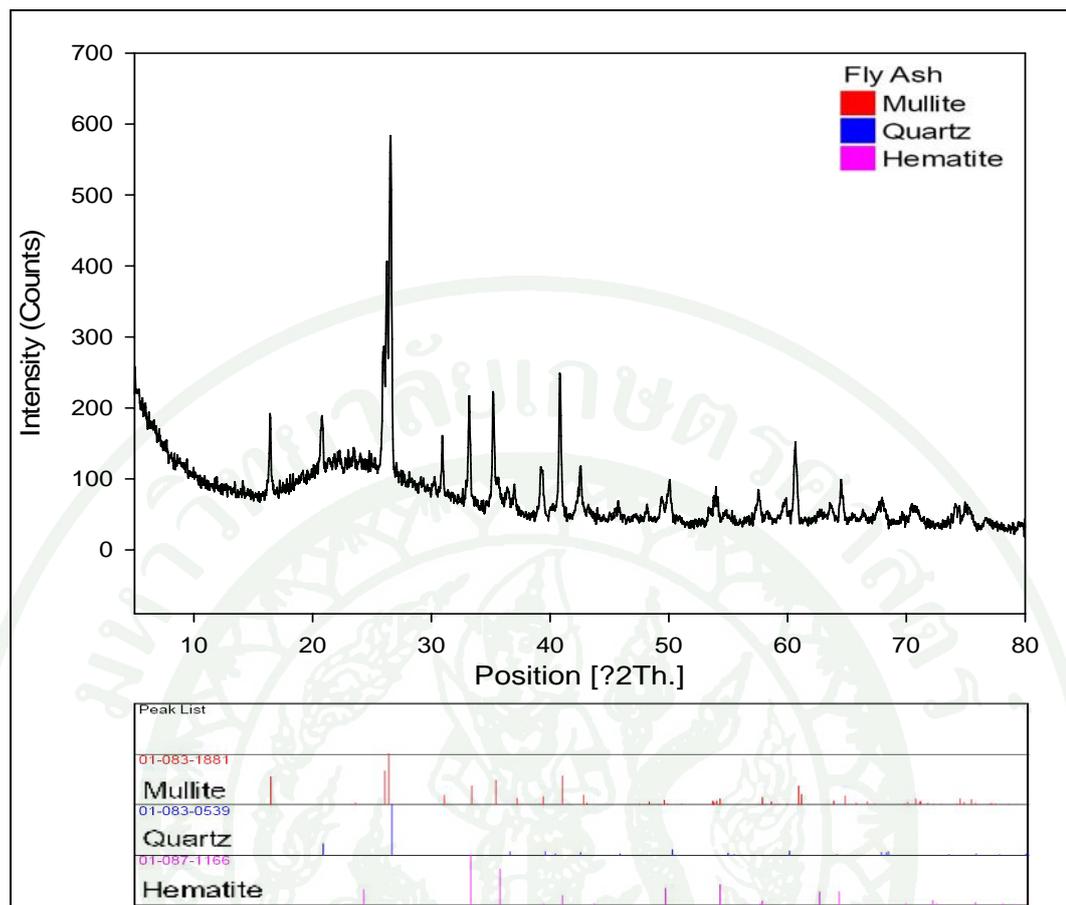
## ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารและปริมาณธาตุต่างๆ

### 1. การวิเคราะห์องค์ประกอบของสาร

เตรียมเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ  $105^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปใส่ไว้ในโถไล่ความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่ความชื้นออกจากเถ้าก้นเตา หลังจากนั้นนำไปบดให้ละเอียด ก่อนที่นำไปบรรจุในภาชนะที่จัดเตรียมไว้ก่อนนำไปทำการตรวจวิเคราะห์โดยในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction เพื่อทำการตรวจสอบหาชนิดขององค์ประกอบของเถ้าก้นเตาและเถ้าลอย โดยจะทำการทดสอบที่สภาวะ  $2\theta$  ตั้งแต่ 5 องศา ถึง 80 โดยมี scan step เท่ากับ 0.02



ภาพที่ 9 กราฟระหว่าง intensity และ theta ของถ้ำก้นเตาตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD



ภาพที่ 10 กราฟระหว่าง intensity และ theta ของเถ้าลอยตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD

จากผลการวิเคราะห์พบว่า กราฟ XRD ของเถ้าก้อนเตาที่ได้มีองค์ประกอบของสารหลายชนิดเป็นส่วนประกอบ ซึ่งเมื่อนำค่าที่ทดสอบและแปรผลเป็นกราฟนำมาเปรียบเทียบกับกราฟของสารมาตรฐานจึงสามารถสรุปได้ว่า เถ้าก้อนเตาที่นำมาทดสอบนี้มีองค์ประกอบของสารประเภทซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ quartz, mullite, hematite และ cristobalite ส่วนผลการวิเคราะห์ XRD ของเถ้าลอยพบว่า มีสารประกอบสารหลายชนิด ได้แก่ quartz, mullite และ hematite ซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นส่วนใหญ่

## การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ

โดยใช้วิธีวิเคราะห์คือ Wavelength dispersive X-ray Fluorescence spectrometer ซึ่งตัวอย่างที่นำไปทดสอบได้แก่ ถ้ำกั้นเตา ตะกอนดินเหนียว ถ้ำลอยและเศษปูนขาว ผลการวิเคราะห์มีดังนี้

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างวัสดุทดสอบ

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) *										
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ถ้ำกั้นเตา	0.97	0.82	22.74	55.92	0.39	0.05	1.18	2.27	2.15	0.18	11.88
ถ้ำลอย	0.82	0.69	22.27	60.13	0.84	0.47	1.22	1.75	1.83	0.10	6.72
เศษปูนขาว	<0.01	1.05	2.13	7.46	0.08	29.79	0.21	52.65	0.23	0.08	5.01
ตะกอนดินเหนียว	1.26	0.81	25.06	49.44	0.17	0.61	1.78	0.63	0.93	0.03	4.87

### หมายเหตุ \*

1. ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, “fundamental parameter calculation”
2. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูป oxide ของธาตุนั้นๆ

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าปริมาณธาตุส่วนใหญ่ของถ้ำกั้นเตา ถ้ำลอยและตะกอนดินเหนียวได้แก่ธาตุ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , SiO<sub>2</sub> , Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ส่วนเศษปูนขาวปริมาณธาตุส่วนใหญ่ได้แก่ SiO<sub>2</sub> , SO<sub>3</sub> , CaO ,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

จากการวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบในรูปของออกไซด์โดยวิธีการ X-ray Fluorescence spectrometer เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับถ้ำลอย ซึ่งมีข้อกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยจะใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์โดยแบ่งออกเป็นชั้นคุณภาพของถ้ำลอยออกเป็นชั้นคุณภาพ C

และชั้นคุณภาพ F มีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เป็นไปตามตารางที่ 8

ในส่วนผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของเศษปูนขาวโดยวิธีการ X-ray fluorescence spectrometer มีองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณดังตารางที่ 9 มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ประมาณ 2.90 ลักษณะทางกายภาพของเศษปูนขาวเป็นผงสีน้ำตาลขาว

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับเกณฑ์ชั้นคุณภาพ F และ C

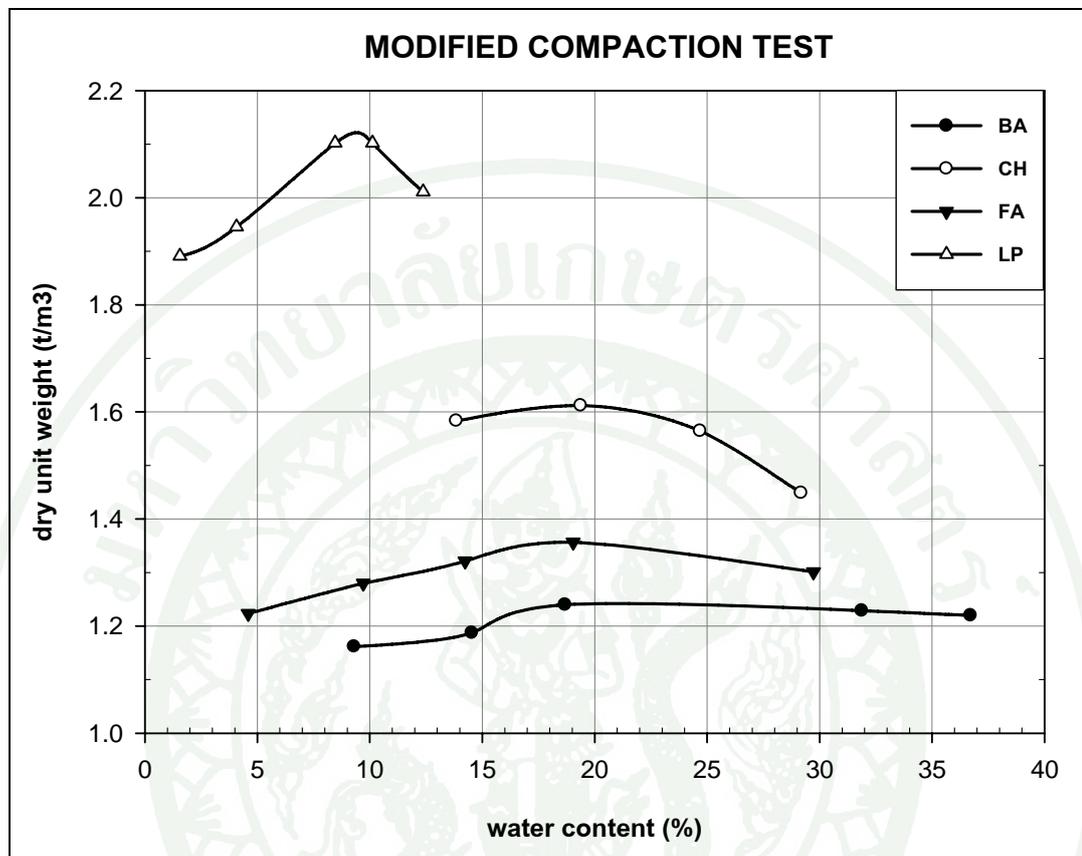
องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพเถ้าลอย		ตัวอย่าง เถ้าลอย	ตัวอย่าง เถ้าก้นเตา
	F	C		
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	>70	>50	89.12	90.54
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), max %	<10	>10	1.75	2.27
ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), max %	-	-	0.69	0.82
ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ), max %	5.0	5.0	0.47	0.05
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0	15.00	12.00
ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (Loss on Ignition, LOI), max %	6.0	6.0	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล
อัลคาไลน์ในรูปของไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), max %	1.5	1.5	0.82	0.97

ตารางที่ 9 องค์ประกอบทางเคมีในเศษปูนขาวเปรียบเทียบกับปูนขาวมาตรฐาน

คุณลักษณะ	คุณลักษณะทางเคมีและฟิสิกส์ของปูนสุก			เศษปูนขาว
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	ชั้นคุณภาพ 3	
แคลเซียมออกไซด์ ไม่น้อยกว่า	90	88	85	52.65
ซิลิกอนไดออกไซด์ ไม่เกิน	1.0	1.5	2.0	7.46
คาร์บอนไดออกไซด์ ไม่เกิน	2.5	3.0	3.5	—
สิ่งเจือปน				
- ไฮดรอกไซด์ (III) ออกไซด์	0.4	0.4	0.4	—
- ซัลเฟอร์	0.5	1.0	1.5	—
- อะลูมิเนียมออกไซด์	1.0	1.0	1.0	2.13
- แมกนีเซียมออกไซด์	1.8	2.0	2.0	1.05
ปริมาณสารที่ไม่ละลายน้ำ				
ไม่เกิน	7.0	9.0	12.0	—

ที่มา: มอก. 319 เล่ม 1-2551

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการบดอัดของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาว



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของวัสดุทดสอบ

จากภาพที่ 11 สามารถหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่พลังงานการบดอัด 56,000 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต ของวัสดุแต่ละชนิดได้ดังแสดงตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ปริมาณความชื้นเหมาะสม
	(ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	(%)
เถ้าก้นเตา	1.24	20
ตะกอนดินเหนียว	1.61	19.40
เถ้าลอย	1.36	18.30
เศษปูนขาว	2.11	9.20

จากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่าเศษปูนขาวมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมากที่สุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าน้อยที่สุดส่วนเถ้าก้นเตามีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดน้อยที่สุดและมีปริมาณความชื้นเหมาะสมมากที่สุด ซึ่งอาจมาจากอิทธิพลของค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างและค่าการกระจายตัวของตัวอย่างนั่นเอง

#### ผลการทดสอบคุณสมบัติ CBR ของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและ เศษปูนขาว

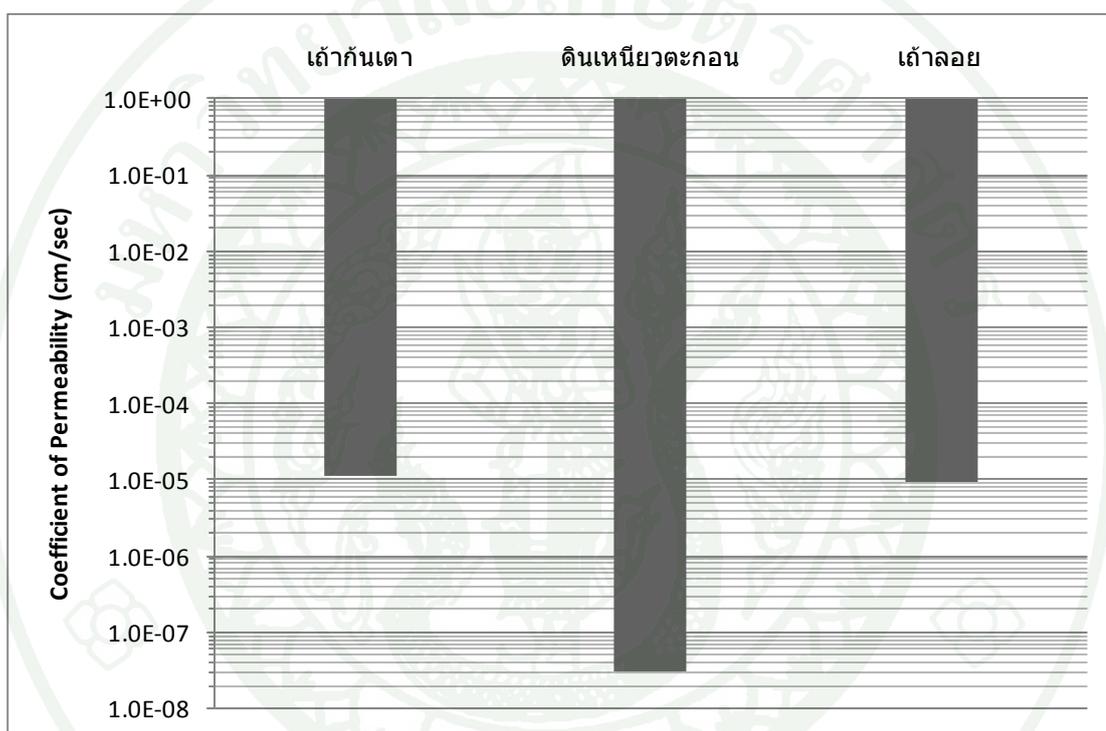
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังของวัสดุทดสอบโดยการทดสอบหาค่า California Bearing Ratio แบบ Unsoaked และ Soaked ที่พลังงานการบดอัด 56,000 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต ของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยและเศษปูนขาวแสดงไว้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	California Bearing Ratio (CBR.), (%)	
	Unsoaked	Soaked
เถ้าก้นเตา	53.43	46.67
ตะกอนดินเหนียว	8.98	-
เถ้าลอย	18.92	14.67
เศษปูนขาว	81.22	-

## ผลการทดสอบคุณสมบัติความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียวและเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอยด้วยวิธี Constant Head โดยใช้ความดันเข้าช่วย ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 12 และตารางที่ 12 พบว่าเถ้าก้นเตามีลักษณะความชื้นน้ำต่ำ เถ้าลอยลักษณะความชื้นน้ำต่ำมากส่วนตะกอนดินเหนียวมีลักษณะความชื้นน้ำเป็นแบบที่บ่น้ำเมื่อเปรียบเทียบเกณฑ์มาตรฐานดังแสดงตารางที่ 13



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอย

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตา ตะกอนดินเหนียว เถ้าลอย

วัสดุทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ(cm/s)
เถ้าก้นเตา	$1.16 \times 10^{-5}$
ตะกอนดินเหนียว	$3.05 \times 10^{-8}$
เถ้าลอย	$9.20 \times 10^{-6}$

### ตารางที่ 13 เกณฑ์ลักษณะความชื้นน้ำ

ค่า k (cm/sec)	ลักษณะความชื้นน้ำ
$>10^{-1}$	สูง
$10^{-1}-10^{-3}$	ปานกลาง
$10^{-3}-10^{-5}$	ต่ำ
$10^{-5}-10^{-7}$	ต่ำมาก
$<10^{-7}$	ที่บ้น้ำ

ที่มา: Terzaghi and Peck (1967)

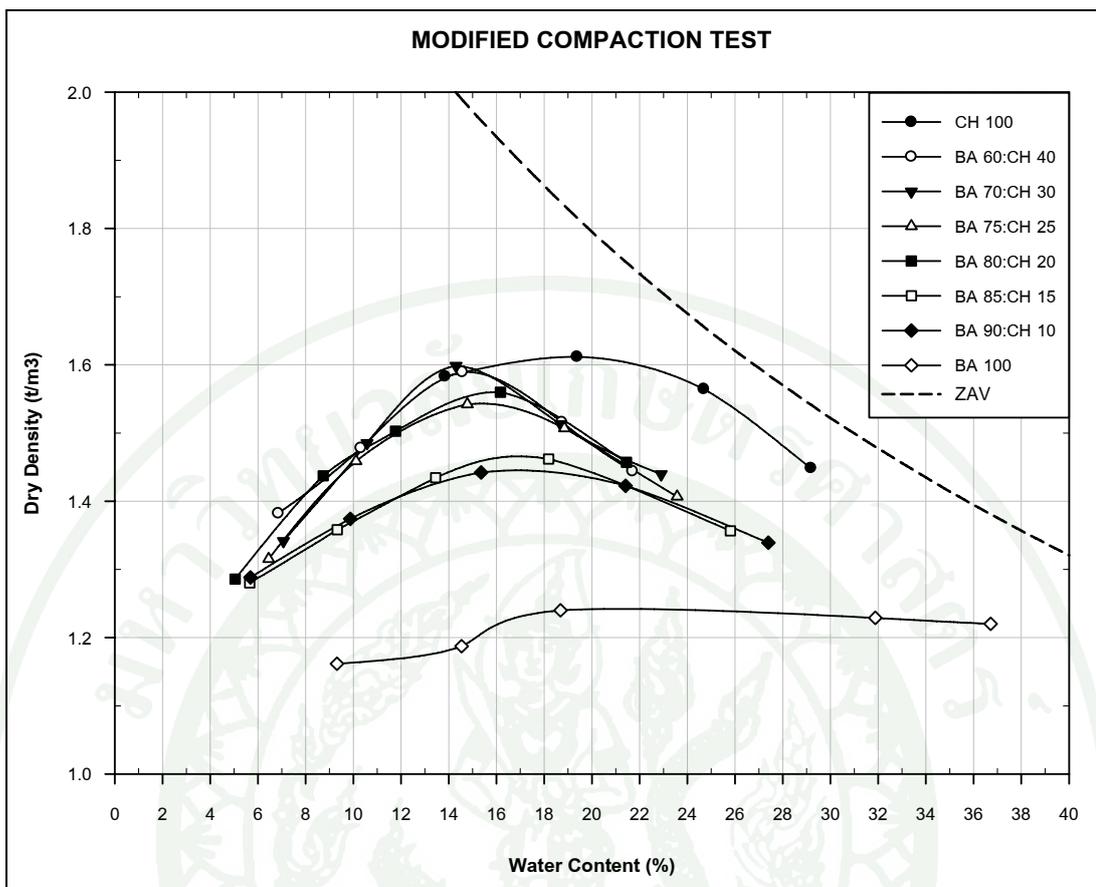
#### ผลการทดสอบหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดของเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว และเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว

#### ผลการทดสอบหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดของเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว

โดยการหาค่าความหนาแน่นสูงสุดสูงและค่าความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนที่ทดสอบ แล้วนำค่าที่ได้ไปทดสอบหาค่า CBR เมื่อได้ค่า CBR ของแต่ละอัตราส่วนแล้วก็นำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่า CBR สูงที่สุดและนำค่าที่ได้มาหาค่าความเหนียวต่อไป

#### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการบดอัด

เตรียมตัวอย่างเถ้าก้นเตาและตะกอนดินเหนียวในลักษณะน้ำหนักแห้งจากนั้นนำตะกอนดินเหนียวมาผสมเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนต่างๆเช่น เถ้าก้นเตา 90%โดยน้ำหนักแห้งต่อตะกอนดินเหนียว 10%โดยน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นทำการบดอัดโดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่พลังงานการบดอัด 56,000 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต แล้วเปลี่ยนอัตราส่วนไปเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของเก้า  
ก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว

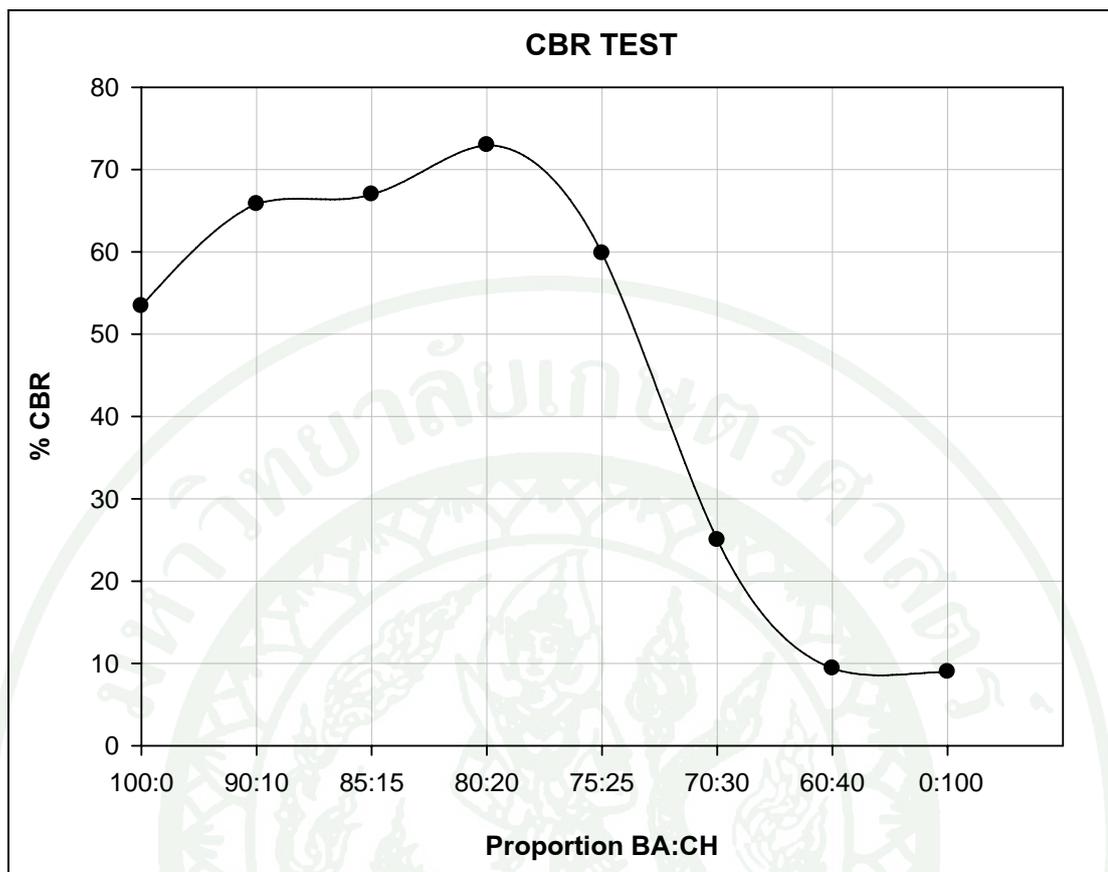
จากภาพที่ 13 สามารถหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่าง  
แต่ละอัตราส่วนได้ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	ความหนาแน่นแห้ง	ปริมาณความชื้น
	สูงสุด (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	เหมาะสม (%)
BA	1.24	20
CH	1.61	19.40
BA 90:CH 10	1.45	16.80
BA 85:CH 15	1.47	16.50
BA 80:CH 20	1.56	16.00
BA 75:CH 25	1.55	15.00
BA 70:CH 30	1.60	14.40
BA 60:CH 40	1.59	14.80

## 2. ผลการทดสอบคุณสมบัติ CBR

เมื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับค่าความชื้นที่เหมาะสมของแก็กกันเตาผสมตะกอนดินเหนียวแล้วนำค่าที่ได้มาทดสอบหาค่า % CBR แบบไม่แช่น้ำ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าในช่วงที่เพิ่มปริมาณตะกอนดินเหนียวมากขึ้นค่า % CBR จะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งค่า % CBR จะลดต่ำลงนั้นอาจเป็นเพราะว่าตะกอนดินเหนียวที่มีขนาดเม็ดละเอียดมากกว่าแก็กกันเตาจะเข้าไปอุดช่องว่างทำให้ดินมีขนาดผละที่ดีขึ้นและแน่นมากขึ้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนดินเหนียวมากยิ่งขึ้นไปอีกค่า % CBR กลับมีค่าลดลงเพราะปริมาณของเม็ดละเอียดมากเกินไปทำให้ค่ากำลังลดลง และสามารถหาอัตราส่วนแก็กกันเตาผสมตะกอนดินเหนียวที่ให้ค่า % CBR มากที่สุดคือที่อัตราส่วนแก็กกันเตา 80 % ตะกอนดินเหนียว 20% โดยน้ำหนักแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง%CBR กับอัตราส่วน BA:CH

### 3. ผลการทดสอบ Atterberg 's Limits

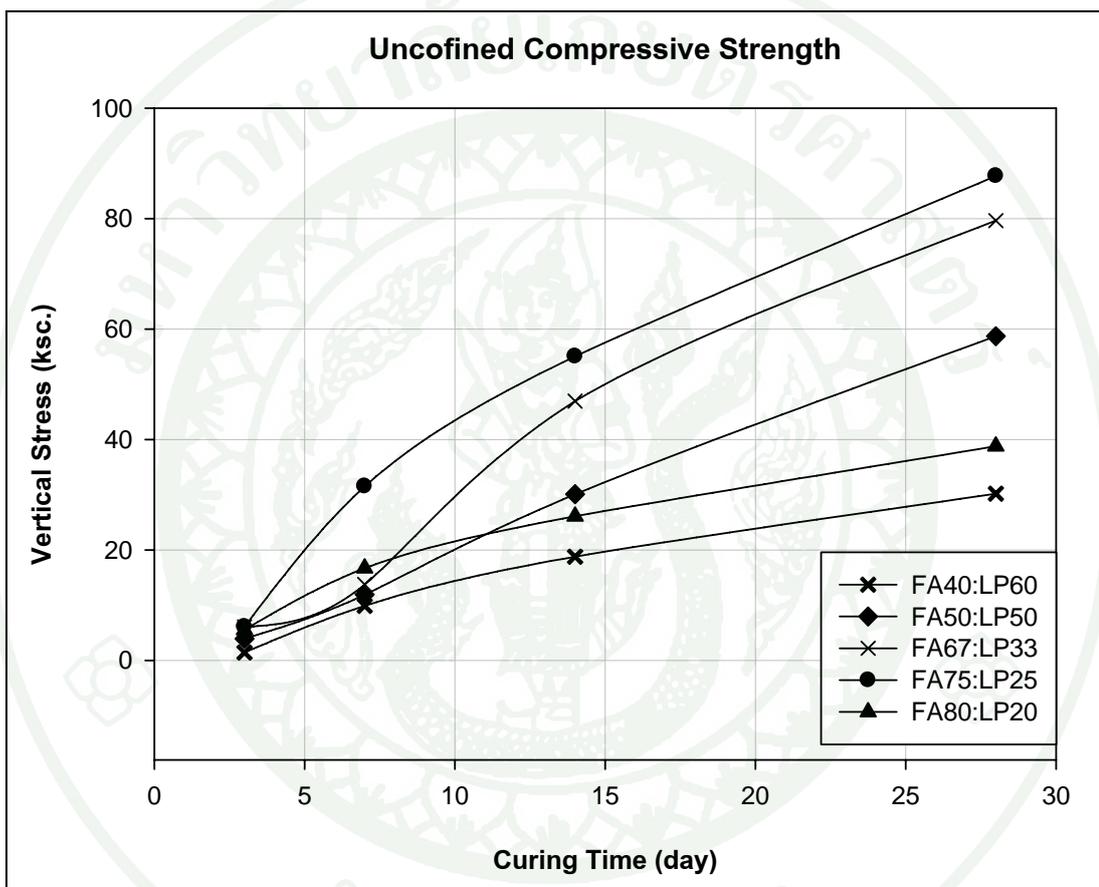
จากผลการทดสอบหาค่าความเหนียวของเถ้ากั้นเตา 80 % โดยน้ำหนักแห้งผสมตะกอนดินเหนียว 20% โดยน้ำหนักแห้ง จะเห็นได้ว่าค่า Plasticity Index มีค่าความเหนียวเล็กน้อย เนื่องจากเถ้ากั้นเตาไม่มีความเหนียว อิทธิพลความเหนียวส่วนใหญ่มาจากปริมาณของตะกอนดินเหนียวที่มีขนาดเม็ดละเอียดกว่าเถ้ากั้นเตาซึ่งมีค่าความเหนียวสูงกว่านั่นเอง ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 การทดสอบ Atterberg 's Limits ของเถ้ากั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว

กลุ่มตัวอย่าง	Atterberg's Limits		
	Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index
BA80:CH20	24.4	19.90	4.50

### ผลการทดสอบหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดของเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว ที่อัตราส่วนเถ้าลอย 75% โดยน้ำหนักเท่ากับเศษปูนขาว 25% โดยน้ำหนักแห่งนี้จะให้กำลังรับน้ำหนักมากที่สุด  $87.74 \text{ kg/cm}^2$  ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงภาพที่ 15



ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม

### ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุตั้งต้นผสมสารผสมเพิ่ม

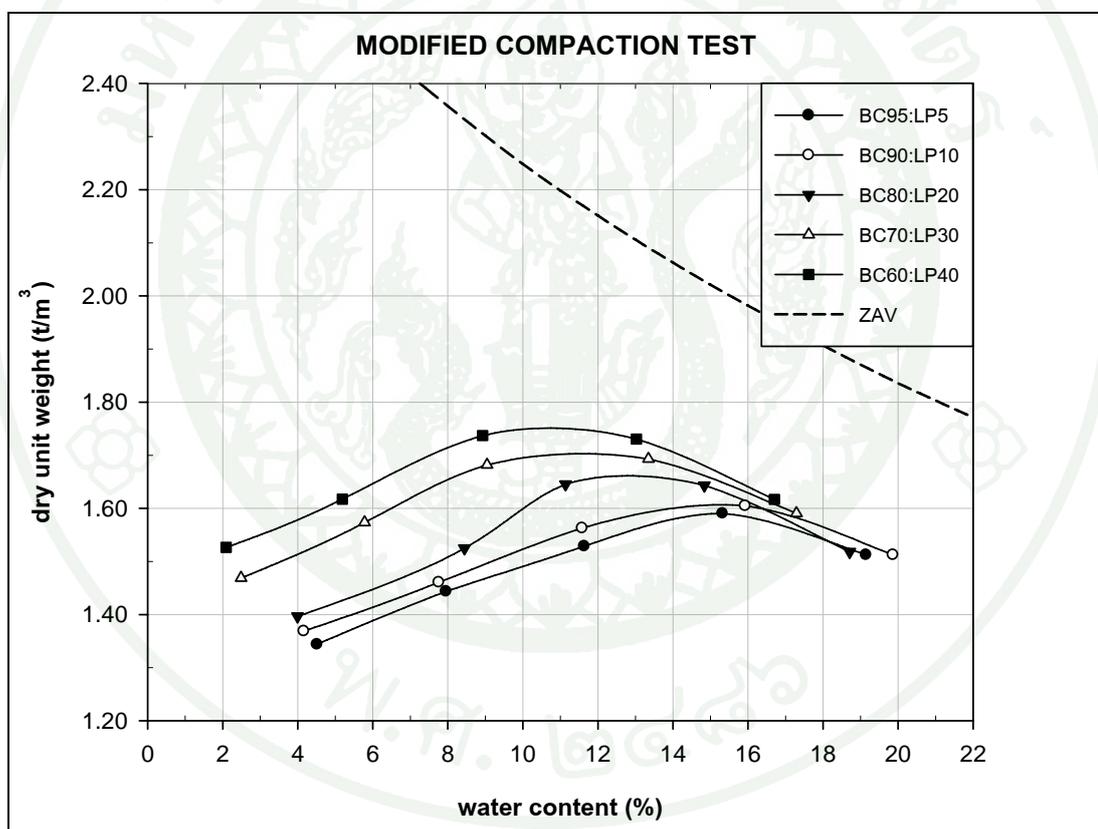
#### ผลการทดสอบเถ้ากั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาว (BC:LP)

เมื่อได้อัตราส่วนที่ดีที่สุดของเถ้ากั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว หลังจากนั้นก็นำอัตราส่วนที่ดีที่สุดมาผสมกับเศษปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้น

ที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนแล้วนำค่าที่ได้ไปทดสอบหาค่า หาค่า % CBR ค่าความเหนียวและค่าความชื้นน้ำต่อไป

### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการบดอัด

นำเก้าก้อนเตาผสมตะกอนดินเหนียวในอัตราส่วนที่ดีที่สุดมาผสมเศษปูนขาวในอัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นทำการบดอัดโดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่พลังงานการบดอัด 56,000 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนดังแสดงในภาพที่ 16 และตารางที่ 16



ภาพที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของ BC:LP

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว  
โดยใช้เศษปูนขาว

วัสดุทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ปริมาณความชื้นเหมาะสม
	(ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	(%)
BC 95:LP5	1.59	15.00
BC 90:LP 10	1.61	14.70
BC 80:LP 20	1.66	13.60
BC 70:LP 30	1.71	11.20
BC 60:LP 40	1.75	10.50

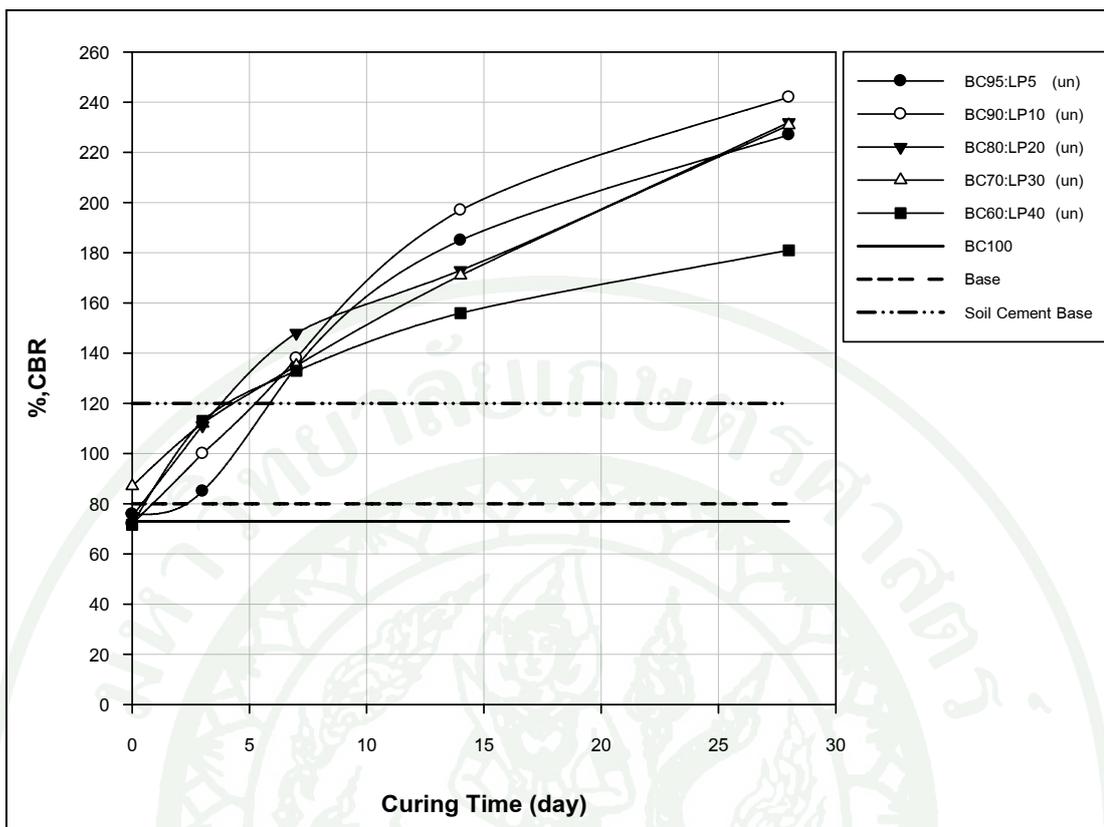
จากตารางที่ 16 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้นเรื่อยๆจะทำให้ปริมาณค่าความหนาแน่นสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าลดลงนั้นแสดงว่าอิทธิพลมาจากปริมาณเศษปูนขาวทั้งนี้เพราะเศษปูนขาวมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมากกว่าถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวและมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมน้อยกว่าถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวนั่นเอง

## 2. ผลการทดสอบคุณสมบัติ CBR

เมื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับค่าความชื้นที่เหมาะสมของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆแล้วนำค่าที่ได้มาทำการบดอัดโดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่พลังงานการบดอัด 56,000 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต เพื่อทดสอบหาค่า CBR ทั้งแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ ตามอายุการบ่มที่กำหนดคือ 3,7,14 และ 28 วันตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 17 และภาพที่ 17-22

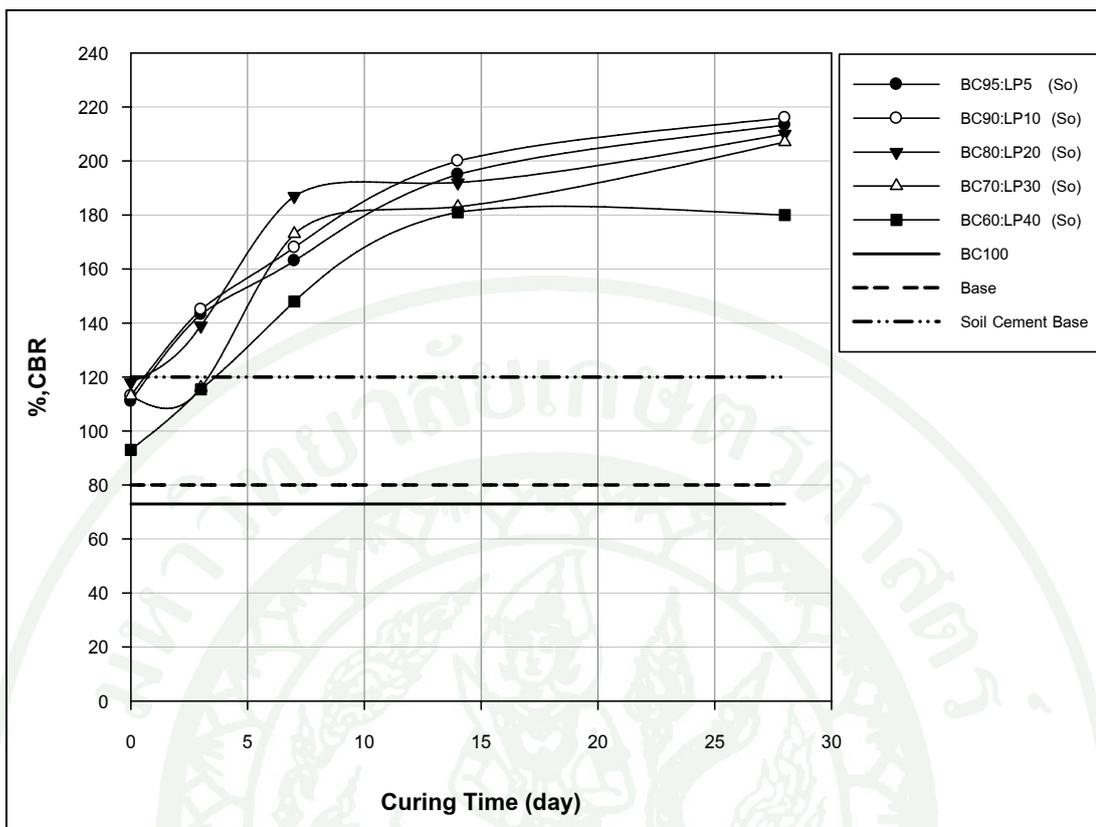
ตารางที่ 17 ผลการทดสอบหาค่า %CBR ของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาว

วิธีการ ทดสอบ	ปริมาณเศษปูนขาว (%)	CBR.(%)				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		0	3	7	14	28
Unsoaked	5	75.88	85.00	134.65	185.00	227.00
	10	72.00	100.00	138.00	197.00	242.00
	20	75.00	111.14	148.00	173.00	232.00
	30	87.00	112.00	135.00	171.00	230.84
	40	71.60	113.00	132.95	156.00	181.00
Soaked	5	111.00	143.20	163.00	195.00	213.31
	10	113.00	145.00	168.00	200.00	216.00
	20	118.00	139.00	187.00	192.00	210.00
	30	113.00	116.00	173.00	183.00	207.00
	40	93.00	115.42	148.00	181.00	180.00



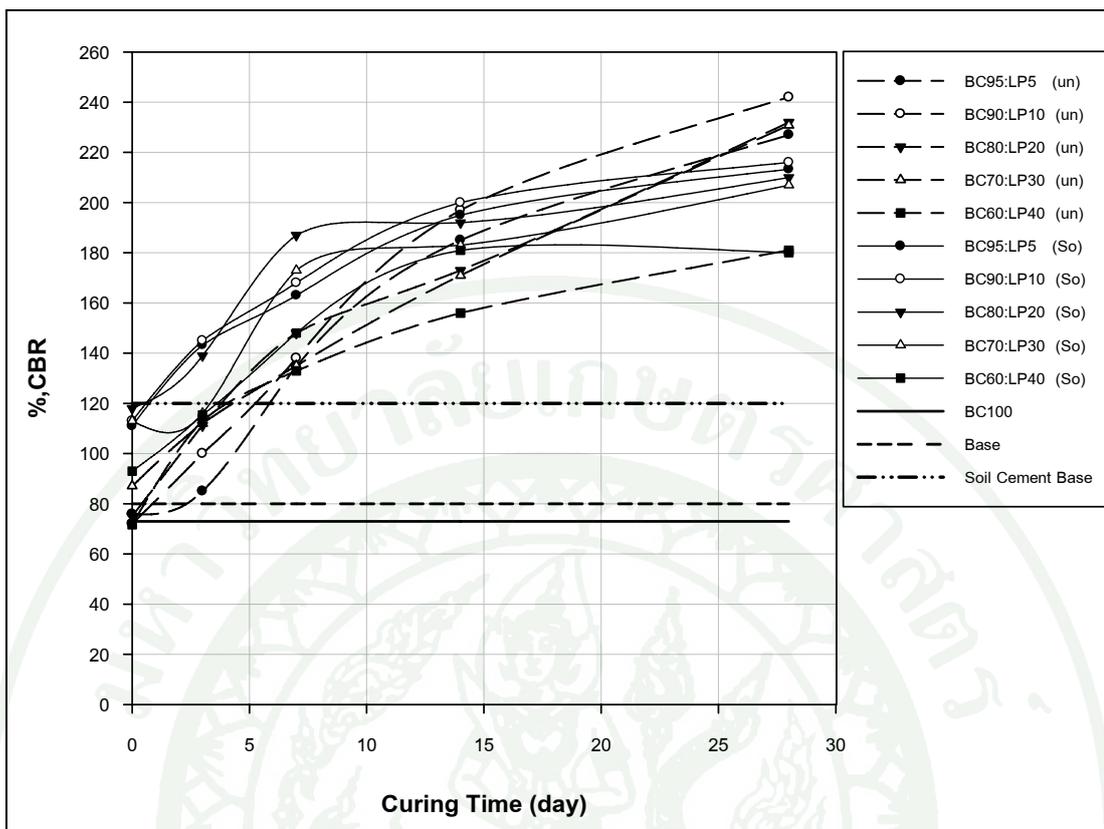
ภาพที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:LP

จากภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบไม่แช่น้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยในช่วงอายุการบ่ม 0 และ 3 วันค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน BC70:LP30 % โดยน้ำหนักแห้ง แต่เมื่ออายุการบ่ม 7 วัน ค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน BC80:LP20 % โดยน้ำหนักแห้ง แต่หลังจาก 7 วันขึ้นไปค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน BC90:LP10 % โดยน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้อาจมาจากปริมาณเศษปูนขาว เมื่อทำปฏิกิริยากับเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะให้ค่าสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็จะไม่เพิ่มขึ้นไปมากกว่านี้แล้วและอาจจะทำให้ค่า ค่า % CBR ต่ำลงเล็กน้อยอีกด้วย



