

กำลังอัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการหมุนเวียน  
วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

# กำลังอัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการหมุนเวียน วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการนมหาบัณฑิตฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(ผศ. ดร.พรศิริ จงกล)

กรรมการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มงคล ดัชนี : กำลังอัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (COMPRESSIVE STRENGTH OF REPAIRED ROAD BY RECYCLING TECHNIQUE OF PAVEMENT MATERIALS) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดของถนนดินซีเมนต์ที่ใช้เทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยศึกษาด้านเป็ยกของความชื้นเหมาะสมสำหรับการบดอัด กำลังอัดของตัวอย่างที่ดำเนินการจากในสนามและห้องปฏิบัติการจะถูกวิเคราะห์โดยใช้หลักการทางสถิติ ซึ่งบ่งชี้ว่าปัจจัยหลักที่มีผลให้เกิดความแตกต่างกันของกำลังอัดดินซีเมนต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ คือวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน

ในทางกลับกัน หากต้องการปรับกำลังอัดในสนามให้ใกล้เคียงกับกำลังอัดในห้องปฏิบัติการโดยไม่เปลี่ยนแปลงวิธีการดำเนินการ ต้องใช้ตัวคูณเท่ากับ 2 ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการออกแบบ แนะนำให้ใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งมีประโยชน์ในแง่ของความประหยัดเพราะลดค่าใช้จ่าย จากจำนวนครั้งและเวลาในการทดสอบที่ลดลง แบบจำลองดังกล่าวมีความถูกต้องมากกว่าแบบเดิมเนื่องจากค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.90 ซึ่งมากกว่าของเดิม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2553

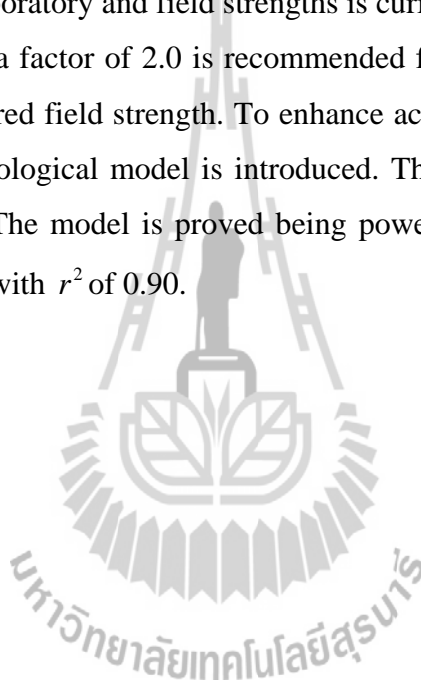
ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

MONGKOL DUCHANEE: COMPRESSIVE STRENGTH OF REPAIRED  
ROAD BY RECYCLING TECHNIQUE OF PAVEMENT. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D.

The study is aimed to investigate compressive strength of cement stabilized recycled pavement aggregate compacted at wet side of the optimum water content using pavement recycling technique. Results from field and laboratory specimens were analyzed in statistically manner. It is found that the major factor controlling difference between laboratory and field strengths is curing process.

Subsequently, a factor of 2.0 is recommended for adjusting laboratory design strength from the desired field strength. To enhance accuracy of mix design strength, a modified phenomenological model is introduced. This model is helpful because it saves cost and time. The model is proved being powerful in accuracy of predicting compressive strength with  $r^2$  of 0.90.



School of Civil Engineering  
Academic Year 2010

Student's Signature \_\_\_\_\_  
Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบคุณ กลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่กรุณาแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และพลังของจิตใจ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อย่างสุดซึ่งที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนข้อมูลที่มีคุณค่า ลากจูง กระตุ้นจนกระทั่งสำเร็จเป็นชิ้นงานนี้ได้

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ผู้แนะนำให้มาสมัครเรียน และเป็นอาจารย์ผู้สอน คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ผู้สอนทั้งในส่วนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรผู้มีความรู้จากภายนอก

ท่าน ผอ.ทวิ แสงสุวรรณ โณ ผู้อำนวยการกลุ่มวิเคราะห์ ทดสอบและควบคุมคุณภาพ สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท ที่อนุเคราะห์ข้อมูลที่มีคุณค่าสำหรับใช้เป็นข้อมูลในงานวิจัย

เพื่อน ๆ ร่วมชั้นเรียนทุกท่าน ที่ร่วมกันฟันฝ่า นำเรือลำแรกของสาขาวิชา จนกระทั่งถึงฝั่งฝันในโลกของความเป็นจริง

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อจ่านงค์ คุณแม่เล็ก คัชনীผู้เป็นบุพการี ที่ท่านกรุณาให้ ความรัก ความเอาใจใส่และสั่งสอนอบรม สนับสนุนให้การศึกษาจนได้มาถึงวันนี้ อีกทั้งขอบคุณภรรยาและลูกน้อยที่คอยเป็นกำลังใจให้ต่อสู้แม่ในยามเหนื่อยล้าหมดแรง สุดท้ายขอขอบคุณบุคคลที่อยู่ในครอบครัวคัชনী และครอบครัวบุญแจ่มทุกท่านที่ให้ความรักและความอบอุ่นเรื่อยมา

มงคล คัชনী

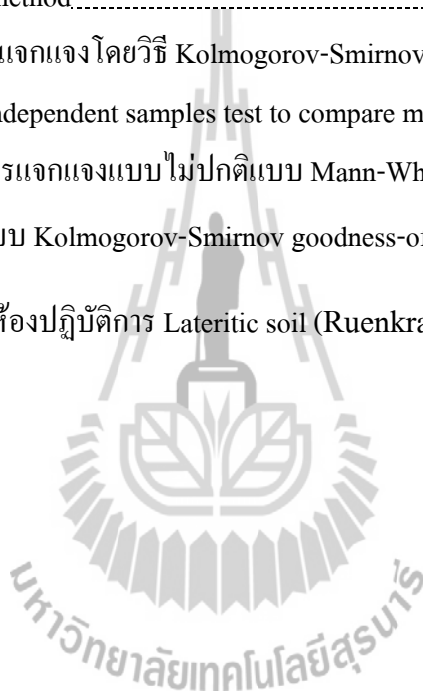
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อสำหรับการทำนายกำลังอัด.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อทางสถิติ.....	ญ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
1.1    ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3    ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.4.1    องค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป.....	4
1.4.2    ด้านเศรษฐศาสตร์.....	4
1.4.3    ด้านเทคนิคการก่อสร้างในอนาคต.....	4
2    ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1    บทนำ.....	5
2.2    ประวัติความเป็นมาของถนนดินซีเมนต์.....	5
2.3    ประเภทของดินซีเมนต์.....	6
2.4    กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์.....	7
2.5    โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	9
2.6    ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์.....	10
2.6.1    ปริมาณและประเภทของซีเมนต์.....	10
2.6.2    ชนิดของดิน.....	12
2.6.3    ปริมาณความชื้นขณะทำการบดอัด.....	18

2.6.4	การบ่มดินซีเมนต์.....	19
2.6.5	ระยะเวลาในการผสม.....	20
2.6.6	สารผสมเพิ่ม.....	22
2.7	กำลังของดินซีเมนต์.....	23
2.8	การนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ (Recycling).....	24
2.9	สมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	27
2.10	สมการทำนายกำลังของการนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ (Recycling).....	29
3	วิธีดำเนินการทำโครงการ.....	34
3.1	ชนิดของข้อมูลและแหล่งข้อมูล.....	34
3.2	ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	34
3.3	สถิติที่ใช้ในการวิจัย.....	35
3.3.1	ข้อมูลสถิติเบื้องต้น.....	35
3.3.2	สถิติที่ใช้ทดสอบสมมุติฐาน.....	35
3.4	การจัดทำข้อมูลและวิเคราะห์ผล.....	36
3.4.1	การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ.....	36
3.4.2	การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ.....	36
3.4.3	การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบ.....	36
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล.....	37
4.1	บทนำ.....	37
4.2	การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงของดินซีเมนต์.....	37
4.3	แบบจำลองเพื่อทำนายกำลังรับแรงอัดโดยการวิเคราะห์ความถดถอย.....	40
5	บทสรุป.....	50
	เอกสารอ้างอิง.....	51
	ประวัติผู้เขียน.....	56

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO.....	16
2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่างๆ.....	17
2.3 แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) กับวัสดุแต่ละชนิด.....	23
2.4 เปรียบเทียบข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของ Cold recycling process กับ Conventional method.....	27
4.1 สถิติตรวจสอบการแจกแจงโดยวิธี Kolmogorov-Smirnov tests ของ $q_{ufh}$ และ $q_{ufr}$ .....	37
4.2 สถิติการทดสอบ Independent samples test to compare means ของ $q_{ufh}$ และ $q_{ufr}$ .....	38
4.3 สถิติการทดสอบการแจกแจงแบบไม่ปกติแบบ Mann-Whitney test ของ $q_{ul}$ และ $q_{ufh}$ .....	39
4.4 สถิติการทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit ของ $\frac{q_{ufr}}{q_{ul}}$ .....	39
4.5 กำลังรับแรงอัดในห้องปฏิบัติการ Lateritic soil (Ruenkraitergsa และคณะ, 2001)....	47





## สารบัญรูปรภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของดินซีเมนต์..... 10
2.2	ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity index) กับเวลา (Time) ..... 13
2.3	ค่าพิกัดอัตราเบร์ก (Atterberg's limit) ของดินไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง ..... 14
2.4	อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ปริมาณซีเมนต์ 8%..... 15
2.5	อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 %..... 15
2.6	อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16 %..... 16
2.7	อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมขึ้นและการบดอัด ที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์..... 21
2.8	การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น..... 21
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial tangent modulus in tension กับกำลังดึง และกำลังอัดของดินซีเมนต์..... 24
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์..... 25
2.11	การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์..... 29
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อ ปริมาณซีเมนต์ ( $w_c / c$ ) กับกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006)..... 30
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของ Lateritic soil (Horpibulsuk et al., 2006)..... 31
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของ Crushed rock (Horpibulsuk et al., 2006)..... 32
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q_u$ , $w/C$ และเวลาบ่ม $D$ ของดินลูกรัง..... 41
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q_u$ , $w/C$ และเวลาบ่ม $D$ ของหินคลุก..... 41
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของ Lateritic soil..... 42
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของ Crushed rock..... 43

4.5	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $A'$ , $B$ และ $w/C$ ของ Lateritic soil.....	44
4.6	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $A'$ , $B$ และ $w/C$ ของ Crushed Rock.....	45
4.7	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $A$ และ $w/C$ ของ Lateritic soil และ Crushed Rock.....	46
4.8	เปรียบเทียบผลการทำนายกำลังรับแรงอัด เทียบกับ เส้น 1:1.....	49



**คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อสำหรับการทำนายกำลังอัด**

A	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
A'	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
ASSHTO	=	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
B	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
B'	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
C	=	Cement content
CBR	=	California bearing ratio
D	=	อายุบ่ม, วัน
GC	=	กรวดที่มีดินเหนียวปน
GW-GM	=	กรวดปนดินตะกอนที่มีขนาดละเอียด
LL	=	ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit)
MDD	=	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry-density)
OMC	=	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content)
PCA	=	Portland Cement Association
PI	=	ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity index)
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit)
SC	=	ทรายที่มีดินเหนียวปน
SM	=	ทรายปนดินตะกอน
SP	=	ทรายขนาดละเอียดไม่ดี
SW	=	ทรายขนาดละเอียด
SW-SM	=	ทรายปนดินตะกอนที่มีขนาดละเอียด
USCS	=	Unified Soil Classification System
UTM	=	เครื่องทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Universal testing machine)
a	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
b	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
pH	=	ดัชนีความเป็นกรดเป็นด่าง
q <sub>28</sub>	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน

$q_D$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D วัน
$q_u$	=	กำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง
$q_{ul}$	=	กำลังอัดแกนเดียวที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ
$q_{ulp}$	=	กำลังอัดแกนเดียวในห้องปฏิบัติการที่ทำนายได้โดยอาศัยสมการ
$q_{up}$	=	กำลังอัดแกนเดียวที่ทำนายได้โดยอาศัยสมการ
$q_{fh}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามแต่บดอัดในห้องปฏิบัติการ
$q_{fr}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ผสมที่ผสมและบดอัดในสนาม
$q_{(w_c/C)_{1,D}}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ $w_c / C$ หลังจากระยะบ่ม D วัน
$q_{(w_c/C)_{28}}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ $w_c / C$ หลังจากระยะบ่ม 28 วัน
$w$	=	Moisture content
$w_c / C$	=	อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/Cement Ratio)
$w / C$	=	อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/Cement Ratio)
$w_{fh}$	=	ปริมาณความชื้นดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ
$\alpha$	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
$\beta$	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
$\gamma_{dhf}$	=	หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ
$\gamma_{dfr}$	=	หน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่างที่เกิดจากการผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัด
$\gamma_{dmax}$	=	หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อทางสถิติ

$F$	=	ความน่าจะเป็นแบบเอฟ
$F(x)$	=	ความน่าจะเป็นสะสมของตัวอย่าง
$H_0$	=	สมมติฐานว่าง
$H_1$	=	สมมติฐานแย้ง
$S(x)$	=	ความน่าจะเป็นสะสมภายใต้สมมติฐานว่าง
$SD$	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$T_i$	=	$\sum X_{ij}$
$\bar{X}_i$	=	ค่าเฉลี่ยประชากร $i$
$Z$	=	ความน่าจะเป็นแบบปกติ
$d_0$	=	ค่าแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยประชากรกลุ่มที่ 1 กับกลุ่มที่ 2
$d_i$	=	$X_{1i} - X_{2i}$
$\bar{d}$	=	ค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่างกันประชากรกลุ่มที่ 1 กับกลุ่มที่ 2
$k$	=	จำนวนกลุ่มประชากร
$n_i$	=	จำนวนประชากร $i$
$t$	=	ความน่าจะเป็นแบบที
$\alpha$	=	ระดับนัยสำคัญ
$\sigma_i^2$	=	ความแปรปรวนของประชากร $i$
$\mu_i$	=	ค่าเฉลี่ยของประชากร $i$