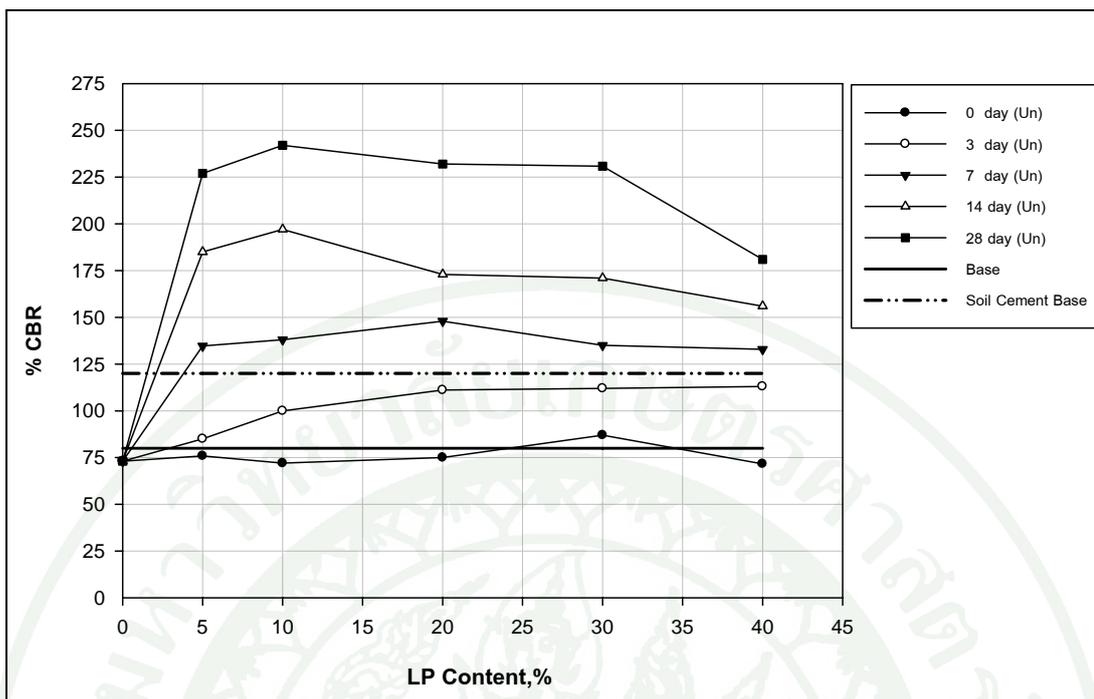
ภาพที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:LP

จากภาพที่ 18 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบแช่น้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยในช่วงอายุการบ่ม 0 และ 7 วันค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน BC80:LP20 % โดยน้ำหนักแห้ง แต่หลังจากอายุการบ่ม 14 และ 28 วัน ค่าค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน BC90:LP10 % โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งอาจมาจากปริมาณเศษปูนขาวเมื่อทำปฏิกิริยากับเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะให้ค่าสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาก็จะไม่เพิ่มขึ้นไปมากกว่านี้แล้วและอาจจะทำให้ค่า ค่า % CBR ต่ำลงเล็กน้อย



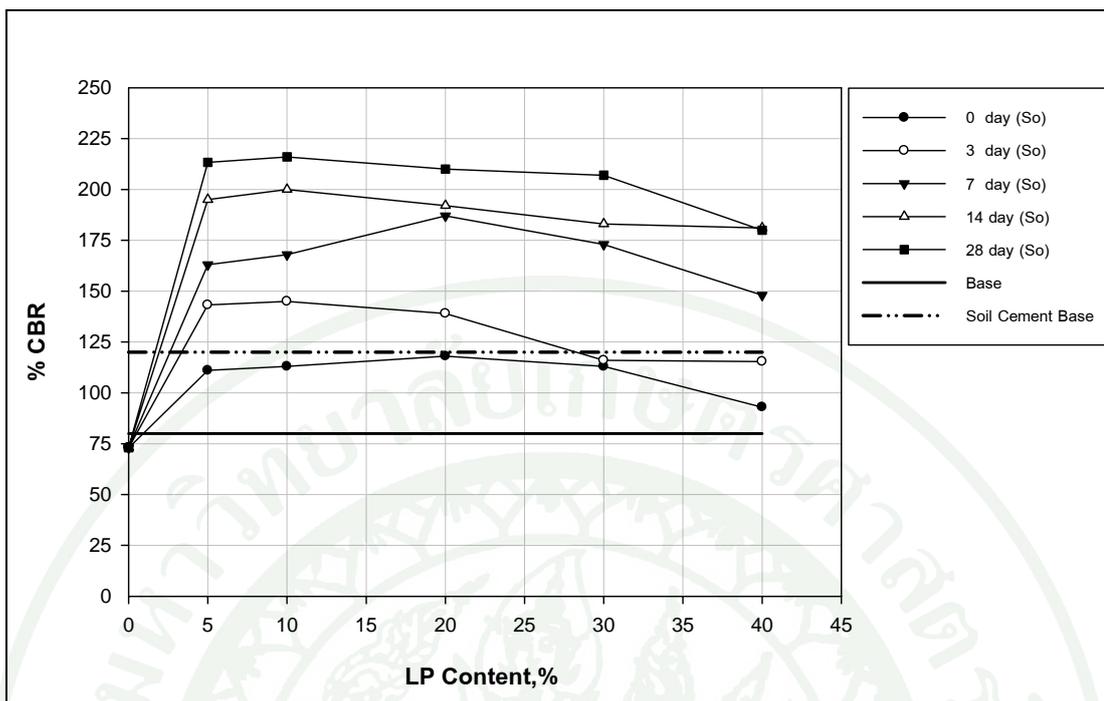
ภาพที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:LP

จากภาพที่ 19 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยในช่วง 0-14 วันค่า % CBR แบบแช่น้ำจะให้ค่าสูงกว่าแบบไม่แช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนเดียวกัน แต่หลังจาก 14 วันขึ้นไป ค่า % CBR แบบไม่แช่น้ำมีแนวโน้มสูงกว่าแบบแช่น้ำนั้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาในช่วง 0-14 วันจะเกิดขึ้นเร็วเมื่อมีปริมาณน้ำที่เพียงพอ แต่พอหลังจาก 14 วันขึ้นไปค่า % CBR ยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยากับปริมาณเศษปูนขาวในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพราะถ้าเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้นก็ไม่อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากกว่านี้



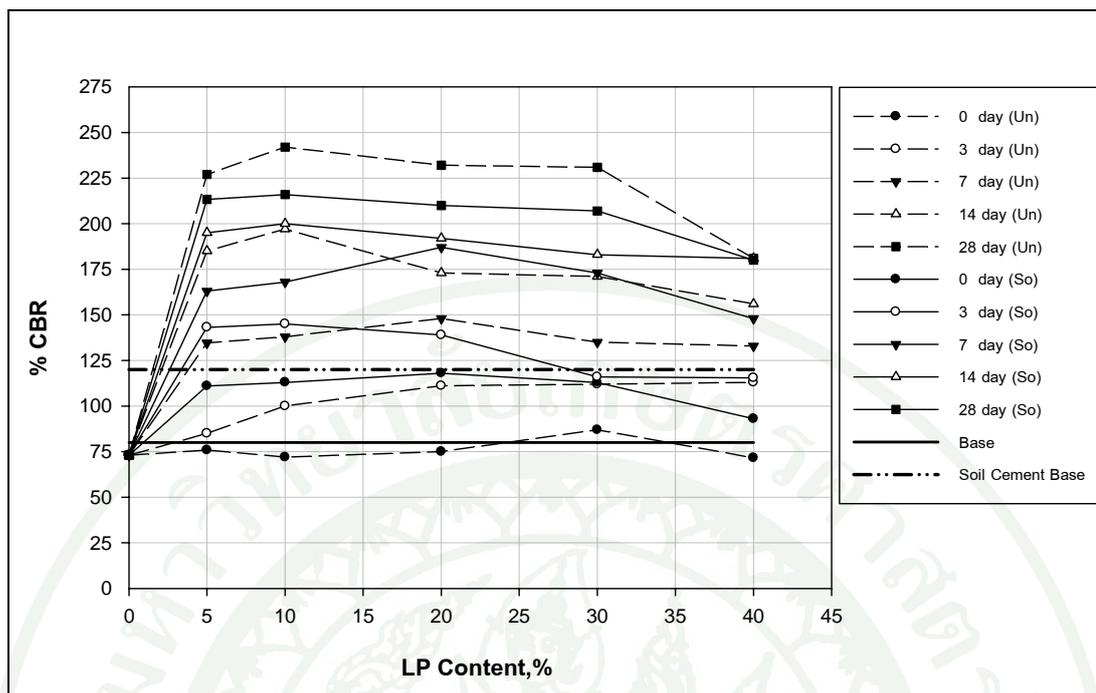
ภาพที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำกับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 20 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบไม่แช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเศษปูนขาวที่อัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้งที่อายุการบ่มเดียวกันจะเห็นได้ว่าที่อายุ 0 วัน ค่า % CBR จะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ที่อายุการบ่ม 3 วันค่า % CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณเศษปูนขาวที่เพิ่มมากขึ้น ที่อายุการบ่ม 7 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษปูนขาว 20% โดยน้ำหนักแห้งและที่อายุการบ่ม 14 และ 28 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษปูนขาว 10% โดยน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำกับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 21 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบแช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเศษปูนขาวที่อัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้งที่อายุการบ่มเดียวกัน จะเห็นได้ว่าที่อายุ 0 วัน ค่า % CBR จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ที่อายุการบ่ม 3 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษปูนขาว 10% โดยน้ำหนักแห้ง ที่อายุการบ่ม 7 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษปูนขาว 20% โดยน้ำหนักแห้งและที่อายุการบ่ม 14 และ 28 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษปูนขาว 10% โดยน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำและแช่น้ำกับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 22 ค่า % CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเศษปูนขาว ที่อัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้งที่อายุการบ่มเดียวกัน จะเห็นได้ว่าค่า % CBR จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับยังไม่ได้ใส่เศษปูนขาวและยังมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามอายุการบ่ม ค่า % CBR ยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยากับปริมาณเศษปูนขาวในอัตราส่วนที่เหมาะสมด้วยเพราะถ้าเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้นก็ไม่อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากกว่านี้และอาจจะทำให้ค่า % CBR ต่ำลงอีกด้วย โดยในช่วง 0-14 วันค่า % CBR แบบแช่น้ำจะให้ค่าสูงกว่าแบบไม่แช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนเดียวกัน แต่ที่ 28 วันค่า % CBR แบบไม่แช่น้ำมีแนวโน้มสูงกว่าแบบแช่น้ำ

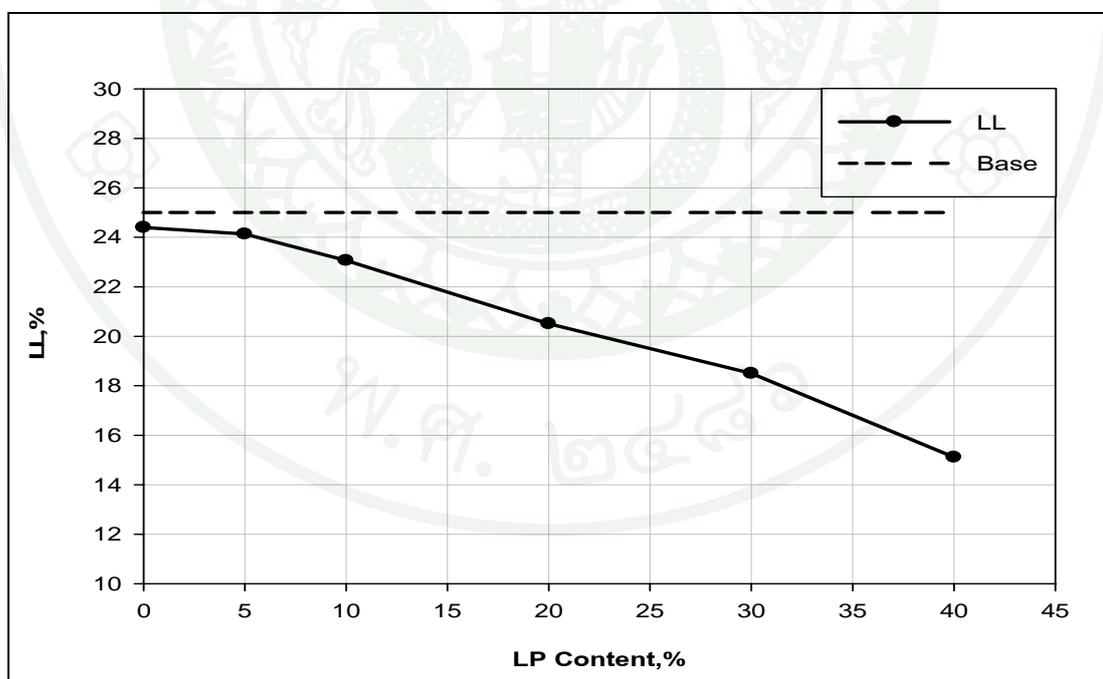
### 3. ผลการทดสอบ Atterberg 's Limits

เนื่องจากเมื่อทดสอบหาค่าความเหนียวของสารตั้งต้นคือเถ้ากั้นเตา 80 % โดยน้ำหนักแห้งผสมตะกอนดินเหนียว 20% โดยน้ำหนักแห้งมีค่าความเหนียวเพียงเล็กน้อยและเมื่อนำมาผสมกับสารผสมเพิ่มคือเศษปูนขาวที่อัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้งแล้วนำมาทำการ

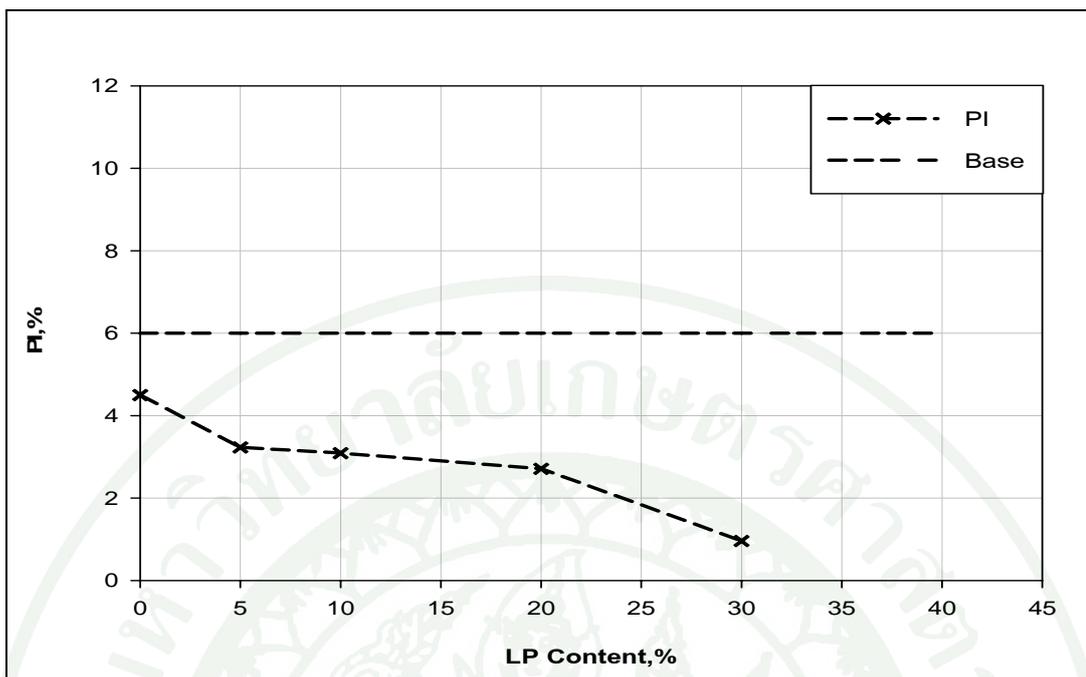
ทดสอบหาค่าความเหนียวปรากฏว่าค่าความเหนียวลดลงจนไม่มีค่าความเหนียวนั้นอาจเป็นเพราะเศษปูนขาวไม่มีค่าความเหนียวนั่นเองดังแสดงในตารางที่ 18 และภาพที่ 23-25