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ถนนที่ก่อสร้างและถูกใช้งานมาระยะหนึ่ง มักจะเกิดความเสียหายเนื่องจากรับน้ำหนักของขดยาน หรือการเสื่อมสภาพของวัสดุเอง เช่นการหลุดร่อน การเกิดร่องล้อ และรอยแตกแบบต่างๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับการซ่อมแซม บำรุงรักษา เพื่อให้ถนนอยู่ในสภาพที่ดีและพร้อมใช้งานอยู่เสมอ งานซ่อมบำรุงแบ่งออกเป็น 2 งานหลักๆ คือการแก้ไข และการซ่อมบำรุง การซ่อมบำรุงทำให้ถนนกลับมาใช้งานได้ตามปกติ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น อันได้แก่การลดแรงที่จะเกิดในถนน โดยการจำกัดแรงคั่นลมยาง และน้ำหนักของรถบรรทุก การเสริมผิวทางเพื่อทำให้ผิวทางเรียบไม่เป็นคลื่น และการเพิ่มความแข็งแรงของถนนโดยเพิ่มความหนาของชั้นทางและผิวทาง ส่วนการซ่อมแซมสามารถทำได้โดยการการื้อผิวทางเก่าออกแล้วก่อสร้างใหม่ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุก และปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นได้ตามต้องการ นอกจากนี้การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) ก็เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถทำงานได้เร็วไม่รบกวนพื้นที่จราจรมาก วิธีนี้ถูกนำมาใช้ในประเทศไทยโดยกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย นำมาทดลองปรับใช้ตั้งแต่ปี 1965 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ทำได้โดยขุดหรือวัสดุในชั้นทางและผิวทางเดิมขึ้นมาผสมใหม่ โดยเพิ่มหินคลุก ทราย กรวด พร้อมทั้งเติมวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ เข้าไป

ถึงแม้ว่ามีการใช้เทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่มาเป็นเวลานานแล้วทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ แต่ในการออกแบบส่วนผสมยังทำในลักษณะเดิมๆ กล่าวคือจะเป็นการทดสอบแบบกึ่งลองผิดลองถูกเพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำไปใช้ นอกจากนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงความแตกต่างระหว่างกำลังของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ และกำลังของตัวอย่างในสนาม ทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดสอบมากเกินไป ในปี ค.ศ. 2003 Horpibulsuk และคณะ พบว่ากำลังของดินแต่ละชนิดที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียวคือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ ( $w/c$ ) และยังพบอีกว่าการพัฒนา กำลังของดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับล้อยกกาลิทึมของอายุการบ่ม ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Horpibulsuk และคณะ ได้ทำการศึกษากำลังของดินลูกรัง (Lateritic soil) และหินคลุก (Crushed rock) ผสมซีเมนต์โดยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ ในงานวิจัยนี้ได้แยกกำลังของดินซีเมนต์ออกตามวิธีการเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ กำลังของดินซีเมนต์บดอัดในห้องปฏิบัติการ

(Laboratory strength,  $q_{ul}$ ) กำลังของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามแต่บดอัดในห้องปฏิบัติการ (Field hand compacted strength,  $q_{fh}$ ) และกำลังของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม (Field roller compacted strength,  $q_{fr}$ ) Horpibulsuk และคณะ (2006) พบว่ากำลังของดินซีเมนต์ในสนาม จะมีค่าต่ำกว่ากำลังของดินซีเมนต์บดอัดในห้องปฏิบัติการ เป็นผลมาจากสามเหตุปัจจัยหลัก ได้แก่ การผสม การบดอัด และการบ่ม และในงานวิจัยเดียวกันนี้ Horpibulsuk และคณะ (2006) ยังได้นำเสนอ สัดส่วนระหว่างกำลังของดินซีเมนต์ประเภทต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการปรับแก้จากกำลังดินซีเมนต์ ในสนามเป็นกำลังดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ โดยกำลังของดินซีเมนต์ในสนามคือกำลังที่ต้องการ หรือกำลังออกแบบ ส่วนกำลังของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบ ส่วนผสม

งานวิจัยของ Horpibulsuk และคณะ (2006) นับว่ามีประโยชน์ในทางปฏิบัติอย่างมากในงานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่เสนอ จะใช้กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่มีอายุการบ่ม 28 วัน เป็นตัวหาร ส่งผลให้แบบจำลองได้ผลการคำนวณที่มีค่าคลาดเคลื่อนมากยิ่งขึ้นเมื่ออายุการบ่มออกห่างจาก 28 วัน ทั้งนี้ในทางปฏิบัติจะใช้กำลังอัดที่ 7 วันในการออกแบบและตรวจสอบ ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม นอกจากนี้ระหว่างการทำงานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ เครื่องจักรจะกัดผิวทางขึ้นมาผสมและบดอัดใหม่ ทั้งนี้ความหนาของผิวทางที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ด้วย ความหนาของผิวทางจึงเป็นปัจจัยควบคุมสำคัญตัวหนึ่ง หากสามารถพัฒนาแบบจำลองโดยต่อยอดแนวความคิดของแบบจำลองที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ (2006) โดยลดความคลาดเคลื่อนของกำลังอัดที่ทำนายได้ที่อายุบ่มต่าง ๆ ครอบคลุมทุกประเภทของดินและทุกความหนาของผิวถนนที่ใช้งานในประเทศไทย ก็จะเพิ่มประสิทธิภาพในงานซ่อมถนนโดยการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ นอกจากนี้เนื่องจากข้อมูลที่เก็บได้มีจำนวนมากพอ ผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถนำหลักสถิติมาช่วยสรุปความสำคัญของแต่ละปัจจัยควบคุมซึ่งมีผลต่อกำลังดินซีเมนต์ในสนามได้แก่ การผสม การบดอัด และการบ่ม ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ต่อวิศวกรที่เกี่ยวข้องอย่างมาก ในการควบคุมคุณภาพงานได้ดีขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อรวบรวมข้อมูลดินซีเมนต์ในงานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่จากสถานที่ก่อสร้างทั่วประเทศไทย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของกำลังดินซีเมนต์ในสนาม

- 1.2.3 เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการออกแบบส่วนผสมดิน ซีเมนต์ น้ำ ที่เหมาะสม และมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นในการทำนายกำลังอัด และใช้ได้กับงานหมุนเวียน วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ในประเทศไทย

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

แยกขอบเขตการวิจัยได้เป็น 3 หัวข้อดังนี้

- 1.3.1 ทดสอบหรือรวบรวมข้อมูลกำลังของดินบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ ) กับปัจจัยควบคุมได้แก่ ชนิดของดิน ความหนาของชั้นผิวทางที่กดขึ้นมา และอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ ทั้งนี้ในการศึกษาจะใช้ดินสองชนิดคือดินลูกรัง และหินคลุก ส่วนความหนาของชั้นผิวทางจะมีตั้งแต่ความหนาเท่ากับ 0 เซนติเมตร 3 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร สำหรับอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.83-10.40
- 1.3.2 สำหรับ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดินบดอัดในสนามกับกำลังดินบดอัดในห้องปฏิบัติการ จะแยกกำลังของดินบดอัดออกเป็น 3 ประเภท ตาม Horpibulsuk และคณะ (2006) ได้แก่ กำลังของดินซีเมนต์บดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ ) กำลังของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามแต่บดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{fh}$ ) และกำลังของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม ( $q_{fr}$ )
- 1.3.3 สำหรับการศึกษ้อิทธิพลที่มีผลต่อการลดลงของกำลังดินบดอัดในสนาม ได้แก่ การผสม การบดอัด และการบ่ม จะทำการศึกษาผ่านความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของดินซีเมนต์บดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ ) กำลังของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามแต่บดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{fh}$ ) และกำลังของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม ( $q_{fr}$ )



## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.4.1 องค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เป็นการสร้างทฤษฎีของการปรับปรุงกำลังของดินด้วยซีเมนต์ ที่รวมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังดินซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ ชนิดของดิน ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ ระยะเวลาในการบ่ม ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นต้นแบบเพื่อให้นักวิจัยที่สนใจ ได้นำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป

### 1.4.2 ด้านเศรษฐศาสตร์

ผู้วิจัยจะนำเสนอทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังของดินซีเมนต์ ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบในการกำหนดปริมาณส่วนผสมต่างๆ รวมทั้งลดจำนวนครั้งสู่มหาปริมาณที่เหมาะสม พร้อมทั้งวางแผนระยะเวลาในการก่อสร้างให้สอดคล้องกับข้อกำหนด อีกทั้งสามารถประมาณกำลังของดินซีเมนต์จากข้อมูลและเวลาที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ พร้อมทั้งใช้ตรวจทานความถูกต้องของผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

### 1.4.3 ด้านเทคนิคการก่อสร้างในอนาคต

ผู้วิจัยจะนำเสนอข้อมูล อิทธิพลของปัจจัยควบคุม การผสม การบดอัด และการบ่ม ที่ส่งผลกระทบต่อการลดลงของกำลังดินซีเมนต์ในสนาม พร้อมทั้งเสนอวิธีการควบคุม เพื่อให้กำลังในสนามมีค่าใกล้เคียงกับในห้องปฏิบัติการ

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพของดินให้มีกำลังอัดสูงขึ้น สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่นการลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยการบดอัด การลดความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดิน การทำให้อุณหภูมิของดินเป็นก้อนใหญ่ (Flocculation) หรือการทำให้ดินมีขนาดคละที่ดีขึ้น และการเติมสารเชื่อมประสาน ในบทนี้จะทบทวนงานวิจัยปรับปรุงดินซีเมนต์

#### 2.2 ประวัติความเป็นมาของถนนซีเมนต์

กล่าวกันว่าความคิดเรื่องการปรับปรุงคุณภาพของดิน ด้วยการใส่สารผสมเพิ่มมีมานานกว่า 5000 ปีแล้ว โดยการผสมดินกับปูนขาว ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินให้ดีขึ้น (Terrel et al., 1797)

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ไว้ในคำนำใน Highway Research Bulletin ว่าเริ่มต้นในปี ค.ศ.1915 เมื่อการก่อสร้างถนน Oak ในเมือง Sarasota รัฐ Florida ประสบปัญหาเครื่องผสมคอนกรีตเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ ถนน Oak จึงถูกสร้างโดยการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวขึ้นมาผสมกับทรายและซีเมนต์แล้วทำการบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน แทนการทำถนนคอนกรีตราวๆ ปี ค.ศ. 1920 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับถนน ในประเทศรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้เริ่มทดลองก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ แต่ผลการทดลองที่ได้มีความผันแปรอย่างมากจนไม่สามารถคาดการณ์ผลลัพท์ได้ เนื่องจากความรู้ความเข้าใจเรื่องคุณสมบัติทางวิทยาศาสตร์ของดินในขณะนั้นยังมีน้อยมาก

Mills (1935, 1936) ได้รายงานผลการค้นคว้าของ South Carolina State Highway Department ในปี ค.ศ.1932 โดย Dr. C.H. Moorefield ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินกับซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างถนนหลายสายในปี ค.ศ. 1933 และปี ค.ศ. 1934 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนที่มีราคาถูก

Davidson (1961) และ Terrel et al., (1797) ได้บันทึกตรงกันว่าในปี ค.ศ.1935 South Carolina State Highway Department, Bureau o Public Roads และ Portland Cement Association ได้ร่วมกันก่อสร้างถนนซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ใกล้ๆ กับเมือง Jonhsonville เพื่อเป็นการยืนยัน

ผลการวิจัยของ South Carolina State Highway Department ต่อมาถนนดินซีเมนต์สายนี้เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นโครงการแรกเกี่ยวกับวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์ และจากความสำเร็จของโครงการนี้ทำให้มีการทดลองขึ้นในอีกหลายรัฐของสหรัฐอเมริกาที่ Portland Cement Association เป็นผู้ทดลองสร้าง

Davidson (1961) รายงานว่า ในปี ค.ศ. 1941-1944 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง ถนนดินซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสนามบินมากถึง 22 ล้านตารางหลา แต่ในขณะเดียวกัน การก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นอีก นอกจากดินซีเมนต์จะถูกใช้ทำถนนแล้ว ยังมีการใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้า วัสดุรองพื้นอ่างเก็บน้ำ และอุโมงค์อีกด้วย

The Siam Cement Company Ltd. (1965) ได้ทดลองนำดินผสมซีเมนต์มาใช้เป็นพื้นทางของถนนสาย วารินชำราบ-เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี เป็นสายแรกในประเทศไทยซึ่งมีความยาว 5 กิโลเมตร โดยดินลูกรังที่กำหนดค่า CRB ของดินซีเมนต์ไว้ไม่น้อยกว่า 120 สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ และกำหนดค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 852 กิโลปาสคาล สำหรับถนนประเภทต่ำกว่ามาตรฐาน

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสด จรัสกร (2544) ได้ทำการวิจัยโดยนำดินลูกรัง และดินทรายปนดินตะกอนมาผสมซีเมนต์ สรุปผลได้ว่าพลังงานในการบดอัดมีผลอย่างมากต่อกำลังของดินซีเมนต์ โดยมีความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm model) โดยที่ค่าแรงอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงานบดอัดต่ำ และจะช้าลงเมื่อพลังงานบดอัดสูง

## 2.3 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization (1959) ให้คำจำกัดความของ Cement – Treated soil ว่าเป็นการนำเอาดินและซีเมนต์มาผสมกับน้ำในปริมาณที่ต้องการแล้วทำการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด ป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียนระหว่างบ่ม จากลักษณะการใช้งานและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม สามารถแบ่งดินผสมซีเมนต์ออกได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

Soil-Cement เป็นดินที่ผสมซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA), ASSHTO หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวมีกำลังอัดหรือแรงแบกทานตามที่กำหนด สำหรับดินที่มีขนาดละเอียดจะใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 5-7 เปอร์เซ็นต์ และจะสูงกว่านี้ หากดินมีขนาดละเอียดหรือมีค่าดัชนีพลาสติก