ตารางที่ 18 การทดสอบ Atterberg 's Limits ของ BC:LP

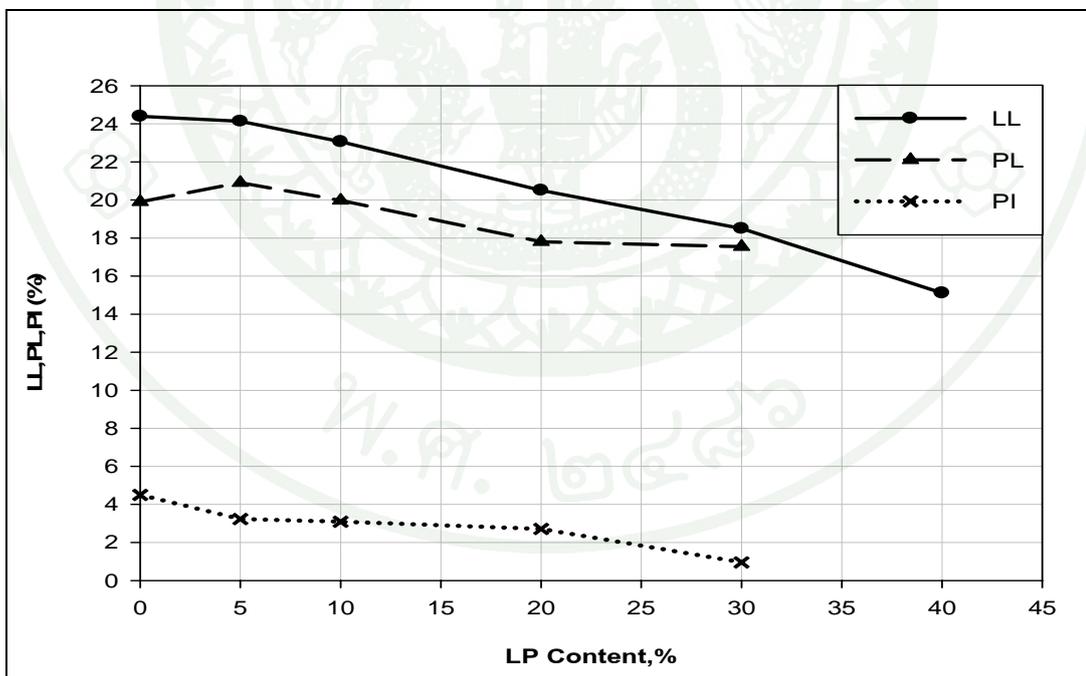
กลุ่มตัวอย่าง	Atterberg's Limits		
	Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index
BC100	24.4	19.90	4.50
BC95:LP5	24.13	20.90	3.23
BC90:LP10	23.06	19.97	3.09
BC80:LP20	20.51	17.80	2.71
BC70:LP30	18.50	17.54	0.96
BC60:LP40	15.11	-	-



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

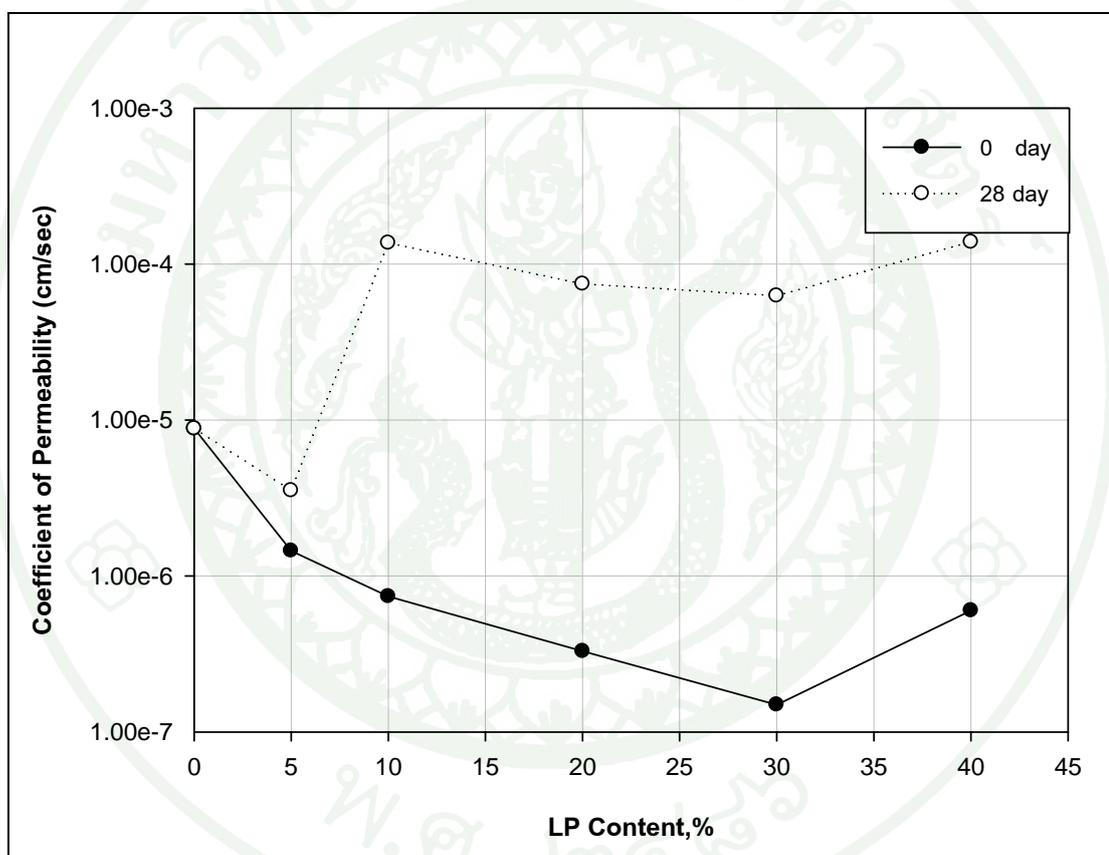


ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 18 และภาพที่ 23-25 จะเห็นได้ว่าค่า Liquid Limit ของวัสดุที่ทดสอบมีค่าไม่เกินมาตรฐานพื้นที่ทางที่กำหนดคือ ไม่เกิน 25 % และค่า Plasticity Index มีค่าไม่เกิน 6 %

#### 4. ผลการทดสอบความชื้นน้ำ

หาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของของแฉก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาว ด้วยวิธี Constant Head โดยใช้ความดันเข้าช่วยดังแสดงในภาพที่ 26 และตารางที่ 19



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของแฉก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว โดยใช้เศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้  
เศษปูนขาว

วัสดุทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ(cm/s)	
	0 วัน	28 วัน
BC100	8.83E-06	8.83E-06
BC95:LP5	1.45E-06	3.54E-06
BC90:LP10	7.38E-07	1.37E-04
BC80:LP20	3.29E-07	7.46E-05
BC70:LP30	1.49E-07	6.26E-05
BC60:LP40	6.01E-07	1.39E-04

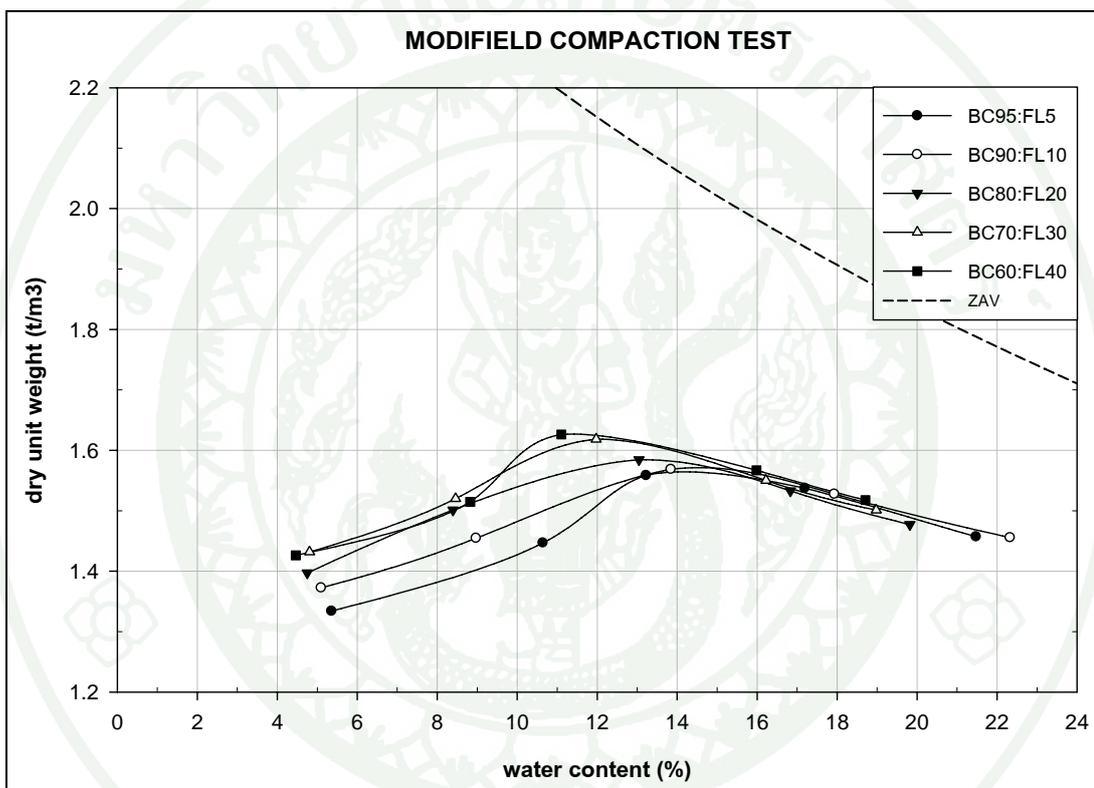
จากภาพที่ 26 และตารางที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดพบว่าเมื่อผสมเศษปูนขาวมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีแนวโน้มที่บ่มน้ำมากขึ้น ส่วนที่อายุการบ่ม 28 วันเมื่อผสมเศษปูนขาวมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีแนวโน้มโปร่งน้ำมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวที่อายุการบ่ม 28 วันกับถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2-419 เท่าเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนเดียวกัน อาจเป็นเพราะเมื่ออายุการบ่มมากขึ้นเป็นผลให้มีความที่บ่มน้ำลดลงเนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุและการจับตัวกันของเม็ดดิน (Cation Exchange and Flocculation) ทำให้อนุภาคดินเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น

#### ผลการทดสอบถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาว (BC:FL)

เมื่อได้อัตราส่วนที่ดีที่สุดของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว หลังจากนั้นก็นำอัตราส่วนที่ดีที่สุดมาผสมกับถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนแล้วนำค่าที่ได้ไปทดสอบหาค่า % CBR ค่าความเหนียวและค่าความชื้นน้ำต่อไป

### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการบดอัด

นำถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวในอัตราส่วนที่ดีที่สุดมาผสมถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวในอัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นทำการบดอัดโดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่พลังงานการบดอัด 56,000 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนดังแสดงในภาพที่ 27 และตารางที่ 20



ภาพที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของ BC:FL

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเก้าอี้เตาผสมตะกอนดินเหนียว โดยใช้เถ้าลอยผสมเศษปูนขาว

วัสดุทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ปริมาณความชื้นเหมาะสม
	(ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	(%)
BC 95:FL 5	1.55	15.00
BC 90:FL 10	1.57	14.40
BC 80:FL 20	1.59	13.00
BC 70:FL 30	1.62	12.00
BC 60:FL 40	1.63	11.00

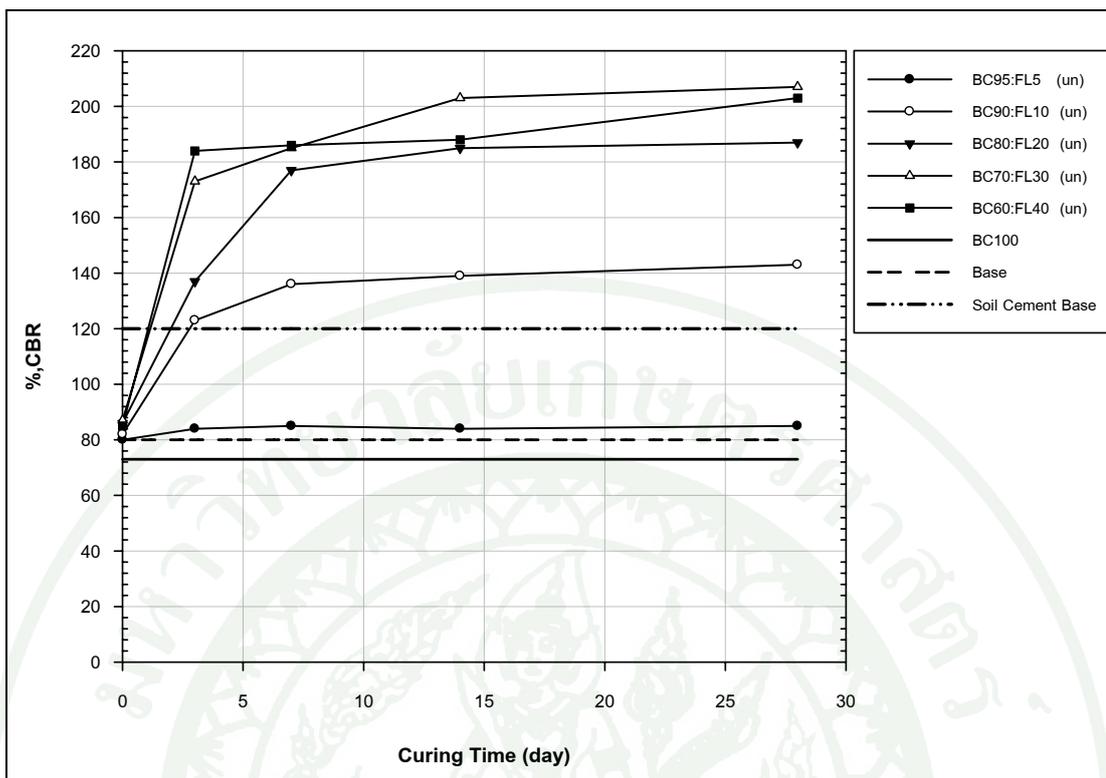
จากตารางที่ 20 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวมากขึ้นเรื่อยๆจะทำให้ปริมาณค่าความหนาแน่นสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าลดลง

## 2. ผลการทดสอบคุณสมบัติ CBR

เมื่อหาค่าความหนาแน่นสูงสุดกับค่าความชื้นที่เหมาะสมของเก้าอี้เตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เถ้าลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆแล้วนำค่าที่ได้มาทำการบดอัดโดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่พลังงานการบดอัด 56,000 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต เพื่อทดสอบหาค่า CBR ทั้งแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ ตามอายุการบ่มที่กำหนดคือ 3,7,14 และ 28 วันตามลำดับดังแสดงตารางที่ 21 และในภาพที่ 28-33