สูง (Plasticity Index) กรณีที่ค่าดัชนีพลาสติกสูง ในการทำ Soil-Cement ควรทำการผสมปูนขาวเพื่อลดค่าดัชนีพลาสติกลง

Cement modified silty Clay Soil มักจะใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงของผิวหน้าดินเดิมที่เป็นดินเหนียว ที่มีลักษณะเปียกแฉะและมีความอ่อนตัวมากให้มีความแข็งแรงพอที่ขบวนจะผ่านได้โดยไม่ลื่นไถล ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์

Cement Modified Granular Soil จะใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเป็นพลาสติก การบวมตัว และการดูดซึมน้ำบน Cement Modified Crush Rock ที่มักจะใช้เป็นพื้นทางของถนนที่มีผิวทางทั้งแบบยึดหยุ่นและมีผิวทางเป็นคอนกรีต โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมีค่าประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดิน

Plastic soil cement มักใช้ในงานลาดปูนบนพื้นที่ลาดเอียง เช่นปูด้านข้างถนนเพื่อการระบายน้ำ ดาดท้องคลองชลประทานและกันอ่างเก็บน้ำ ดังนั้น Plastic soil cement จะต้องมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Cement treated soil slurry and grouts เป็นซีเมนต์ที่ผสมกับวัสดุประเภททรายและน้ำโดยมีปริมาณน้ำสูงมาก อาจมีส่วนผสมเพิ่มอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของส่วนผสมให้มีค่า Workability สูง โดยปกติวัสดุประเภทนี้จะใช้เป็น Mud jacking material ในงานซ่อมบำรุงถนนที่เกิดปัญหาการทรุดตัวของคันทางหรือถูกน้ำกัดเซาะ และใช้เป็น Grouting material สำหรับยาหรืออุดรอยรั่วที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ส่งน้ำ

## 2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์

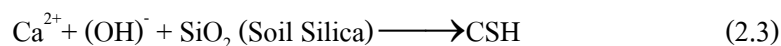
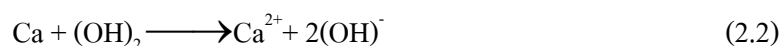
Lambe et al. (1959) อธิบายว่าซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate (C3S), Dicalcium Silicate (C2S), Tricalcium Aluminate (C3A) , Tetracalcium Aluminate Ferrite (C4AF) เมื่อผสมกับน้ำและดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrate Lime ที่แยกตัวออกมาขณะเกิดปฏิกิริยา สารประกอบ CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสาน เมื่อน้ำระเหยออกไป นอกจากนั้น Released Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นในขบวนการดังกล่าวยังทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ทำให้ Colloid gel หรือ Cement Gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัวแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ในดินเม็ดหยาบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การยึดเกาะกันของเม็ดจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ว่า Cement Paste จะไม่อุดเต็มช่องว่างอนุภาคของเม็ดดิน แรงเชื่อมยึดติดจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical interlock ของอนุภาคเม็ดดินที่มี CSH และ CAH เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคของเม็ดดิน

สำหรับดินเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบไปด้วยแรงทางด้าน Mechanical Interlock และ Chemical Cementation การยึดเกาะทางด้าน Chemical Cementation นั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ตามผิวของเม็ดดิน โดยมีน้ำเป็นตัวกลาง การเกิดปฏิกิริยาทำให้สารประกอบ CSH, CAH เพิ่มขึ้น และทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกัน

Davidson (1961) กล่าวว่า หลังการผสมซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้น จะทำให้ค่าพลาสติก (Plasticity) ลดลง เหตุผลน่าจะมาจากการแยกตัวของ Calcium ion ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไกที่เกิดขึ้นถ้าไม่มาจากการแลกเปลี่ยนของ Cat ion ก็น่าจะมาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cat ion ในดินเหนียว กระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้อนุภาคของดินเหนียวรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนี้ทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติคล้ายดินตะกอนคือมีค่าพลาสติก (Plasticity) ต่ำ

Herzog (1963) กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นการเกิดสารประกอบ CSH, CAH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาในช่วงแรก ส่วนปฏิกิริยาช่วงที่สองซึ่งต้องใช้เวลาอันยาวนาน เป็นปฏิกิริยาระหว่าง Calcium ion ที่เกิดจาก Released hydrated Lime ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ในเม็ดดิน มีผลทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่นานขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าว รู้จักกันว่าปฏิกิริยาพอสโซลานิก

Moh (1965) ได้ศึกษาเรื่องปฏิกิริยาของแร่ประกอบดินเหนียว กับซีเมนต์และสารเคมีผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม และได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมี ดังต่อไปนี้



Pendola et al. (1969) สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้น เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำและดินซึ่งประกอบด้วยกลไก 4 ชนิดคือ

Hydration of cement คือกระบวนการที่สำคัญ โดยขณะที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็น โครงข่ายที่แข็งแรง ต่อเนื่องมากบ้างน้อยบ้างตามการคละขนาดของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้ว ยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดินทำให้ลดซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดิน รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบๆ อีกด้วย

Cat ion Exchange การลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังการผสมซีเมนต์กับดินประเภทที่มีความเชื่อมแน่นที่มีความชื้น เชื่อว่าเกิดจากการเปลี่ยน Cat ion หรือการรวมตัวกันของ Cat ion บนผิวของเม็ดดิน ปฏิกิริยาที่ว่าจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมซีเมนต์

Carbonation คือขบวนการเชื่อมแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Calcium Carbonate ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น

Pozzolanic Reaction คือขบวนการระหว่าง Free Lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยระยะเวลาและส่งผลให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

Terrel et al. (1979) กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดหยาบซีเมนต์เฟส จะทำหน้าที่ยึดอนุภาคเม็ดดินเข้าด้วยกัน โดยทำการยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจลและผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียด แร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า  $pH$  สูง จะทำปฏิกิริยากับ Free Lime หรือ Hydrate Lime ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด CSH และ CAH

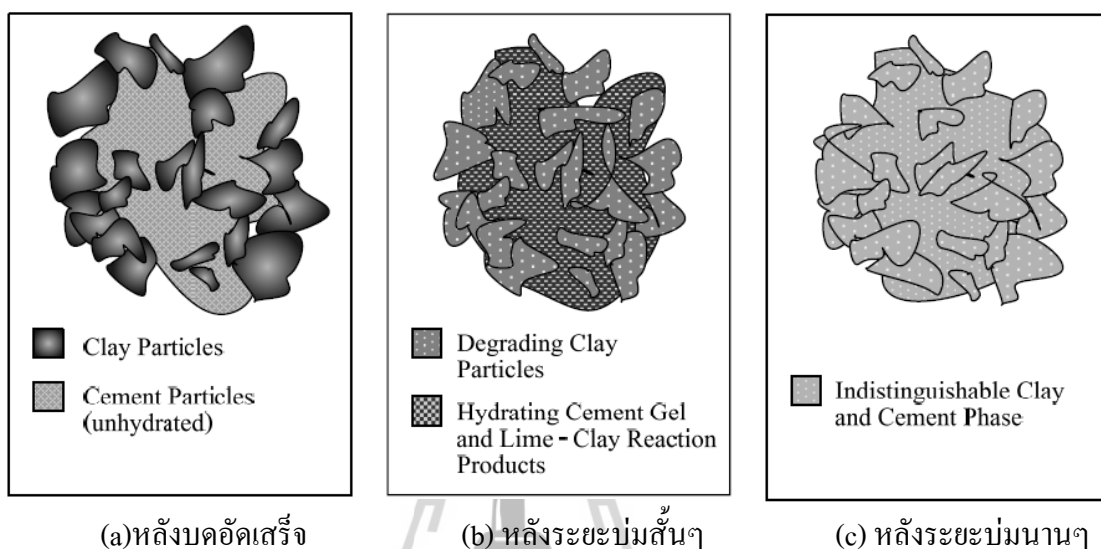
## 2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Czernin (1962) กล่าวว่าหลังจากที่ผสมซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดสารประกอบ CSH ในรูปของเจลขึ้นในส่วนผสมของซีเมนต์และน้ำ ดังนั้นจึงสามารถที่จะเข้าใจได้ว่าภายใต้การบดอัด อนุภาคของปูนซีเมนต์ก็ได้ผสมกับดินเพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันด้วย

Mitchell and El Jack (1966) ใ้คำอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 โดยแบ่งเป็น 3 ระยะดังนี้

ภายใต้การบดอัด ช่วงนี้เป็นช่วงที่อนุภาคของปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน แต่อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเข้าผสมกับอนุภาคของดิน รูปที่ 2.1(a)

ภายใต้การบ่มในระยะเวลาสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อย Lime ออกมาทำปฏิกิริยา Soil Silica และ Soil Alumina ที่มีอยู่ในดินทำให้เกิดการแยกตัวของสารทั้งสอง จากนั้นซีเมนต์เจลและสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาจะแทรกซึมไปตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(b)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ El Jack, 1966)

ภายใต้การบ่มในระยะเวลายาว จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ อันมีผลทำให้ซีเมนต์เจลและขอบเขตของการแทรกซึมกระจายไปทั่วก้อนดินซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม ดังรูปที่ 2.1 (c)

## 2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์

### 2.6.1 ปริมาณและประเภทของซีเมนต์

Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์โดยนำดินสามชนิดคือ Loamy Sand, Medium Clay และ Silty clay loam มาทดสอบผสมซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 – 30 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วัน จนถึง 1 ปี และผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบ คือ Wet-dry และ Freeze – thaw ตั้งแต่ 12 รอบ ถึง 96 รอบ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก ดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำ และค่าความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้

นอกจากนั้น Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดินสองชนิดคือ Silty Clay Loam และ Sandy Loam มาผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 พบว่าดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังที่สูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินทุกชนิด เช่น ดิน Sandy Loam ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะใช้กำลังอัดเป็นสองเท่าของดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน และเป็น 1.4 เท่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty Clay Loam เมื่อผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

คุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ถูกศึกษาอย่างจริงจังโดย Terashi et al. (1979) และต่อมาก็มีการศึกษาด้านนี้มากขึ้นเรื่อยๆ เช่น Kawasaki et al. (1981), Nontananandh and Yupakorn (2002) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สรุปว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์คือ ปริมาณน้ำ และปริมาณซีเมนต์

Ruenkrairergsa (1982) อธิบายว่าปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมากจะให้กำลังอัดต่ำ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจึงควรหาจากการทดลองในห้องทดลอง

Lade and Overton (1989) ได้ศึกษาผลของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) ในดินเม็ดหยาบ ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นที่เท่ากัน ปริมาณน้ำที่ผสมเท่ากัน และแรงดันรอบข้างต่ำ แต่แตกต่างกันที่ปริมาณซีเมนต์ที่ผสม พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังดึง และค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) จะเพิ่มขึ้น

Clare and Pollard (1951) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดิน 3 ชนิดในประเทศอังกฤษมาผสมกับซีเมนต์ พบว่ามีอายุบ่ม 24 ชั่วโมง ดินซีเมนต์จะมีกำลังอัดสูงมากเมื่อผสมดินกับซีเมนต์ประเภท High – Alumina ขณะที่ซีเมนต์ประเภทอื่นต้องมีอายุการบ่ม 5 วัน และถ้าใช้ซีเมนต์ประเภท British Rapid Hardening ซึ่งเทียบได้กับซีเมนต์ประเภทที่สาม พบว่าที่อายุการบ่มเท่ากัน ค่ากำลังคราก (Yield Strength) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมาก

Massachusetts Institute of Technology (1954) ได้นำดินตะกอนปนทราย และดินเหนียว (Clayey Sandy Silt) ในรัฐไอโอวา มาผสมกับซีเมนต์ และพบว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่สามจะมีกำลังอัดสูงกว่า ดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง 1.5 เท่า และ 1.3 เท่า ที่ระยะบ่ม 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ

Davidson and Bruns (1960) ได้รายงานผลเกี่ยวกับกำลังอัด โดยวิธีทดสอบ Freeze thaw ของดินทราย ดินตะกอน และดินเหนียว บริเวณรัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา และสรุปว่าการ



ใช้ซีเมนต์ประเภทสาม ในการก่อสร้างถนนจะประหยัดกว่าใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง เพราะว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาในการบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่ว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่สาม จะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่า ทำให้ได้เปรียบเรื่องระยะเวลาในการก่อสร้าง

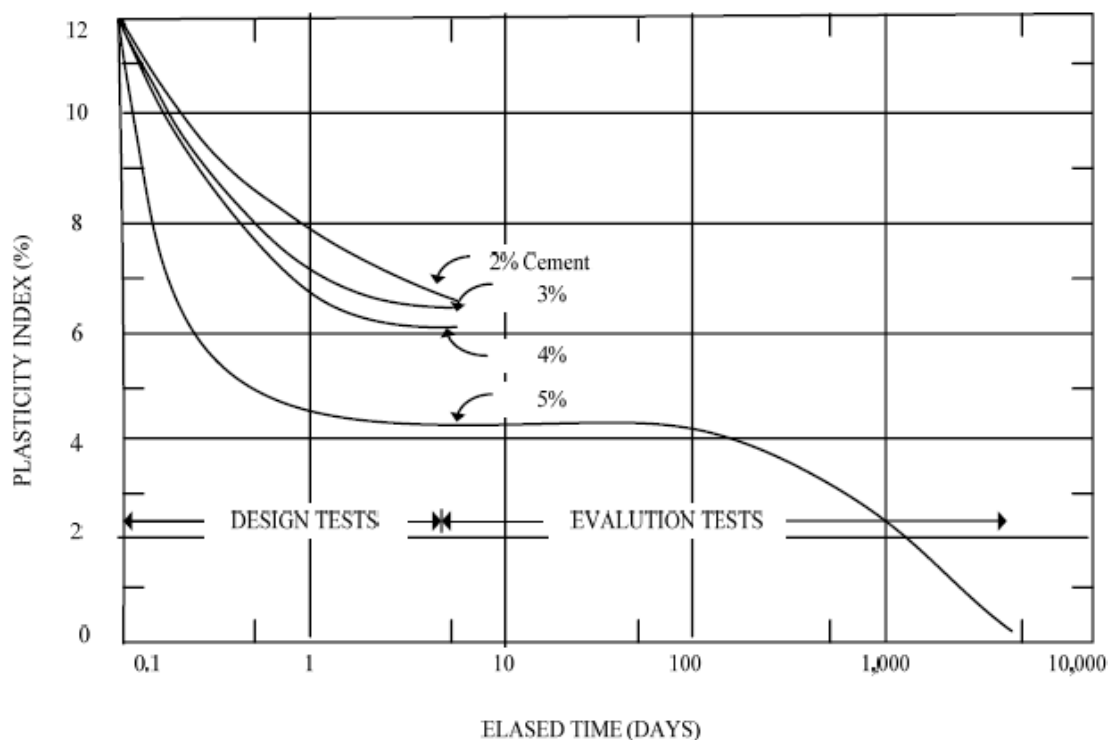
Horpibulsuk (2001), Miura et al. (2001) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ สามารถรวมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้ ตัวแปรนี้เรียกว่า Clay – water/Cement Ratio (Wc/C) และถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักฝั่งแห้งและ Horpibulsuk (2001) ยังได้สร้างสมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยอาศัยผลการทดสอบเพียงค่าเดียว

ทรงพล บุญมาติ (2529) ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ และสรุปว่า กำลังอัดของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะลดลง

#### 2.6.2 ชนิดของดิน

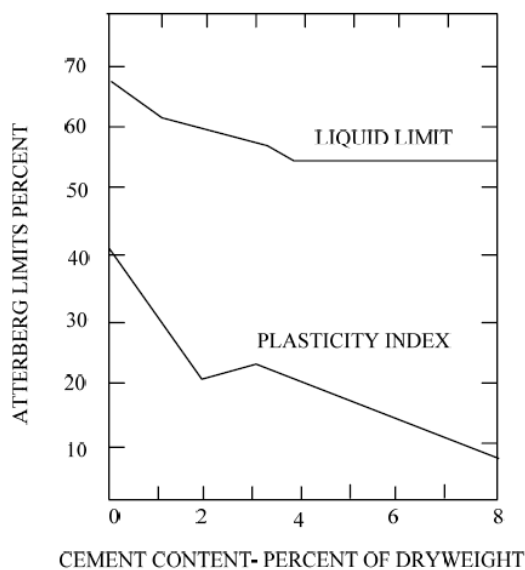
Winterkorn and Chandrasekharn (1951) รายงานผลการทดสอบดินลูกรังผสมซีเมนต์ว่า จะได้ผลดีหรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดิน และ Degree of Lateralization ของดินลูกรัง

Reinhold (1955) ได้นำทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัส ยืดหยุ่น ที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียว พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น กำลังอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา (Redus, 1958)

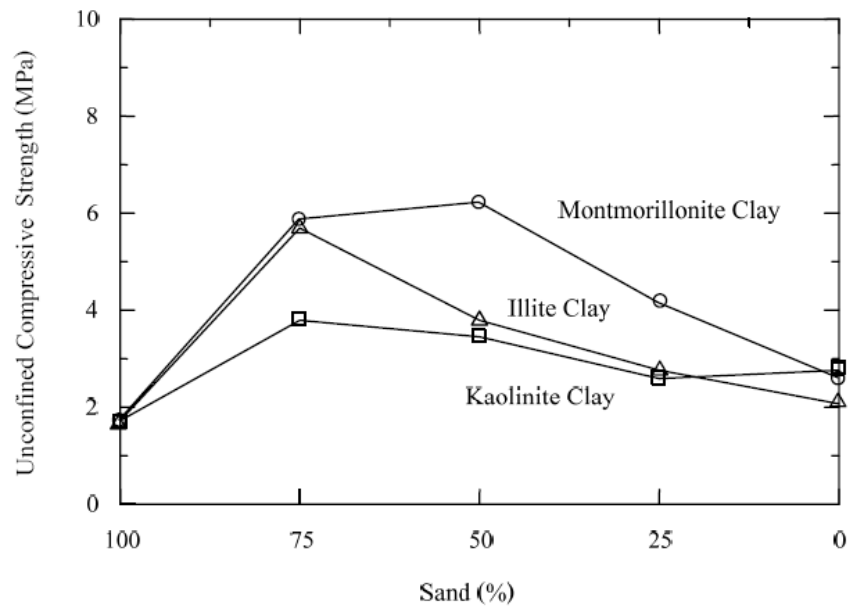
Redus, (1958) ได้นำดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (Base course) ของสนามบินต่างๆ ซึ่งมีอายุการใช้งานนานหลายปี มาทำการทดสอบหาค่าพิกัดอะตตะเบอร์ก (Atterber's Limit) พบว่าปริมาณซีเมนต์มีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของดัชนีพลาสติก ดังรูปที่ 2.2 กล่าวคือถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมมาก ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมน้อย ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้ ระยะเวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก็มีผลต่อการลดลงของค่าดัชนีพลาสติก ผลการศึกษานี้ตรงกับผลการวิจัยของ Spangler and Patel (1949) ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพลาสติกกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใน 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ค่าพิคัดอัตราตะเบีร์กของดินไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง (Spanler et al., 1949)

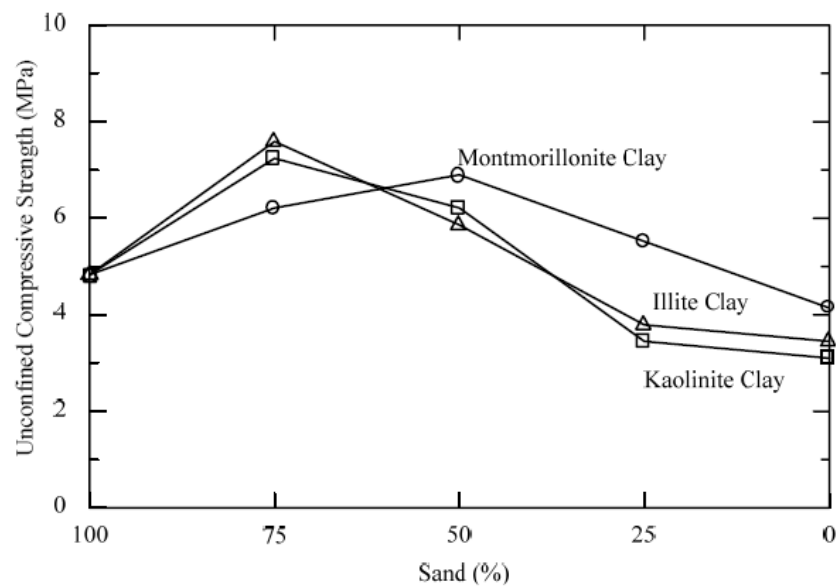
Norling and Peckard (1958) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้ดิน 3 ชนิด คือ ทรายหยาบ ทรายละเอียด และทรายดินเหนียวผสมซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากัน แต่แปรผันมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 แล้วทำการทดสอบหาค่าลึงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน และพบว่า Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะมีค่าลึงอัดลดลง เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้นเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

Davidson et al. (1962) ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมกับดินเหนียวในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0 , 75:25 , 50:50 , 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ (Kaolinite), อิลไลท์ (Illite) และมอน โมริลโลไนท์ (Montmorillonite) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.4 รูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 สรุปว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวมากไป (เกินกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) จะทำให้ค่าลึงอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด โดยที่ดินเหนียวจำพวกมอน โมริลโลไนท์ มีแนวโน้มว่าจะมีค่าลึงสูงกว่าดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ และจำพวกอิลไลท์



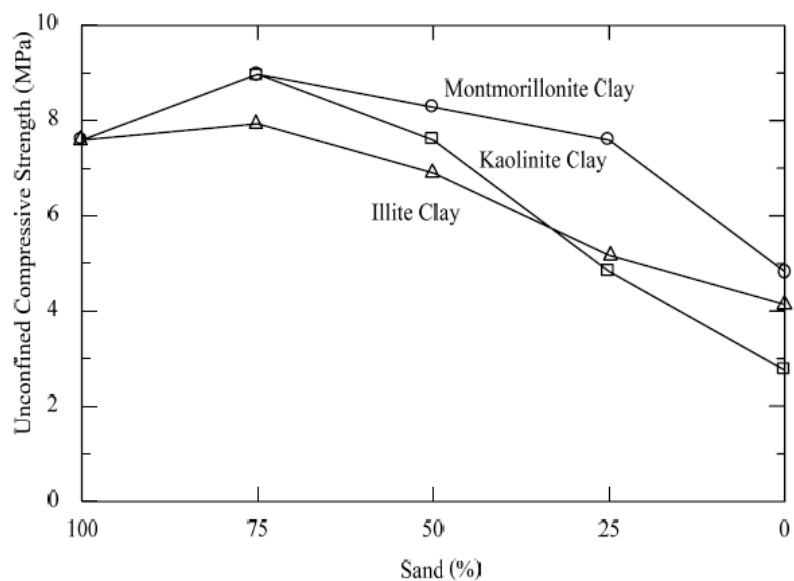
รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8%

(Davidson et al. 1962)



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12%

(Davidson et al. 1962)



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16% (Davidson et al. 1962)

Portland Cement Association (1959) ได้จำแนกความต้องการปริมาณซีเมนต์ของดินกลุ่มต่างๆ ตามระบบ ASSHTO ไว้ในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตาราง 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO (ข้อมูลจาก Portland Cement Association, 1959)

ASSHTO Soil group	Usual range in cement Requirement		Estimated cement content And that used in the moisture-density test (% by wt.)	Cement content for wet-dry and freeze-thaw test (% by wt.)
	(% by vol.)	(% by wt.)		
A-1-a	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	8-12	7-11	9	7-9-11
A-4	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	10-14	10-16	13	10-13-15

ตาราง 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่างๆ  
(ข้อมูลจาก Portland cement Association, 1959)

Type of miscellaneous material	Estimated cement contented and That used in moisture – density test		Cement contented for wet-dry and Freeze-thaw Test (% by wt.)
	% by vol.	% by wt.	
Shell Soil	8	7	5-7-9
Limestone screening	7	5	3-5-7
Red-dog	9	8	6-8-10
Shale or disintegrated Shale	11	10	8-10-12
Caliche	8	7	5-7-9
Cinders	8	8	6-8-10
Chert	9	8	6-8-10
Chat	8	7	5-7-9
Marl	11	11	9-11-13
Scoria(Retaining No.4 material)	12	11	9-11-13
Scoria (Passing No.4 material only)	8	7	5-7-9
Air-Cooled slag	9	7	5-7-9
Water-cooled slag	10	12	10-12-14

Moh et al. (1967) รายงานว่า ดินลูกรังในประเทศไทย ที่มีค่า PI ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 4 ถึง 7 จะให้ค่ากำลังอัดมากกว่า 852 กิโลปาสกาล ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory ที่มีประสบการณ์ในการทดลองใช้ในแอฟริกาและยังเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการบดอัดว่าถ้าค่าร้อยละของการบดอัดลดลงเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงอย่างเห็นเด่นชัด

Bell (1976) พบว่าแร่ดินเหนียว Montmorillonite เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาว จะทำให้ Aqueous phase ลดลง ทำให้สาร Cementitious ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะอยู่ในปูนขาวไม่เพียงพอต่อการแข็งตัว การแก้ไขคือ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่ม Free lime ให้มากขึ้นโดยปกติการเพิ่มซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ดินจำพวก Montmorillonite มีคุณภาพดีสามารถนำมาใช้งานได้

### 2.6.3 ปริมาณความชื้นขณะบดอัด

Felt (1955) และ Davidson et al. (1962) ศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อกำลังอัด และความชื้นกับน้ำหนักที่สูญเสียจากการทำ Wet-Dry และ Freeze – Thaw ได้ผลตรงกันว่า ปริมาณความชื้น และความหนาแน่นมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทราย ควรทำการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ส่วนดินเหนียวควรบดอัดดินที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จึงจะให้กำลังอัดสูงสุด

Ruenkairergsa (1982) ได้อธิบายว่าการนำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของพร็อกเตอร์ (Proctor) มาใช้ในงานดินซีเมนต์นั้น พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากจะให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์อีกด้วย สำหรับดินซีเมนต์ ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าจะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนมากที่สุดเสมอไป จากการทดลองหาความคงทนด้วยวิธี Freeze – Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์พบว่า ความคงทนจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย ทำการบดอัดที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม จะทำให้ค่าความคงทนลดลง สำหรับดินทรายผสมซีเมนต์ ความแข็งแรงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อบดอัดที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 3-6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินเหนียวเมื่อบดอัดที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จะให้ความแข็งแรงสูงสุด

Lightsey et al. (1970) ได้รายงานว่าบางครั้งการบดอัดดินซีเมนต์ให้มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry – Density, MDD) ก็ไม่ได้ทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากที่สุดเสมอไป เนื่องจากการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด จากการศึกษาดินตัวอย่าง 4 ชนิด ได้แก่ Silty Loam, Sandy Loam, Silt และ Silty Clay Loam บดอัดด้วยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมร้อยละ เมื่อผสมเสร็จทิ้งไว้เป็นเวลา 0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ก่อนทำการบดอัด พบว่าปริมาณน้ำส่วนเกินที่ต้องการเพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และเวลาระหว่างการผสมควบคู่กับการบดอัด สำหรับดินเม็ดหยาบ ปริมาณน้ำที่เพิ่มในการบดอัดจะเพิ่มการหล่อลื่นระหว่างเม็ดดินทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความคงทน เมื่อมีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด ส่วนดินเม็ดละเอียด การเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัดจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์ขึ้น เป็นผลทำให้คุณสมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้น โดยที่คงไม่มีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด

#### 2.6.4 การบ่มดินซีเมนต์

Highway Research Board (1949) ได้รายงานเกี่ยวกับการรักษาความชื้นของดินผสมซีเมนต์ในสนามโดยการฉาบผิวทางใน 4 วัสดุช่วย Bituminous seal 4 ชนิด คือ MC-2, RC-1, MC-3 และ Asphalt emulsion ว่าวัสดุฉาบผิวทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการเก็บรักษาความชื้นระหว่างการบ่ม 7 วัน ในสนามได้เป็นอย่างดี