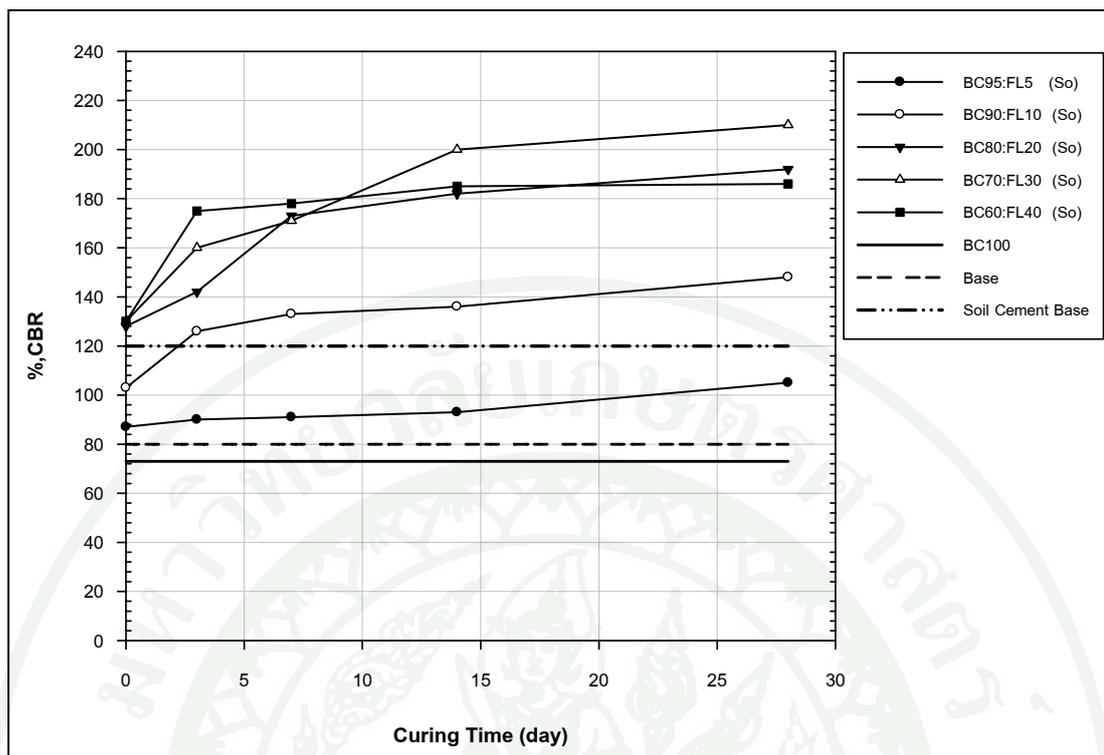
ตารางที่ 21 ผลการทดสอบหาค่า %CBR ของเก้าอี้เตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสม  
เศษปูนขาว

วิธีการ ทดสอบ	ปริมาณถ้ำลอยผสม เศษปูนขาว (%)	CBR.(%).				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		0	3	7	14	28
Unsoaked	5	80.00	84.00	85.00	84.00	85.00
	10	82.00	123.00	136.00	139.00	143.00
	20	86.00	137.00	177.00	185.00	187.00
	30	87.00	173.00	185.00	203.00	207.00
	40	85.00	184.00	186.00	188.00	203.00
Soaked	5	87.00	90.00	91.00	93.00	105.00
	10	103.00	126.00	133.00	136.00	148.00
	20	128.00	142.00	173.00	182.00	192.00
	30	130.00	160.00	171.00	200.00	210.00
	40	130.00	175.00	178.00	185.00	186.00



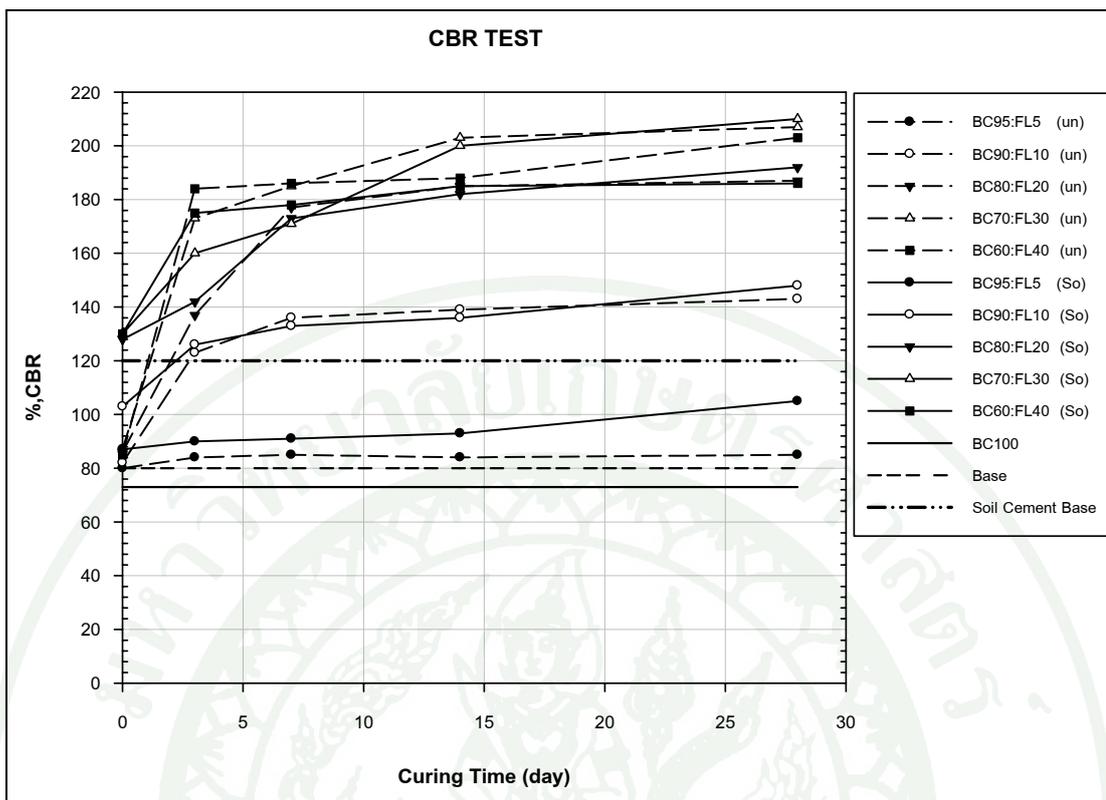
ภาพที่ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:FL

จากภาพที่ 28 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบไม่แช่น้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม โดยในช่วงอายุการบ่ม 0 วันจะให้ค่า % CBR ไม่แตกต่างกันมากนัก ที่ 3 และ 7 วัน ค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน BC60:LP40 % โดยน้ำหนักแห้ง ที่ 14 และ 28 วัน ค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน BC70:LP30 % โดยน้ำหนักแห้ง



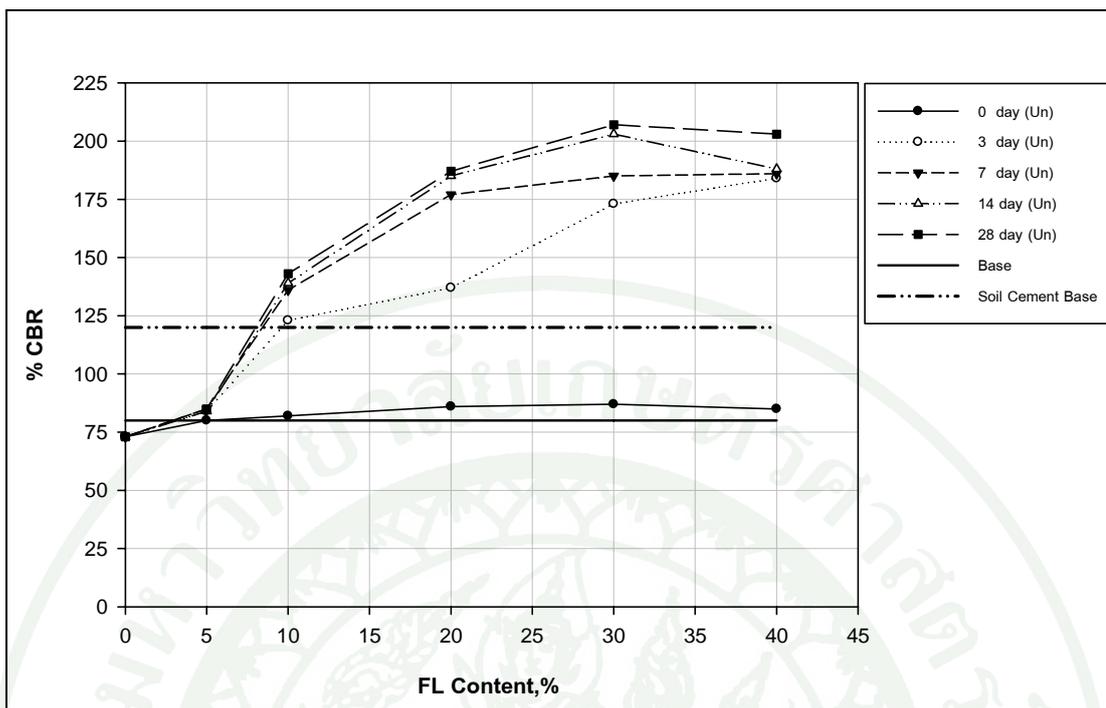
ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:FL

จากภาพที่ 29 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบแช่น้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม โดยในช่วงอายุการบ่ม 0 วันจะให้ค่า % CBR จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว แต่ที่อัตราส่วน 20,30,40% จะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ที่ 3 และ 7 วันค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน BC60:LP40 % โดยน้ำหนักแห้ง ที่ 14 และ 28 วันค่า % CBR จะให้ค่ามากที่สุด ที่อัตราส่วน BC70:LP30 % โดยน้ำหนักแห้ง



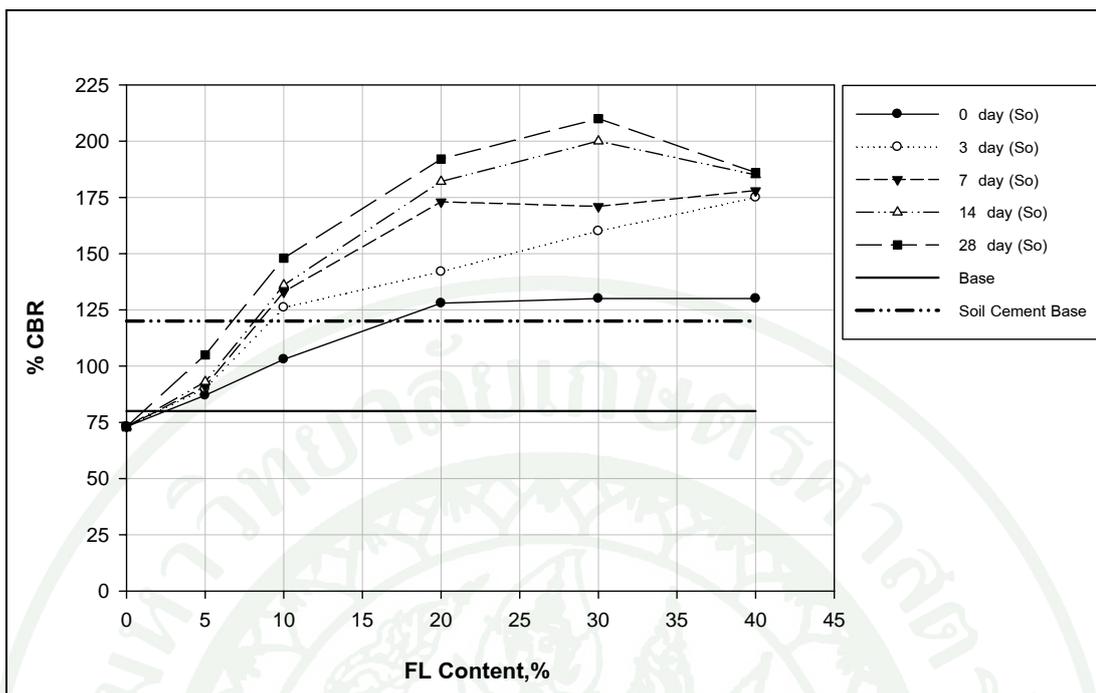
ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำกับอายุการบ่มของ BC:FL

จากภาพที่ 30 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ซึ่งอายุการบ่มในช่วงแรก 3 ถึง 7 วันนั้นค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วยกเว้นอัตราส่วน BC95:FL5 % โดยน้ำหนักแห้งและหลังจากนั้นในช่วงอายุการบ่ม 7 ถึง 28 วัน ค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องช้าๆ ในช่วง 0 วันค่า % CBR แบบแช่น้ำจะให้ค่าสูงกว่าแบบไม่แช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนเดียวกัน แต่ที่อายุการบ่ม 3 ถึง 28 วันค่า % CBR ทั้งสองแบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



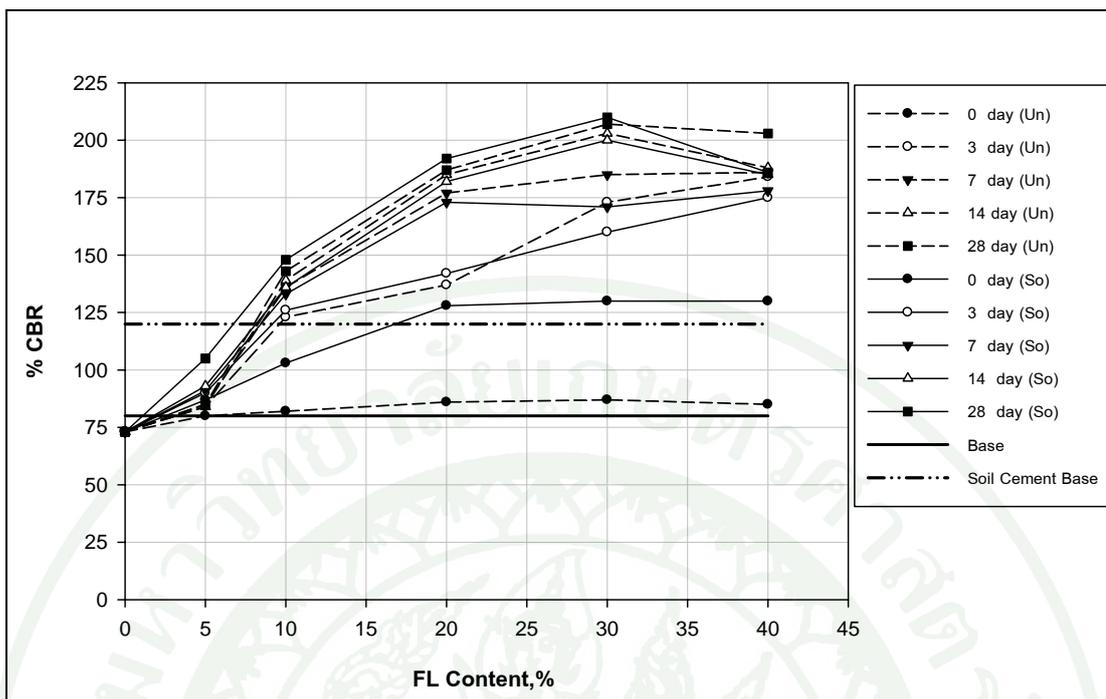
ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบไม่แช่น้ำกับถั่วลอมเตชปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 31 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบไม่แช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณถั่วลอมเตชปูนขาวที่อัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้งที่อายุการบ่มเดียวกันจะเห็นได้ว่าที่อายุ 0 วัน ค่า % CBR จะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ที่อายุการบ่ม 3-28 วันค่า % CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณถั่วลอมเตชปูนขาวที่เพิ่มมากขึ้นคือที่ปริมาณถั่วลอมเตชปูนขาวที่อัตราส่วน 5,10,20,30 % โดยน้ำหนักแห้งแต่เมื่อเพิ่มไปมากกว่านี้ค่า % CBR ก็ไม่เพิ่มไปกว่านี้แล้ว ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณถั่วลอมเตชปูนขาว 40% โดยน้ำหนักแห้ง และที่อายุการบ่ม 14 และ 28 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณถั่วลอมเตชปูนขาว 30% โดยน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำกับถ้ำลอมผสมปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 32 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบแช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณถ้ำลอมผสมปูนขาวที่อัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้งที่อายุการบ่มเดียวกัน จะเห็นได้ว่าที่อายุการบ่ม 3 ถึง 28 วันค่า % CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปริมาณถ้ำลอมผสมปูนขาวที่เพิ่มมากขึ้นจนถึงที่อัตราส่วนปริมาณถ้ำลอมผสมปูนขาว 30 % โดยน้ำหนักแห้ง ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณถ้ำลอมผสมปูนขาว 40% โดยน้ำหนักแห้งและที่อายุการบ่ม 14 และ 28 วันค่า % CBR มีค่าสูงสุดที่ปริมาณถ้ำลอมผสมปูนขาว 30% โดยน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำกับถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