Clare and Pollard (1951) สรุปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังของดินซีเมนต์ว่าที่อุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงขึ้น 2-2.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่อากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรกหลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวกว่าร้อยละ 50-100

Maner (1952) ได้ทดลองให้วัสดุต่างๆ ได้แก่ Waterproof Paper, Calcium Chloride, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt emulsion ในการบ่มพื้นทางดินซีเมนต์พบว่าวัสดุ Bituminous Asphalt ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof paper ใช้งานได้ผลดี นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นในอากาศมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณความชื้นในดินซีเมนต์

Leadabrand (1956) นำดิน 2 ชนิด คือ Clayey sandy soil และ Silty soil มาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาลำดับที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ และยังได้ทำการเจาะตัดดินซีเมนต์ในสนามจากโครงการก่อสร้างของรัฐต่างๆ 4 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยมีช่วงอายุตั้งแต่ 1 ปีถึง 20 ปี มาทดสอบหาลำดับที่อายุการบ่มพบว่า ลำดับที่อายุการบ่มของดินซีเมนต์ในสนามจะสอดคล้องกับลำดับที่อายุการบ่มในห้องปฏิบัติการ

Ng (1966) พบว่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์จะแปรผันกับอุณหภูมิที่ใช้บ่ม กล่าวคืออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้น จาก 70° F เป็น 100° F กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20

Wang and Huston (1972) รายงานว่าการลดอุณหภูมิในการบ่มจะทำกำลังอัดลดลงแต่จะเพิ่มความเครียด ที่จุดวิบัติ ไม่ว่าจะทดสอบแรงดึง หรือแรงอัด

Shackel and Lee (1974) ทำการศึกษาเรื่องการบ่มดินซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่าง Artificial Soil ซึ่งได้จากการนำ Uniform Sand จากเมือง Botany รัฐ New South Wales ประเทศออสเตรเลียมาผสมกับ Commercial Air-floated China Clay (Kaolin) ในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก และผสมซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0 , 3 และ 8 ทำการบ่ม 2 ลักษณะ คือบ่มในอากาศที่อุณหภูมิคงที่ 20°C และบ่มในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 20°C โดยการบ่ม 0, 1, 3 , 9 , 23 , 44 และ 81 วัน จากนั้นทดสอบหาค่า



การหดตัว หรือค่าการขยายตัว ค่ากำลังอัด ค่ากำลังดึง และอัตราการกระจายตัวของโพรง (Pore Size Distribution) ของดินซีเมนต์จากการจำลองแท่งตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Mercury Intrusion Porosimeter พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มจะทำให้กำลังอัด และกำลังดึงเพิ่มขึ้น การบ่มในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มแบบชื้น และยังเพิ่มขนาดโพรง (Pore Size) และปริมาตร (Pore Volume) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นด้วย ส่วนการบ่มแบบชื้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น จำทำให้ขนาดโพรงลดลง

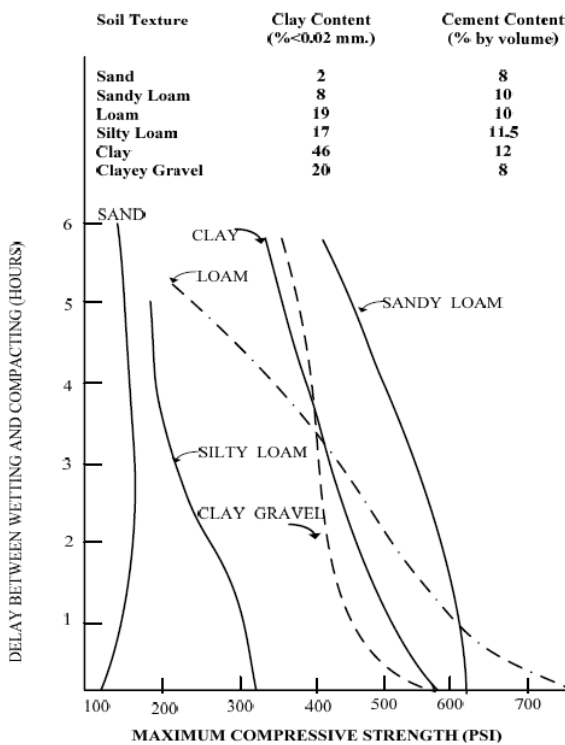
### 2.6.5 ระยะเวลาในการผสม

Marshall (1954) ศึกษาผลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชื้น และการบดอัด ที่มีผลต่อกำลังอัดของดินชนิดต่างๆ พบว่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7

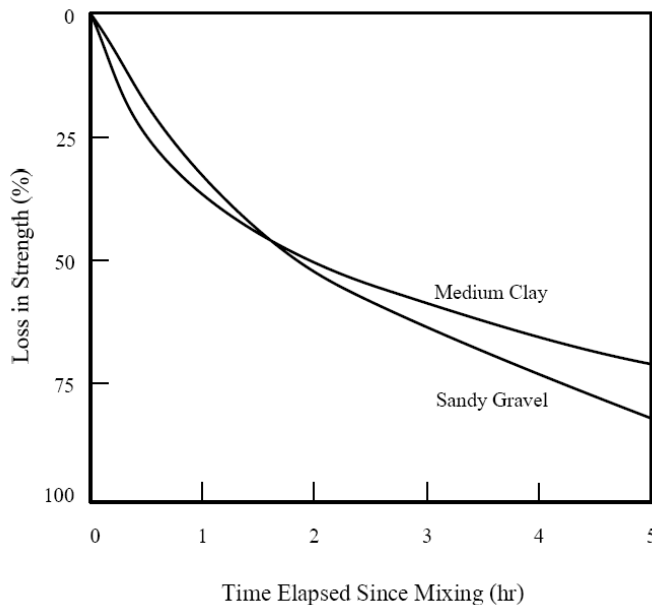
Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาต่อกำลังอัด และความคงทนโดยผสมให้ห้านานขึ้น แล้วทิ้งไว้ก่อนบดอัด ศึกษาดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 (LL= 26, PI = 11) ดินกลุ่ม A-4 (LL= 35, PI = 12) A-6-7 (LL= 47, PI = 26) พบว่าดินทุกชนิดจะมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อหน่วงเวลาการผสมให้ห้านานขึ้น การหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราว จะมีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย

Ingles and Metcalf (1972) ทำการทดสอบดิน 2 ชนิด คือ Medium clay และ Sandy gravel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ พบว่าเวลาการผสมที่นานขึ้น 1-2 ชั่วโมง กำลังอัดจะลดลงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเวลาในการผสมนานเกินกว่า 2 ชั่วโมง กำลังอัดของ Sandy Gravel จะน้อยกว่า Medium Clay เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.8

DATA ON SOILS AND ON CEMENT-TREATED SOIL MIXTURES



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมชั้น และการบดอัดที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Mashall, 1954)



รูปที่ 2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลานานในการบดอัดนานขึ้น (Ingles and Metcalf, 1972)

Horpibulsuk (2002) กล่าวว่า การที่กำลังของดินซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังของดินซีเมนต์ที่ทำได้ จากห้องทดลอง มีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินซีเมนต์ในสนาม

### 2.6.6 สารผสมเพิ่ม

Clare and Pollard (1951) ทำการศึกษาเกี่ยวกับสารผสมเพิ่ม โดยทำการทดสอบดินทรายที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่ร้อยละ 0.3 พบว่าสารผสมเพิ่มจำพวกปูนขาว (Lime) มีส่วนช่วยให้ดินซีเมนต์แข็งตัวเร็วในระยะแรก ดินชนิดนี้เมื่อผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างเดียวจะก่อตัวเมื่ออายุ 7 วัน แต่เมื่อเพิ่มปูนขาว ประมาณร้อยละ 2 จะช่วยให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวแข็งตัวเร็วขึ้น 2 วัน

Fuller and Dabney (1952) ได้อธิบายว่าการใส่ปูนขาวกับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงจะทำให้การผสม และการบดอัดง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

Maclean et al. (1952) ได้นำดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวระหว่าง 70-75 และมีค่าดัชนีพลาสติกประมาณ 45-53 มาทำการทดลอง โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 15-30 โดยที่เพิ่มปูนขาวลงไปร้อยละ 2 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานการเสียดกำลังเมื่อแช่น้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าผสมปูนขาว (lime) เกินกว่าร้อยละ 2 ผลการทดลองอาจไม่เป็นตามที่กล่าวมาข้างต้น

Lambe and Moh (1957) ได้รายงานผลการทดสอบการใช้สารผสมเพิ่มจำนวน 29 ชนิดในกลุ่ม Dispersants , Synthetic resins, Waterproofing agents, Alkalis และเกลือ ในดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 และปริมาณสารผสมเพิ่มร้อยละ 0.5-1.0 ดินที่ใช้ทำการทดสอบได้แก่ดินตะกอนจากรัฐ New Hampshire ดินเหนียวปนดินตะกอนจากรัฐ Massachusetts และดินฝุ่นแข็งพรุนจากเมือง Vicksburg พบว่ามีสารผสมเพิ่ม 4 ชนิด ที่เพิ่มความแข็งแรงถึงร้อยละ 100-150 ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต , โซเดียมไฮดรอกไซด์ , โปแตสเซียมเปอร์แมงกานेट และ โซเดียมซัลเฟต

Davidson et al. (1958) ได้ศึกษาการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Fly ash) ในการปรับปรุงคุณภาพของดินพบว่า การผสมเถ้าลอยลิกไนต์ลงในดินจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของทรายผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าในดินเหนียวผสมซีเมนต์ถ้าใส่เถ้าลอยลิกไนต์ลงไป จะทำให้รอยแตกเนื่องจากการหดตัวลดลง แต่ไม่ช่วยเพิ่มความคงทน

Pinto et al. (1962) ได้ทำการศึกษาดินที่มีแรมอน โมริล ไอโนท์ผสมอยู่ 5 ชนิด โดยแปรผันปริมาณปูนขาว ซีเมนต์ที่ผสม และอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยทำการแช่น้ำ 1 วัน ก่อนทำการทดสอบอัดแกนเดียว พบว่าการผสมปูนขาวจะช่วยให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในกรณีที่ดินตัวอย่างมีปริมาณดินเหนียวสูง และถ้าดินไม่มีหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่จะยิ่งทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีก

Wilmot (1995) กล่าวว่าตั้งแต่ ปี 1950 ในประเทศออสเตรเลียวัสดุผสมเพิ่ม ที่ใช้ในงาน Pavement recycling มีเพียง Cement, Cement/fly-ash, Bitumen และ Hydrate lime เท่านั้น ต่อมาใน

ปี 1980 มีการนำซีเมนต์ผสม มาใช้เพิ่มระยะเวลาการใช้งานในนานขึ้น โดยที่ความแข็งแรงในระยะยาวยังคงเท่าเดิม ซีเมนต์ผสมดังกล่าวได้แก่ Cement + Slag, Cement + Fly – ash, Cement + Lime และได้ให้แนวทางการเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

## 2.7 กำลังของดินซีเมนต์

Wang and Huston (1972) ทำการทดสอบหาค่ากำลังดึงและกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งกับดินตะกอนที่ได้จาก Glacial deposit ใน Rhode island พบว่าการเสีรูปที่จุดวิบัติจากการทดสอบทั้งแบบรับแรงอัดและรับแรงดึง จะมีค่าคงที่เสมอ ถ้าหากค่าความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้น และสภาพการบ่มเหมือนกัน ค่ากำลังและค่าการเสีรูปที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงดึงจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึง จะอยู่ระหว่างร้อยละ 10-20 ของค่ากำลังรับแรงอัด ส่วนค่าการเสีรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงดึง จะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1.0-2.5 ของค่าการเสีรูปที่จุดวิบัติ เนื่องจากแรงอัด สำหรับทุกอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่ศึกษา และยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงดึง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลัง ตามรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.3 แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) กับวัสดุแต่ละชนิด (Wilmot, 1995)

	Crushed rock	Well graded gravel	Silty - clay gravel	Sand*	Sandy silty clay	Heavy clay
Cement	A	A	A	B	B	N
Blend	A	A	A	A	A	N
Cementations	B	B	A	N	B	A
Hydrate Lime	N	N	B	N	B	A
Hydrate Lime + Cement	B	A	A	B	A	B
Polymeric Bitumen	A	A	B	B	B	N

Usually very suitable      A      Usually satisfactory      B

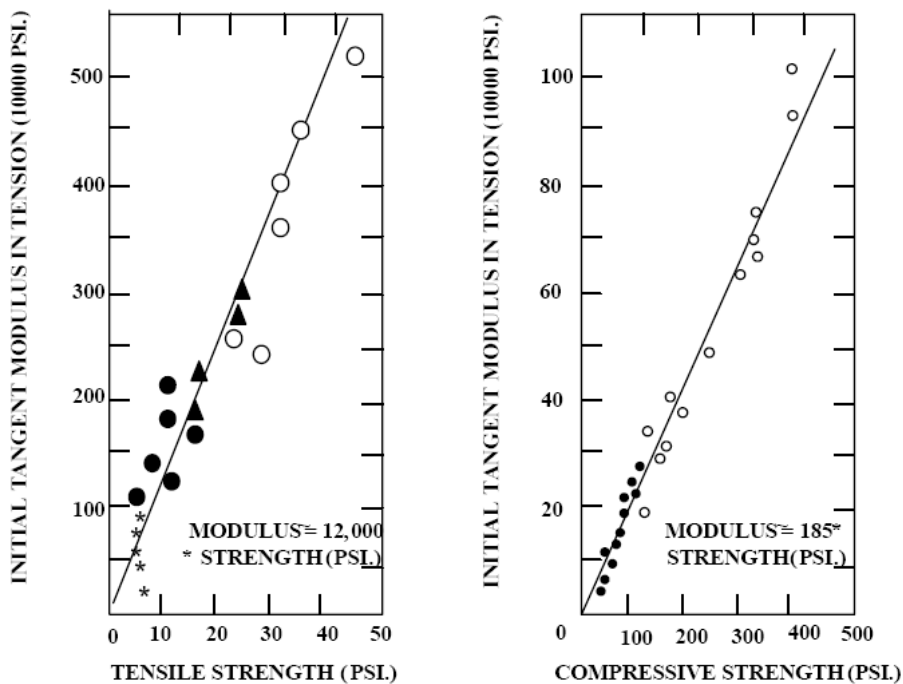
Usually not suitable      N

\*Depend Upon Grading (Single size sand require higher additive content)