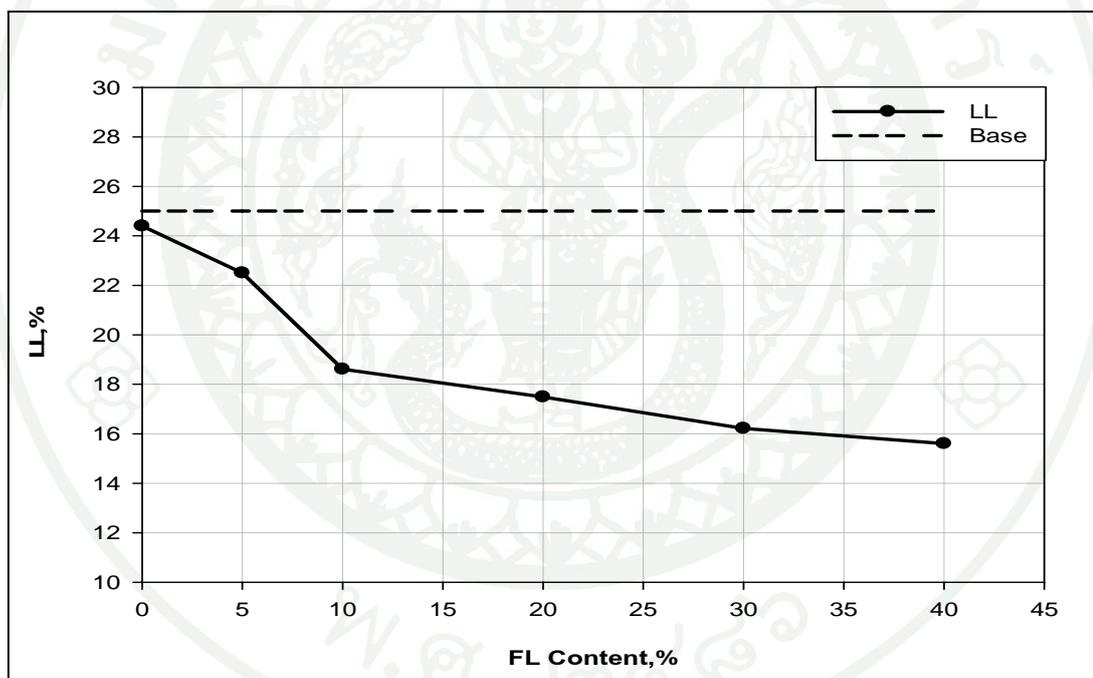
จากภาพที่ 33 จะเห็นได้ว่าค่า % CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้งที่อายุการบ่มเดียวกัน จะเห็นได้ว่าค่า % CBR จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับยังไม่ได้ใส่ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวและยังมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามอายุการบ่ม ในช่วง 0 วันค่า % CBR แบบแช่น้ำจะให้ค่าสูงกว่าแบบไม่แช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนเดียวกัน แต่ที่อายุการบ่ม 3 ถึง 28 วันค่า % CBR ทั้งสองแบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

### 3. ผลการทดสอบ Atterberg's Limits

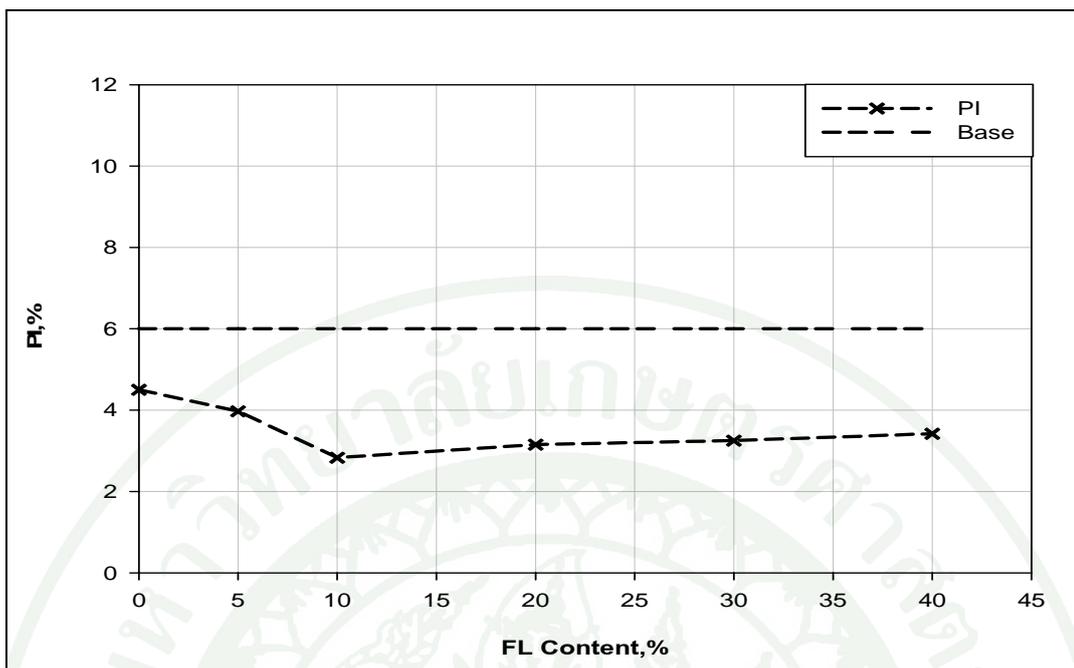
เนื่องจากเมื่อทดสอบหาค่าความเหนียวของสารตั้งต้นคือถ้ำกั้นเตา 80 % โดยน้ำหนักแห้งผสมตะกอนดินเหนียว 20% โดยน้ำหนักแห้งมีค่าความเหนียวเพียงเล็กน้อยและเมื่อนำมาผสมกับสารผสมเพิ่มคือถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วน 5,10,20,30,40 % โดยน้ำหนักแห้งแล้วนำมาทำการทดสอบหาค่าความเหนียวปรากฏว่าค่าความเหนียวมีแนวโน้มลดน้อยลงดังแสดงในตารางที่ 21 และภาพที่ 34-36

ตารางที่ 22 การทดสอบ Atterberg 's Limits ของ BC:FL

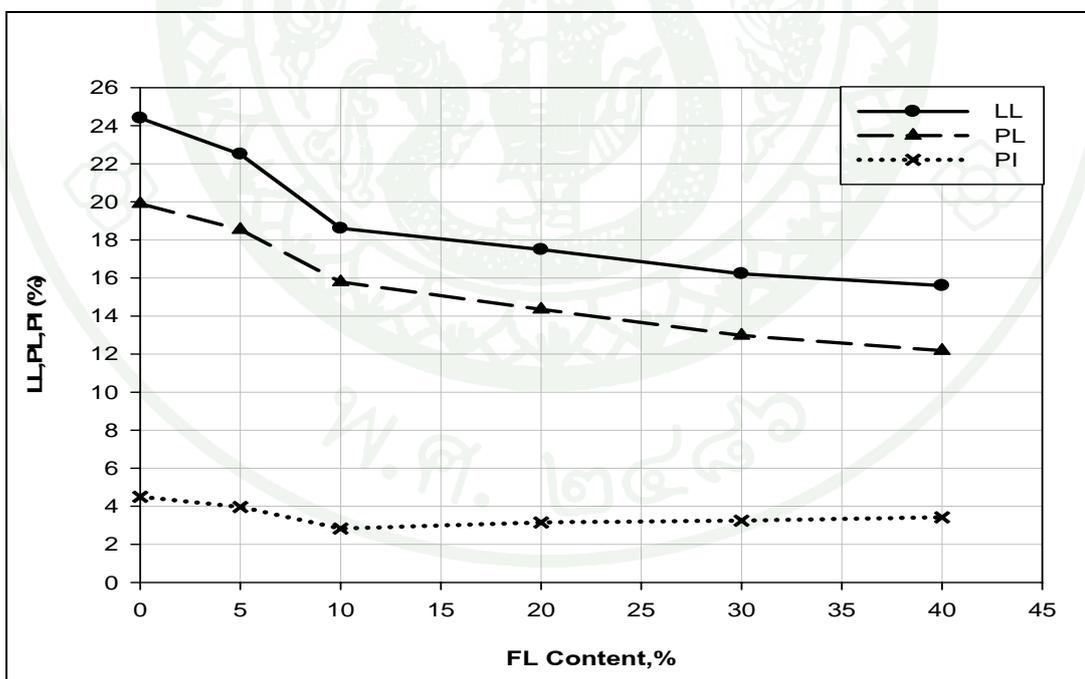
กลุ่มตัวอย่าง	Atterberg's Limits		
	Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index
BC100	24.4	19.90	4.50
BC95:FL5	22.50	18.53	3.97
BC90:FL10	18.61	15.78	2.83
BC80:FL20	17.49	14.34	3.15
BC70:FL30	16.22	12.97	3.25
BC60:FL40	15.60	12.18	3.42



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับเนื้อล่อยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ



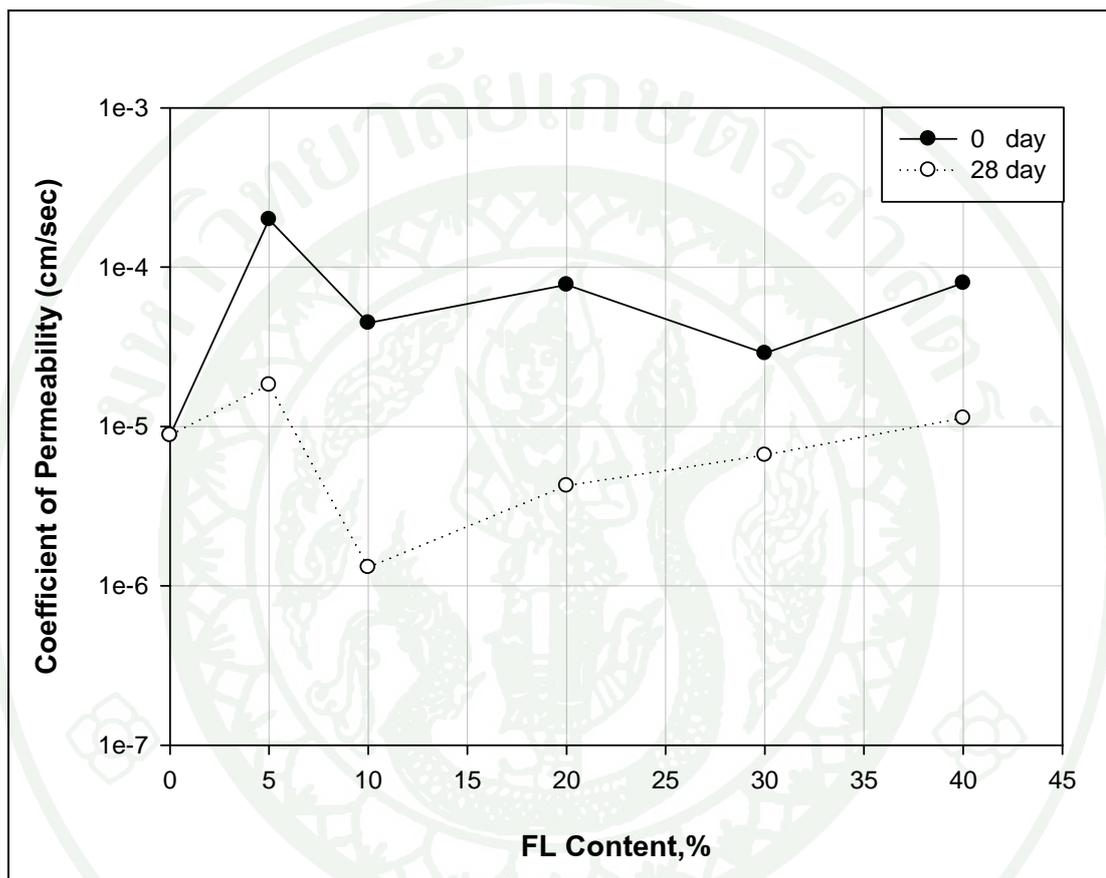
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับถ้ำล่อยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับถ้ำล่อยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 22 และภาพที่ 34-36 จะเห็นได้ว่าค่า Liquid Limit ของวัสดุที่ทดสอบมีค่าไม่เกินมาตรฐานพื้นฐานที่กำหนดคือ ไม่เกิน 25 % และค่า Plasticity Index มีค่าไม่เกิน 6 %

#### 4. ผลการทดสอบความชื้นน้ำ



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเก้าอี้กันเตาผสมตะกอนดินเหนียว โดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้  
ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาว

วัสดุทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ(cm/s)	
	0 วัน	28 วัน
BC100	8.83E-06	8.83E-06
BC95:FL5	1.99E-04	1.83E-05
BC90:FL10	4.47E-05	1.31E-06
BC80:FL20	7.76E-05	4.25E-06
BC70:FL30	2.88E-05	6.62E-06
BC60:FL40	7.95E-05	1.13E-05

จากภาพที่ 37 และตารางที่ 23 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดพบว่าเมื่อผสมถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีแนวโน้มที่บ่น้ำมากขึ้น ส่วนที่อายุการบ่ม 28 วันเมื่อผสมถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีแนวโน้มโปร่งน้ำมากขึ้นที่อัตราส่วนถ้ำลอยผสมเศษปูนขาว 10-40% และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อายุการบ่ม 28 วันกับถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าต่ำลงประมาณ 4-34 เท่าเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถ้ำลอยมีขนาดเม็ดเล็กจึงเข้าไปแทนที่ช่องว่างทำให้มีความที่บ่น้ำมากขึ้นและอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Hydration ของเศษปูนขาวทำให้ลดค่าความชื้นน้ำและการบวมตัว

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. จากผลการศึกษาพบว่า ถ้ำกั้นเตา ตะกอนดินเหนียว ถ้ำลอยและเศษปูนขาวเมื่อนำมาทดสอบหาค่าการกระจายขนาดของเม็ดดินสามารถจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification ได้ดังนี้คือ SP, CH, ML และ SP ตามลำดับและเมื่อจำแนกตามระบบ AASHTO Classification ได้เป็น A-3(0), A-7-6(16), A-4(8) และ A-3(0) ตามลำดับ

2. จากผลการศึกษาการใช้สารผสมเพิ่มพบว่าเมื่อผสมสารผสมเพิ่มคือเศษปูนขาวและถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวลงในถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวแล้วจะทำให้คุณสมบัติด้านกำลัง (%CBR) เพิ่มขึ้น โดยกำลังจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารผสมเพิ่มจนถึงค่าที่เหมาะสม

3. เมื่อผสมสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วน เศษปูนขาว 10% โดยน้ำหนักแห้งและถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่ 30% โดยน้ำหนักแห้ง จะให้ค่า %CBR มากที่สุดที่อายุการบ่ม 28 วัน

4. อัตราส่วนที่เหมาะสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่แนะนำให้ใช้ในงานพื้นทางโดยใช้ %CBR ตามข้อกำหนดมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย สำหรับสารผสมเพิ่มคืออัตราส่วนเศษปูนขาว ที่ 5% โดยน้ำหนักแห้ง ส่วนถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่ 5% โดยน้ำหนักแห้ง

จากสรุปข้อ 3 และ 4 สามารถที่จะสรุปเป็นปริมาณร้อยละของอัตราส่วนของวัสดุที่ใช้แต่ละชนิด ที่ให้ค่า %CBR สูงสุดและที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยผลรวมทั้งหมดคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 24

ตารางที่ 24 สรุปปริมาณร้อยละของอัตราส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชนิด

% CBR	อัตราส่วน	% โดยน้ำหนักแห้ง			
		BA	CH	FA	LP
สูงสุด	BC90:LP10	72	18	-	10
	BC70:FL30	56	14	22.5	7.5
ผ่านเกณฑ์	BC95:LP5	76	19	-	5
มาตรฐาน	BC95:FL5	76	19	3.75	1.25

5. จากผลการศึกษาเมื่อผสมสารผสมเพิ่มคือเศษปูนขาวพบว่ามีการพัฒนาการด้านกำลัง (%CBR) สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม ส่วนสารผสมเพิ่มคือเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวพัฒนาการด้านกำลัง (%CBR) จะพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ถึง 7 วัน แต่หลังจากอายุการบ่ม 14 ถึง 28 วันพัฒนาการด้านกำลัง (%CBR) จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

6. จากผลการศึกษาการพบว่าเมื่อผสมสารผสมเพิ่มคือเศษปูนขาวและเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวลงในเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวแล้วจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลง

7. จากผลการศึกษาการพบว่าเมื่อผสมสารผสมเพิ่มคือเศษปูนขาวและเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวลงในเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวแล้วนำมาทำการทดสอบหาค่าความเหนียวปรากฏว่าค่าความเหนียวมีแนวโน้มลดลง

8. เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวที่อายุการบ่ม 28 วันกับเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2-419 เท่าเมื่อเปรียบเทียบที่สัดส่วนเดียวกัน

9. เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เถ้าลอยผสมเศษปูนขาวที่อายุการบ่ม 28 วันกับเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เถ้าลอยผสมเศษปูนขาวที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของเถ้าก้นเตาผสมตะกอน

ดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าต่ำลงประมาณ 4-34 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่สัดส่วนเดียวกัน

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำแปลงทดสอบถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เศษปูนขาวและถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้ถ้ำลอยผสมเศษปูนขาวในสนาม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบในสนามกับคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต
2. ควรมีการศึกษาถึงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆที่มีความสำคัญในการอธิบายโครงสร้างที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริงซึ่งมีความสัมพันธ์กับการพัฒนากำลัง จึงควรมีการศึกษาในด้าน Physic-Chemical โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
3. ควรทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิการบ่มต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของวัสดุทดสอบ เพราะการทำงานในสนามเราไม่สามารถควบคุมการสูญเสียความชื้นเนื่องจากอุณหภูมิให้คงที่ได้เหมือนอย่างในห้องปฏิบัติการและผลของการล่าช้าการบดอัดต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของวัสดุทดสอบ เพราะการทำงานในสนามนั้น เราไม่สามารถที่จะผสมและบดอัดให้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาสั้นๆได้
4. เนื่องจากการผสมระหว่างถ้ำกั้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวใช้ตะกอนดินเหนียวเพียง 20% โดยน้ำหนักแห้งเท่านั้น อาจจะเป็นเพิ่มปริมาณตะกอนดินเหนียวมากขึ้นกว่าเดิม
5. ตะกอนดินเหนียวที่ใช้เป็นตะกอนดินเหนียวที่ได้จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดถ้าจะใช้ดินจากที่อื่นก็สามารถใช้ได้เมื่อ Classification เป็น CH เหมือนกัน ส่วนเศษปูนขาวถ้าจะเปลี่ยนเป็นปูนขาวก็สามารถใช้ได้เพราะโดยทั่วไปปูนขาวจะมี Cao มากกว่าเศษปูนขาว

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตติศักดิ์ โชติ. 2553. การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าก้นเตาและปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกษม เพชรเกตุ, พินิต ตั้งบุญเดิม และ วิชัย สวรรพทานสกุล. 2531. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยใช้ปูนขาว. วิศวกรรมสาร (4): 69-71.
- จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม. 2552. การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกและทรายโดยใช้เถ้าก้นเตา วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชนิดาวรรณ อ่ำเอี่ยม และธีรเชษฐ์ ศรีธวัชพงษ์. 2530. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยปูนขาว. วิทยานิพนธ์วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นิรชร นกแก้ว. 2539. การศึกษาการใช้เถ้าหนักลิไนต์แทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บุญเทพ นานกรังสรรค. 2539. การปรับปรุงคุณภาพดิน, **Foundation Engineering and Tunneling**. รุ่งแสงการพิมพ์, เชียงใหม่
- พานิช วุฒิพฤกษ์, นรินทร์ ศรีดอกไม้, มนตรี ฝ่ายอุประ และจตุรงค์ เสาวภาคไพบุลย์. 2547. การศึกษาผลกระทบของปูนขาวปูนซีเมนต์ซิลิกาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อความสามารถในการซึมน้ำของดินกำแพงแสน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2547 (2): 37-45.
- มนตรี เดชาสกุลสม, จอมปวีร์ จันทร์หิรัญ, หัสณัย ลีมสุเจริญ. 2549. การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ **Bottom Ash** เพื่อใช้ในงานทาง. บทความวิชาการ

- รณภูมิ ลีเมศรีสวัสดิ์. 2553. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาว  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิเศษ แจ่มจิตร. 2552. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมัชชา แสนสุวรรณศรี. 2549. การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบขนแค้นด้วยปูนซีเมนต์ผสมกับ  
เถ้าก้นเตา สำหรับงานพื้นทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สมชัย กกกำแหง. 2535. การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน.  
การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2535. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย,  
กรุงเทพฯ.
- ศรัณย์รัฐ พวงพัฒน์. 2545. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์  
ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศิริศักดิ์ จินดาผล. 2550. การปรับปรุงคุณภาพของดินในสภาพแช่น้ำด้วยการใช้ปูนซีเมนต์และ  
ปูนขาวสำหรับการก่อสร้างคันดินทางรถไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย  
เกษตรศาสตร์.
- อนิรุทธ์ ชงไชย. 2540. การปรับปรุงคุณสมบัติดินเม็ดละเอียดด้วยเถ้าลอยแม่เมาะสำหรับใช้ในงาน  
ก่อสร้างทาง, น.GTE 2-1 – 2-8. ใน รายงานการประชุมทางวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ  
ครั้งที่ 3. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- อุมาพร ปฎิพันธ์ภูมิสกุล. 2553. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาว  
และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- American Society for Testing and Materials. 1980 . **Annual Book of ASTM Standard.**  
AASHTO office, Washington, D.C.
- Broms, B.B. 1984. **Stabilization of soft clay with lime column**, p. 104. Cite by D.T.  
Bergado, J.C. Chai, M.C. Alfrado and A.S. Balasubramaniam. Improvement Technique of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Bumjoo, K. and P. Monica. 2006. **Compaction characteristics and corrosivity of Indiana class-F fly and bottom ash mixtures.** Waste Management.
- Chapman, B.R. and P. George. 1996. Fly Ash in Embankment - Hebei Province China.  
**Proceedings of National Symposium on the use of Recycled Materials in Engineering Construction.** Sydney: 70-76.
- Diamond, S. and E.B. Kinter. 1965. **A Rapid Method of Prediction The Portland Cement Requirement for Stabilization of Plastic Soil.** Highway Research Board Bull. 198, Nation Research Council, D.C., U.S.A.
- Experts in Team 2004, Team 3, village 22. 2004. Importance of Public Awareness of Dredging in Trondheim Harbour. **Norwegian University of science and technology.** Trondheim.
- Hausmann, M.R. 1990. **Engineering Principles of Ground Modification.** McGraw-Hill Publ. Co., Sydney.
- Kamon, M. and S. Nontananandh. 1990. Contribution of Stainless - Steel Slag to the Development of Strength for Seabed Hedoro. **Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soil and Foundations** 30 (4): 63 - 72.

Mitchell, J.K. 1982. Soil Improvement-State-of-The-Art. **Report. Proc. X ICSMFE. Rotterdam.** Vol. 4 (1982): 533-537.

Nagamuthu, K. 1990. **Engineering Behavior of Fly Ash Its Effectiveness in Stabilizing Dispersive Soils.** M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology.

Nontananandh, S. 1990. **Industrial Waste Utilization as Construction Material by Chemical Stabilization.** Doctoral Thesis, Kyoto University.

Ruenkraitersa, T. 1982. **Principle of soil stabilization**, น. 27. อ้างใน ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์และสุเชษฐ์ เอี่ยมเชย. **ความคงทนของดินซีเมนต์.** กองวิเคราะห์วิจัย, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

Forteza, R., M. Far, C. Segui and V. Cerda. 2004. **Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerator for its use in road base.** Waste Management

Rhee, Yong-Heun. 1982. **Soil Stabilization with Lime and Fly Ash.** M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology.

Timimi, M., M. A. Rahal., M. Yahaioui and R. Jauberthie. 1998. Recycling of Fly Ash in the Consolidation of Clay Soils. **Resources Conversation and Recycling.** Vol. 24 (1998)

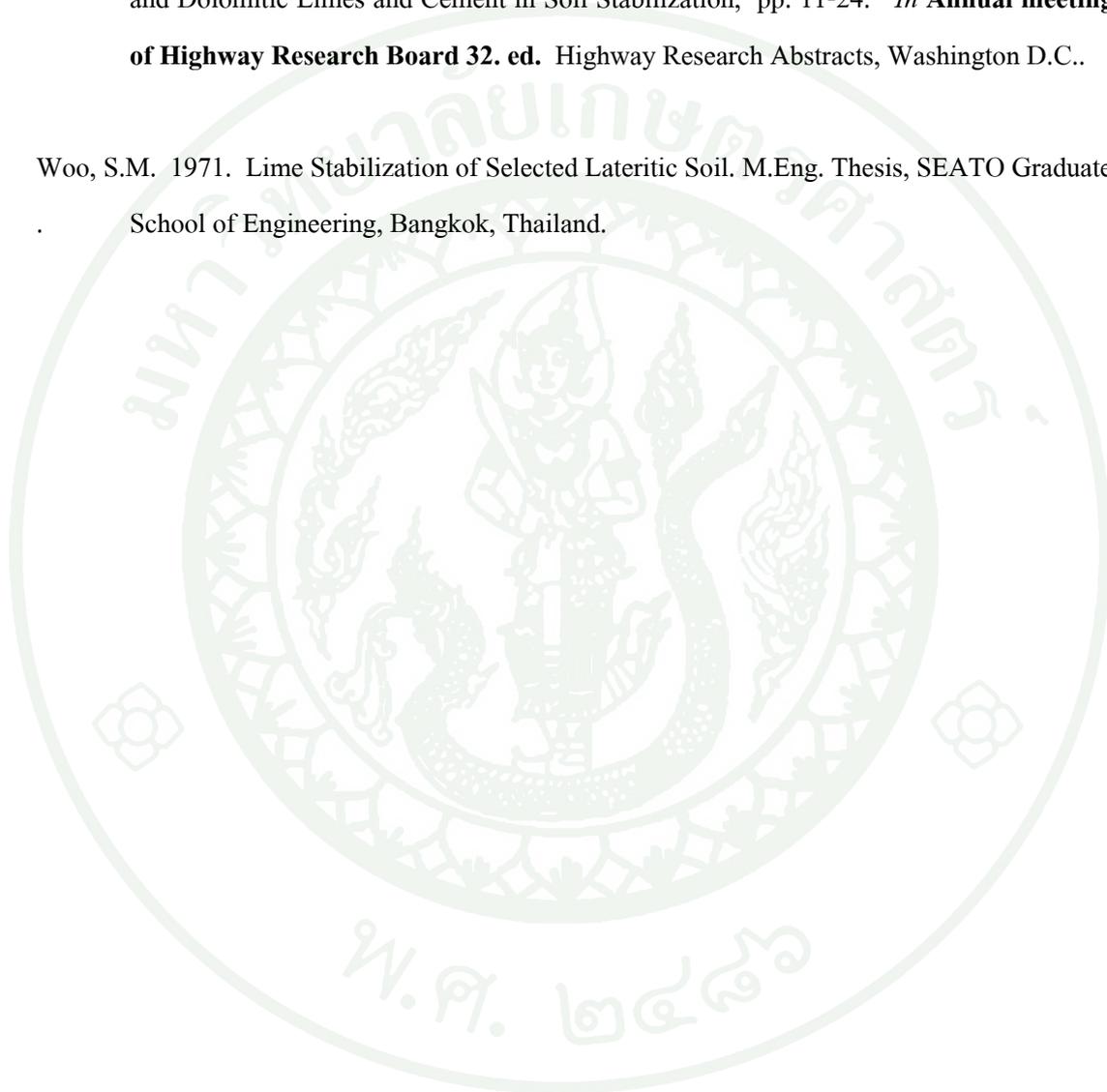
Torii, K. and M. Kawamura. 1991. **Effective Utilization of Coal Ashes in Road Construction.** Waste Material in Construction.

Tresselt, K. *et al.* 1998. Harbour sludge [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6VBB-3TB5SHN-1D&\\_user=10&\\_coverDate=12%2F31%2F1998&\\_alid=509833307&\\_rdoc=15&\\_fmt=summary&\\_orig=search&\\_cdi=5922&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=6755813b6b43fc38ee82ce1cfd4348a6](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VBB-3TB5SHN-1D&_user=10&_coverDate=12%2F31%2F1998&_alid=509833307&_rdoc=15&_fmt=summary&_orig=search&_cdi=5922&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=6755813b6b43fc38ee82ce1cfd4348a6) - hit2 as barrier material in landfill cover systems. **Science Direct, Water Science and Technology.** 37 (6-7): 307 - 313.

US Army Corps of Engineer. 1987. **Beneficial Uses of Dredged Material**. Engineering and design Manual, Washington, D. C.

Wang, J.W.H., M. Mateos and D.T. Davidson. 1963. Comparison Effects of Hydraulic, Cacitic and Dolomitic Limes and Cement in Soil Stabilization, pp. 11-24. *In Annual meeting of Highway Research Board 32. ed.* Highway Research Abstracts, Washington D.C..

Woo, S.M. 1971. Lime Stabilization of Selected Lateritic Soil. M.Eng. Thesis, SEATO Graduate School of Engineering, Bangkok, Thailand.



## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นายวุดินันท์ เหล่ามะลอ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	31 มกราคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2549 ปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน 2550
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-