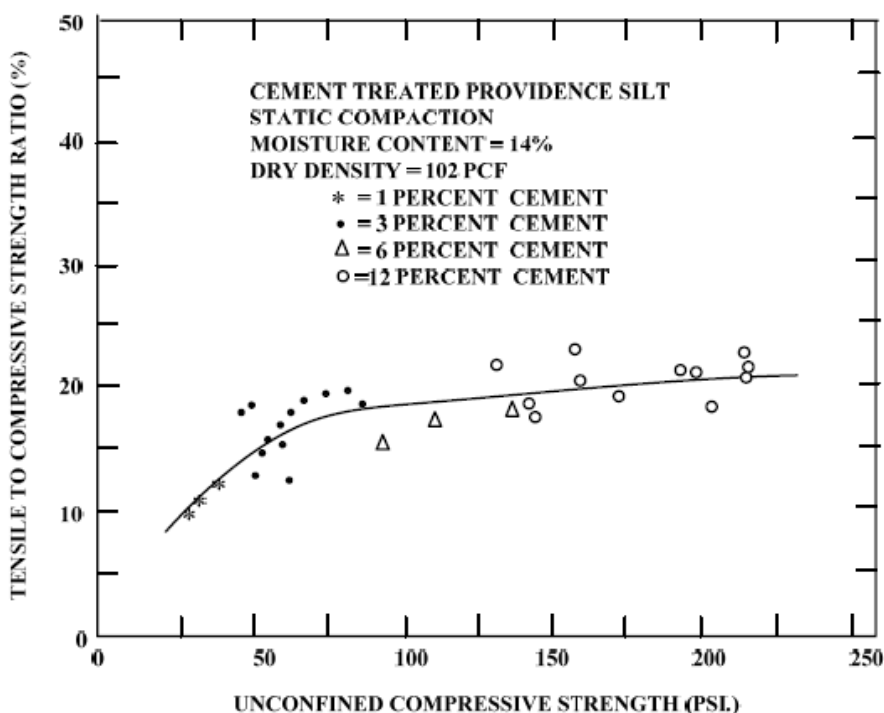
## 2.8 การนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ (Recycling)

Gordon (1984) กล่าวถึงการใช้สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified materials และ Bound Materials Modified โดยที่ Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้将有ความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound Materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่ม ลงไปอย่างมาก เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าสูง และอาจต้านทานหน่วยแรงดึงได้

Kuhlman (1989) กล่าวได้ว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐ ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีวิศวกรทำจากยางมะตอย โดยการนำวิศวกรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ในช่วงปี 1942-1958 ต่อมาในปี 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมาวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งาน ทั้งวิศวกรยึดหยุ่นที่ชำรุดเสียหาย และวิศวกรคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึงและกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Wang and Huston, 1972)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์ (Wang and Huston, 1972)

Tabensky (1990) กล่าวว่า การนำวัสดุเก่ามาใช้งานอีกครั้ง (Recycling) ไม่ใช่เรื่องใหม่ แต่มีรายงานว่า Florida Department of Transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่า ด้วยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนน และ Orange county California ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง กับถนนจำนวน 20 สาย ระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5-7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลต์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ผสมกันระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากับวัสดุชั้นล่าง เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow municipal airport และ Mohave county airport.

Wirtgen (1992) บันทึกว่า Cold Recycling ใช้ในการทำชั้นพื้นทางไว้รองรับ Surface Treatment หรือ Wearing Course โดยทั่วไปจะใช้เวลาหนาประมาณ 200-300 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของถนนที่ต้องการ ข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของ Cold in - Place Recycling เมื่อเปรียบเทียบกับ Conventional Method ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

Atkinson (1955) กล่าวว่าได้มีการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุใน Queensland มาตั้งแต่ปี 1980 กับถนนที่เป็นคันกรวดเมื่อปริมาณการจราจรสูงขึ้น หรือเกิดน้ำท่วมจะทำให้ถนนชำรุดเสียหาย และความแข็งแรงของถนนลดลง ได้แก้ปัญหาโดยปรับปรุงคุณภาพวัสดุ ซึ่งในช่วงแรกของการออกแบบต้องการแข็งแรงที่ 2 เมกะปาสคาล สำหรับถนนที่มีคันทางอ่อนตัว (Flexible Subgrade)

Walton (1955) บันทึกไว้ว่าการนำวัสดุเก่ามาใช้ในงานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold in-Place Recycling) เป็นที่ยอมรับกันว่าประหยัดมาก และได้เริ่มมีการใช้เป็นมาตรฐานในปี 1970 ในรัฐ Oregon, Now Mexico, Kansas และ Florida ต่อมาวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย อิตาลี รัสเซีย แคนาดา เยอรมัน ฝรั่งเศส และอังกฤษ โดยใช้กับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำถึงปานกลางในปี 1980 ปรากฏว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในช่วง ดังกล่าวใช้ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และยังใช้ Emulsion เป็นสารผสมเพิ่ม (Additive)

A.A. Loundon & Partner Consulting Engineers (1955) กล่าวว่า การก่อสร้างด้วยวิธี Cold In-Place Recycling ต้องมีการสำรวจออกแบบตามเงื่อนไข และตามสภาพถนนที่จะทำการก่อสร้าง รวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่จะใช้งาน เพื่อที่จะสามารถวางแผนงานให้ได้ผลที่ดีที่สุด การก่อสร้างจะไม่ทำในขณะเปียก และหลีกเลี่ยงการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ใช้ควรหาจากการทดลอง ซึ่งถ้าใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพ ระหว่างการบดอัดความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 75 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุที่ไม่ผสมเพิ่ม แต่ถ้าไม่ผสมซีเมนต์หรือไม่ผสมอะไรเลย ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดต้องไม่เกินปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากการบดอัด และแต่งรูปเรียบเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการบ่มเพื่อรักษาความชื้นทันทีซึ่งอาจใช้ยางแอสฟัลต์หรือวัสดุอย่างอื่นที่เหมาะสมก็ได้

ตารางที่ 2.4 ข้อเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของ Cold recycling Process กับ Conventional Method (Wirtgen, 1992)

	Conventional method	Cold recycling Method
รถขุดและการขนส่ง	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การขนย้ายรถขุด	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การใช้รถขนย้ายวัสดุถนนเดิม	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ไม่ต้องการ
สถานที่ทิ้งวัสดุ	ต้องการ (เป็นปัญหามาก)	ไม่ต้องการ
การใช้รถขนย้ายวัสดุถนนใหม่	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ต้องการ (ในบางกรณี)
การตัดแต่งรูปในแต่ละชั้นทาง	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ต้องการ (กรณีไม่มีเครื่องปู)
เครื่องจักรในการบดอัด	ต้องการ	ต้องการ
ระยะเวลาในการก่อสร้าง	ยาว	สั้น
ปัญหาการจราจร	มาก	น้อย

## 2.9 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์

Horpibulsuk และคณะ (2003) ได้ทำการทดสอบ และวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยละเอียด โดยอาศัยสมมติฐาน Clay – Water/Cement Ratio Hypothesis (Miura et al., 2001 และ Horpibulsuk and Miura, 2001) พบว่า กำลังของดินแต่ละชนิดที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ Clay – Water/ Cement Ratio

$$q_u = \frac{A}{B^{(w_c/C)}} \quad (2.5)$$



เมื่อ $q_u$	คือ	กำลังต้านแรงอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง
$A$	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
$B$	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
$w/C$	คือ	Clay- water/Cement ratio และมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2003) ยังพบว่า อัตราการเพิ่มของกำลังของดินซีเมนต์เป็นฟังก์ชันของล็อกกาลิทึมของอายุบ่ม ดังแสดงในสมการที่ 2.6 และ รูปที่ 2.11

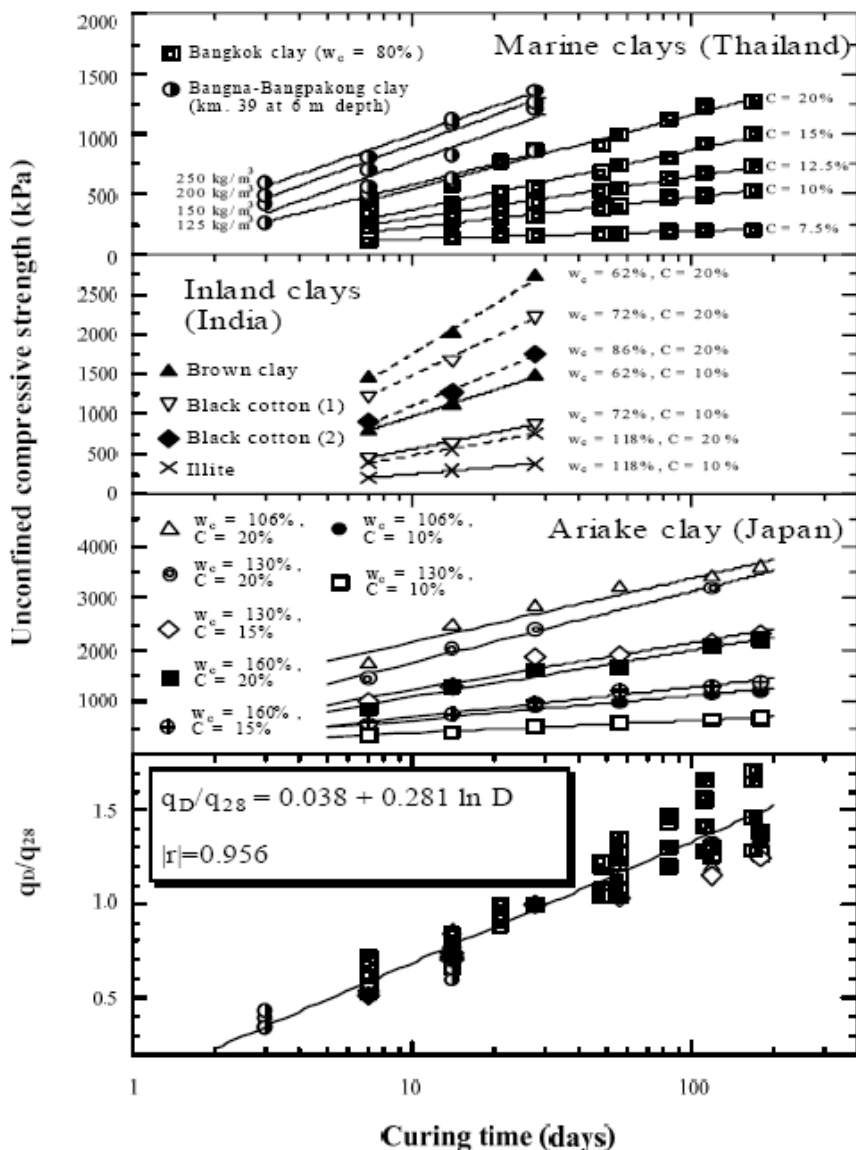
$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \quad (2.6)$$

เมื่อ $q_D$	คือ	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม $D$ วัน
$q_{28}$	คือ	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน
$D$	คือ	อายุบ่ม, วัน

เมื่อรวมสมการที่ 2.5 และ 2.6 และแทนค่า  $B$  เท่ากับ 1.24 จะได้สมการที่ 2.7 ซึ่งสามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มใดๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน

$$\left[ \frac{q_{(w_c/C)_{1,D}}}{q_{(w_c/C)_{28}}} \right] = 1.24^{\{(w_c/C)_{28} - (w_c/C)_D\}} (0.038 + 0.281 \ln D) \quad (2.7)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_{1,D}}$	คือ	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ $w_c/C$ หลังจากระยะบ่ม $D$ วัน
$q_{(w_c/C)_{28}}$	คือ	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ บ่ม 28 วัน



รูปที่ 2.11 การเพิ่มของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

2.10 สมการทำนายกำลังของการนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ (Recycling)

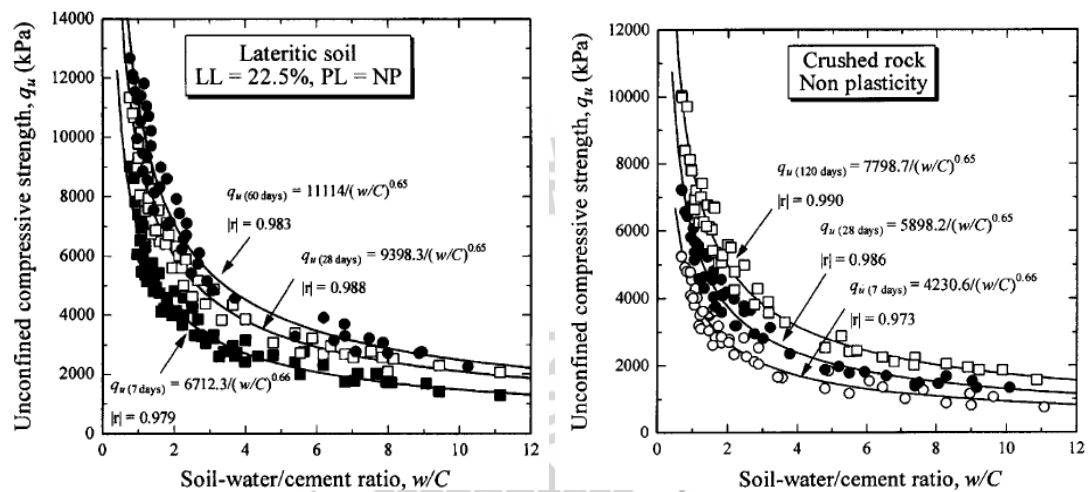
Horpibulsuk และคณะ (2006) ได้ทำการทดสอบ และวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยการนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ โดยอาศัยสมมติฐานว่า กำลังของดินแต่ละชนิดที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ Clay – Water/ Cement Ratio ตามสมการ

$$q_u = \frac{A}{(w/c)^B} \tag{2.8}$$

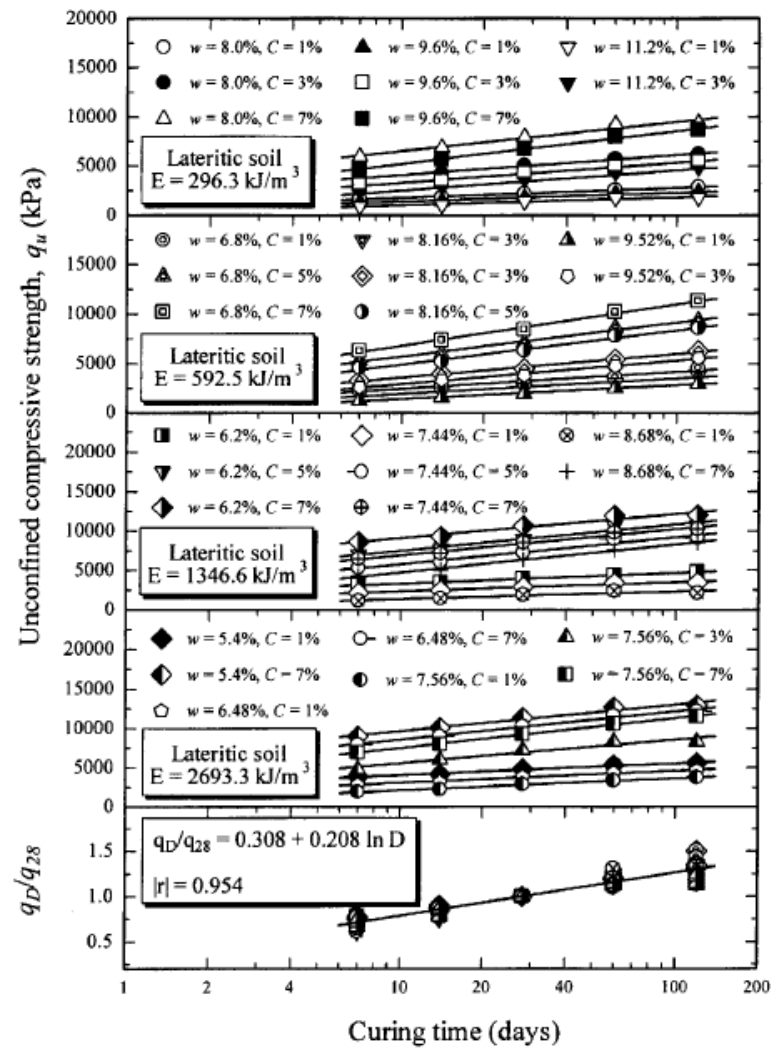
เมื่อ  $q_u$  คือ กำลังต้านแรงอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง

- A คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
- B คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
- $w_c / c$  คือ Clay- water/Cement ratio และมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

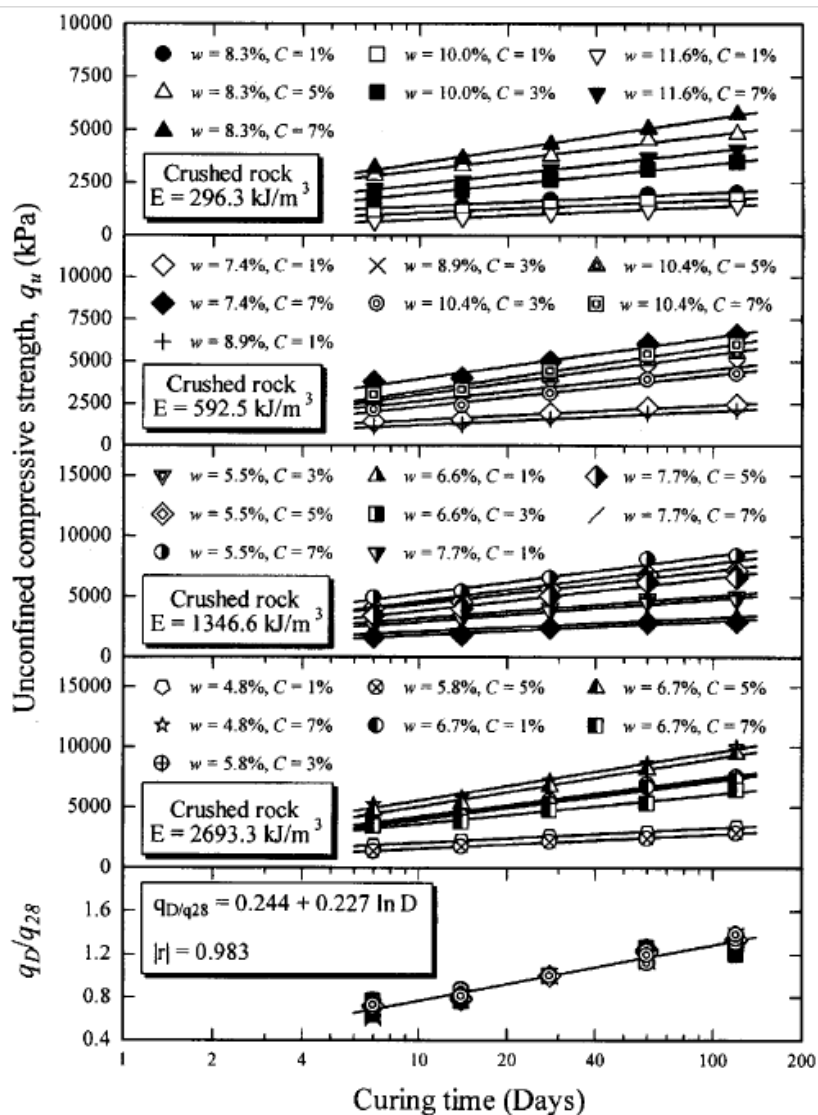
โดยได้ทำการทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์ชนิดดินลูกรัง (Lateritic soil) ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และ 90 วัน และหินคลุก (Crushed Rock) ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน 28 วัน และ 120 วัน นำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ ( $w_c / c$ ) กับกำลังอัดของดินซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ ( $w_c / c$ ) กับกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของ Lateritic soil (Horpibulsuk et al., 2006)



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของ Crushed rock

(Horpibulsuk et al., 2006)

ซึ่งอัตราการเพิ่มของกำลังของดินซีเมนต์เป็นฟังก์ชันของลอการิทึมของอายุบ่ม ดังแสดงในสมการที่ 2.9 และ รูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.207 + 0.219 \ln D \tag{2.9}$$

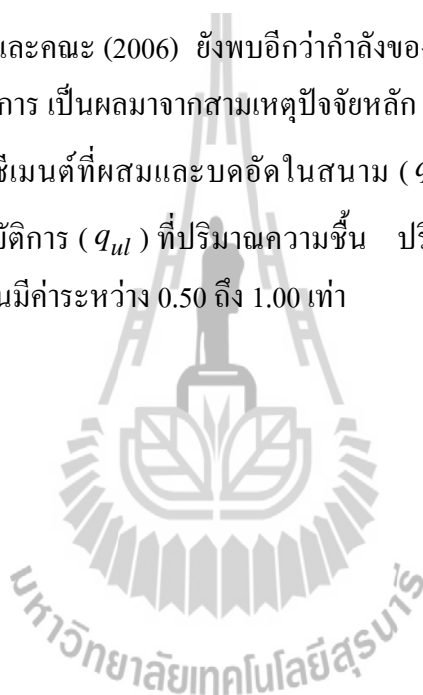
เมื่อแทนค่า  $B = 0.65$  ในสมการที่ 2.7 แล้วนำค่ากำลังอัดตามสมการที่ 2.8 ที่มีการบ่มที่  $D$  วัน หาค่ากำลังอัดที่มีการบ่มที่ 28 วันจะได้สมการ

$$\left[ \frac{q_{(w_c/c)_D}}{q_{(w_c/c)_{28}}} \right] = \left[ \frac{(w/c)_{28}}{(w/c)_D} \right]^{0.65} (0.207 + 0.219 \ln D) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $q_{(w_c/c)_D}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่  $w_c/c$  หลังจากระยะเวลาบ่ม  $D$  วัน

$q_{(w_c/c)_{28}}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ บ่ม 28 วัน

Horpibulsuk และคณะ (2006) ยังพบอีกว่ากำลังของดินซีเมนต์ในสนาม จะมีค่าต่ำกว่ากำลังบดอัดในห้องปฏิบัติการ เป็นผลมาจากสามเหตุปัจจัยหลัก ได้แก่ การผสม การบดอัด และการบ่มสรุปว่ากำลังของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม ( $q_{fr}$ ) เปรียบเทียบกับกำลังของดินซีเมนต์บดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ ) ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และภายใต้พลังงานการบดอัดที่เท่ากันมีค่าระหว่าง 0.50 ถึง 1.00 เท่า



### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการทำโครงการ

### 3.1 ชนิดของข้อมูลและแหล่งข้อมูล

ข้อมูลจากงานวิจัยนี้รวบรวมจากผลทดสอบในงานซ่อมแซมถนนที่ชำรุดโดยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ทั่วประเทศไทย จากสำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท โดยรวบรวมข้อมูลผลทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) และข้อมูลที่เกี่ยวข้องจำนวนทั้งสิ้น 63 ชุดข้อมูล จากสถานที่ก่อสร้าง 37 จังหวัด ทั่วประเทศไทย และข้อมูลที่ใช้ในปี 2006 ของ Horpibulsuk และคณะ ซึ่งใช้ดินในการทดสอบอยู่ 2 ประเภท คือ Lateritic soil และ Crushed Rock ปริมาณความชื้น  $w_{fn}$  และหน่วยน้ำหนักแห้ง  $\gamma_{dfr}$  ของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ถูกควบคุมให้มีค่าระหว่าง 2% ของปริมาณความชื้นเหมาะสม ( $OMC \pm 2\%$ ) การบดอัดในสนามจะควบคุมให้ค่าอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้ง ( $\gamma_{dfr} / \gamma_{dfr}$ ) มีค่าไม่น้อยกว่า 95%

### 3.2 ตัวแปรที่ใช้งานวิจัยนี้

#### พิสูจน์สมมติฐาน

$H_0$  : กำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เตรียมด้วยวิธีที่ต่างกันมีค่าเท่ากัน ( $q_{ul} = q_{ufn} = q_{ufr}$ )

$H_1$  : กำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เตรียมด้วยวิธีที่ต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน

ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน

- (1) กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ )
- (2) กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ufn}$ )
- (3) กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในสนาม ( $q_{ufr}$ )

แบบจำลองเพื่อทำนายกำลังรับแรงอัดโดยการวิเคราะห์ความถดถอย

ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ตัวแปรตาม

- (1) กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ )

ตัวแปรอิสระ

- (1) อัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ ( $w/c$ )
- (2) เวลา ( $t$ )
- (3) คุณสมบัติพื้นฐานของดิน เช่น การกระจายขนาดเม็ดดิน ความเป็นพลาสติกของดิน

### 3.3 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล และใช้ข้อมูลสถิติ ดังนี้

#### 3.3.1 ข้อมูลสถิติเบื้องต้น

ค่าเฉลี่ย (Arithmetic Mean,  $\bar{X}$ ) (กัลยา วาณิชย์บัญชา, 2553)

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} \quad (3.1)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) (กัลยา วาณิชย์บัญชา, 2553)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

#### 3.3.2 สถิติที่ใช้ทดสอบสมมุติฐาน

การทดสอบกลุ่มตัวอย่างว่ามีการแจกแจงประชากรแบบปกติหรือไม่ โดยใช้ Kolmogorov-Smirnov Test (กัลยา วาณิชย์บัญชา, 2553)

$$D = \max |F(x) - S(x)| \quad (3.3)$$

หากมีการแจกแจงประชากรแบบปกติจะใช้สถิติการทดสอบแบบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรแบบจับคู่ โดยตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน (Independent samples test to compare means) ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่น 95%

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{Sd / \sqrt{n}}$$

(3.4)

หากมีการแจกแจงประชากรแบบไม่ปกติจะใช้สถิติการทดสอบ Mann-Whitney test โดยตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่น 95%

$$Z = \frac{U - E(U)}{\sqrt{V(U)}} \quad (3.5)$$



$$\text{ค่าเฉลี่ยของ } U = E(U) = \frac{n_1 n_2}{2} \quad (3.6)$$

$$\text{ค่าความแปรปรวนของ } V = V(U) = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12} \quad (3.7)$$

$$\text{จะปฏิเสธเมื่อค่า } Z > Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \text{ และ } Z < Z_{\frac{\alpha}{2}}$$

### 3.4 การจัดทำข้อมูลและวิเคราะห์ผล

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์

แบบจำลองสำหรับทำนายกำลังของดินซีเมนต์ จะได้จากการวิเคราะห์สมการความถดถอย (Regression) โดยกำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตาม อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ ระยะเวลาในการบ่ม และความเป็นพลาสติกของดิน

#### 3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ

ข้อมูลเชิงปริมาณจะเป็นข้อมูลเพื่อการอธิบายเสริมข้อมูลเชิงคุณภาพ ในที่นี้ได้แก่ ตัวแปรต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นตัวแปรอิสระหรือตัวแปรตาม นำเสนอเป็น ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

#### 3.4.3 การวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ

ความแตกต่างระหว่างกำลังของดินซีเมนต์ในสนามและห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 2 กลุ่ม หากมีการแจกแจงแบบปกติจะ使用方法เปรียบเทียบแบบจับคู่ โดยตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน หากมีการแจกแจงแบบไม่ปกติจะ使用方法เปรียบเทียบแบบ Mann-Whitney test โดยตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ในสนามอย่างมีนัยสำคัญ

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษานำเสนอในบทที่ 3 โดยการเปรียบเทียบกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในทั้ง 3 รูปแบบเพื่อหาปัจจัยที่ทำให้เกิดความต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ และจะสร้างทฤษฎีกำลังอัด พร้อมสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งนำเสนอขั้นตอนการปรับปรุงถนนที่ชำรุดด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.2 การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงของดินซีเมนต์

ดำเนินการทดสอบว่าประชากรมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่โดยใช้ Kolmogorov-Smirnov Test จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 156 ตัวอย่าง ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 ของกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ufr}$ ) และกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในสนาม ( $q_{ufr}$ )

ตารางที่ 4.1 สถิติตรวจสอบการแจกแจงโดยวิธี Kolmogorov-Smirnov tests ของ  $q_{ufr}$  และ  $q_{ufr}$

	$q_{ufr}$	$q_{ufr}$
	Statistic	Statistic
Mean	2872.43	2243.22
5% Trimmed Mean	2857.76	2217.29
Median	2835.00	2273.00
Std. Deviation	438.90	543.74
Minimum	2100.00	1342.50
Maximum	4045.20	3941.30
Range	1945.20	2598.80
Skewness	.351	.534
Kurtosis	-.152	.459
Kolmogorov-Smirnov Z	.588	.678
Asymp. Sig. (2-tailed)	0.879	0.748

พบว่า ค่า Sig.(2-tailed) มีค่า 0.879 และ 0.748 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่า มีการแจกแจงแบบปกติ

ตารางที่ 4.2 สถิติการทดสอบ Independent samples test to compare means ของ  $q_{ufn}$  และ  $q_{ufr}$

	Levene's test for equality of variances		t-test for equality of means				
	F	Sig.	t	df	Sig. (2 tailed)	Mean difference	Std. error difference
Equal variances assumed	2.404	.123	7.952	154	.000	629.212	79.122
Equal variances not assumed			7.925	147.437	.000	629.212	79.122

จึงทำการทดสอบค่าความแปรปรวนของประชากรทั้ง 2 ว่าเท่ากันหรือไม่ โดยตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน (Independent samples test to compare means) ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 ต่อเนื่องพบว่า ค่า Sig. เท่ากับ 0.123 มากกว่า 0.05 สรุปได้ว่า ความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ufn}$ ) มีค่าพอกันกับความแปรปรวนของกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในสนาม ( $q_{ufr}$ ) จึงต้องตรวจสอบในบรรทัดที่ 1 ค่า Sig. (2 tailed) เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ufn}$ ) มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในสนาม ( $q_{ufr}$ )

$$q_{ufn} > q_{ufr} \text{ ระดับนัยสำคัญ } (\alpha) 0.05 \text{ หรือระดับความเชื่อมั่น } 95\%$$

ดำเนินการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ ) โดยใช้ตัวอย่าง จำนวน 4 ตัวอย่าง และกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ufn}$ ) โดยใช้ตัวอย่าง จำนวน 78 ตัวอย่าง โดยใช้สถิติการทดสอบ Mann-Whitney test โดยตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากตัวอย่างมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

ตารางที่ 4.3 สถิติการทดสอบการแจกแจงแบบไม่ปกติแบบ Mann-Whitney test ของ  $q_{ul}$  และ  $q_{ufh}$

Mann-Whitney test	Group	N	Mean Rank	Sum of Ranks
Measurements	Laboratory strength	4	44.50	178.00
	Field hand-compacted strength	78	41.35	3225.00
	Total	82		
Test statistics				Values
Mann-Whitney U				144.000
Wilcoxon W				3225.000
Z				-.258
Asymp. Sig. (2-tailed)				.796
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]				.811

พบว่า ค่า Asymp.Sig.(2-tailed) เท่ากับ 0.796 มากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ ) มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ufh}$ )

$$q_{ul} = q_{ufh} \text{ ระดับนัยสำคัญ } (\alpha) 0.05 \text{ หรือระดับความเชื่อมั่น } 95\%$$

ลองตรวจสอบความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนของ  $\frac{q_{ufh}}{q_{ul}}$  ว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยใช้ Kolmogorov -Smirnov goodness-of-fit Test จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 78 ตัวอย่าง ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) 0.05

ตารางที่ 4.4 สถิติการทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit ของ  $\frac{q_{ufh}}{q_{ul}}$

Statistics	Values
N	78
Mean	.7640
Std. Deviation	.1599
Kolmogorov-Smirnov Z	.805
Asymp. Sig. (2-tailed)	.536
5 <sup>th</sup> Percentile	0.5194
95 <sup>th</sup> percentile	1.0547

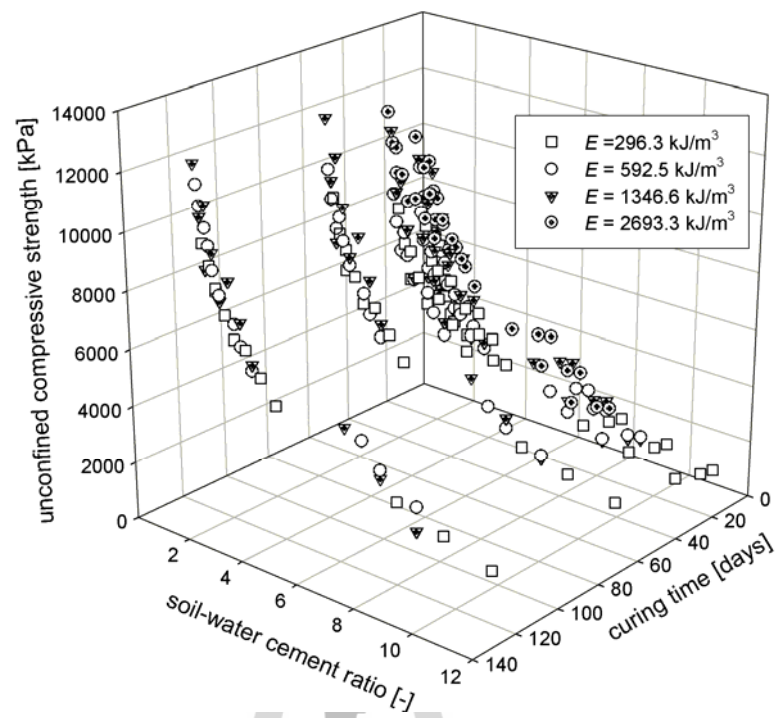
พบว่า ค่า Asymp.Sig. (2-tailed) เท่ากับ 0.536 มากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ กับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในสนาม ( $\frac{q_{ufr}}{q_{ul}}$ ) มีการแจกแจงแบบปกติ จาก 95<sup>th</sup> percentile เท่ากับ 1.0547 สรุปได้ว่า มีอยู่ 5% ที่มีค่า ( $\frac{q_{ufr}}{q_{ul}}$ ) มากกว่า 1.0547 หรือประมาณ 1.05 และ 5<sup>th</sup> percentile เท่ากับ 0.5194 สรุปได้ว่า มีอยู่ 95% ที่มีค่า ( $\frac{q_{ufr}}{q_{ul}}$ ) มากกว่า 0.5194 หรือประมาณ 0.52

สรุป จากข้อมูลทางสถิติพบว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{uph}$ ) มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในสนาม ( $q_{ufr}$ ) ซึ่งกระบวนการจะแตกต่างกันในวิธีการบดอัด และการบ่ม การบดอัดในสนาม จะใช้รถบดล้อเหล็กต้นสะเทือน กับรถบดล้อยาง เป็นเครื่องมือในการบดอัด ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าการบดอัดในสนามด้วยวิธีดังกล่าวเหมาะสมและมีประสิทธิภาพเทียบเท่าการบดอัดในห้องปฏิบัติการที่สุดสำหรับการบดอัดดินเม็ดหยาบ และยังไม่มียังมีวิธีใดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีดังกล่าว จึงพอจะสรุปได้ว่าวิธีการบดอัดไม่มีนัยสำคัญต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ใช้เทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) เพราะฉะนั้นวิธีการบ่มจึงดูเหมือนว่าจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ ซึ่งการบ่มในสนามนั้นจะใช้เพียงรถน้ำสปาร์ย์ลงไป 2 ครั้งต่อวัน ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ของดินซีเมนต์ และส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่เตรียมในสนาม

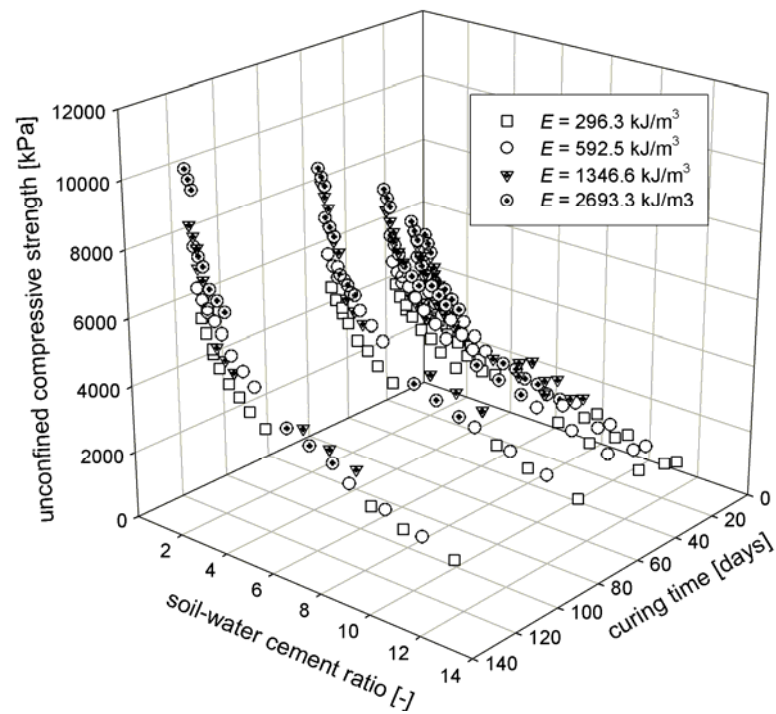
จากข้อมูลทางสถิติยังพบอีกว่าค่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ( $q_{ul}$ ) มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ( $q_{uph}$ ) ซึ่งทั้งสองตัวอย่างมีปัจจัยที่แตกต่างกัน คือ วิธีการผสม จึงสรุปได้ว่าวิธีการผสมไม่มีนัยสำคัญต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

#### 4.3 แบบจำลองเพื่อทำนายกำลังรับแรงอัดโดยการวิเคราะห์ความถดถอย

นำข้อมูลเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะ 3 แกน ระหว่างกำลังอัด Water-Cement Ratio และระยะเวลาในการบ่มในห้องปฏิบัติการ แยกตามพลังงานในการบดอัดของดิน Lateritic Soil และ Crushed Rock จะพบว่ากำลังของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ลดลง

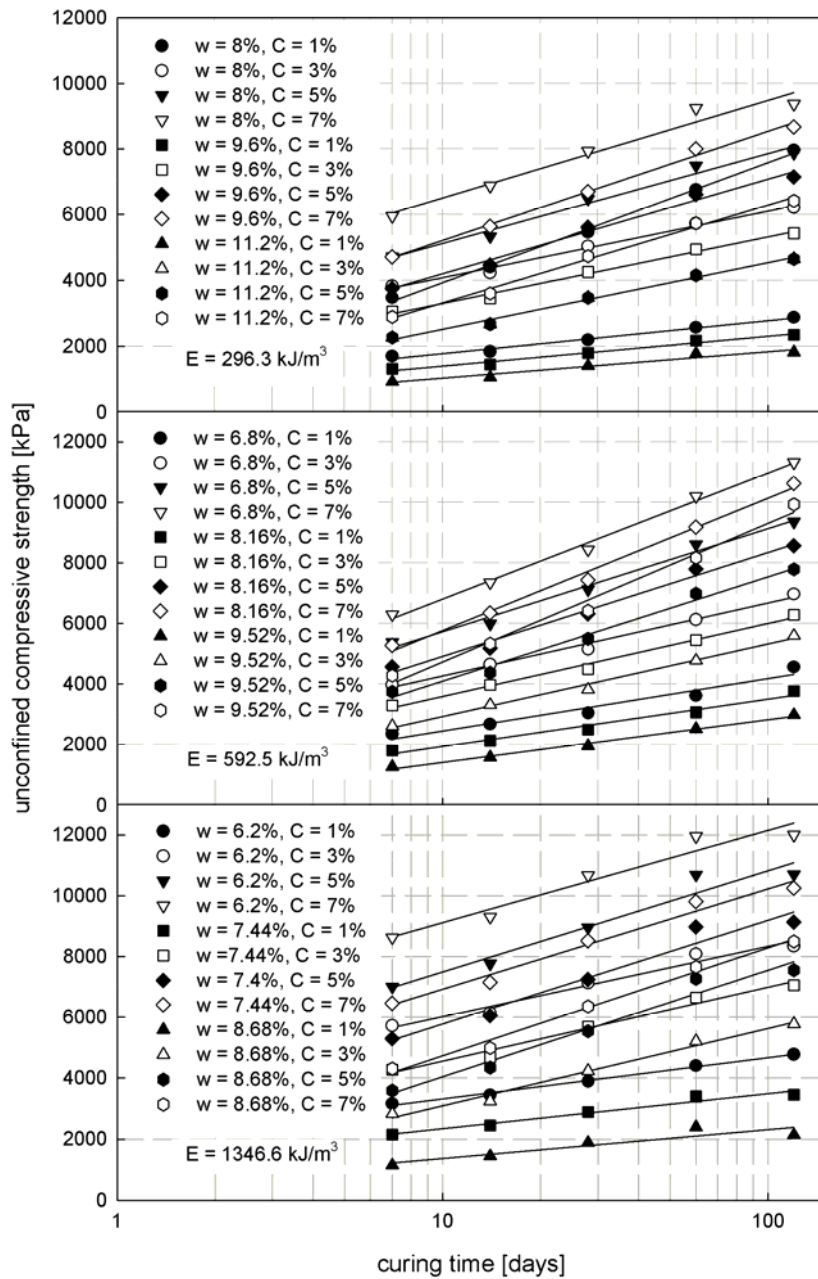


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$ ,  $w/C$  และเวลาบ่ม  $D$  ของดินลูกรัง

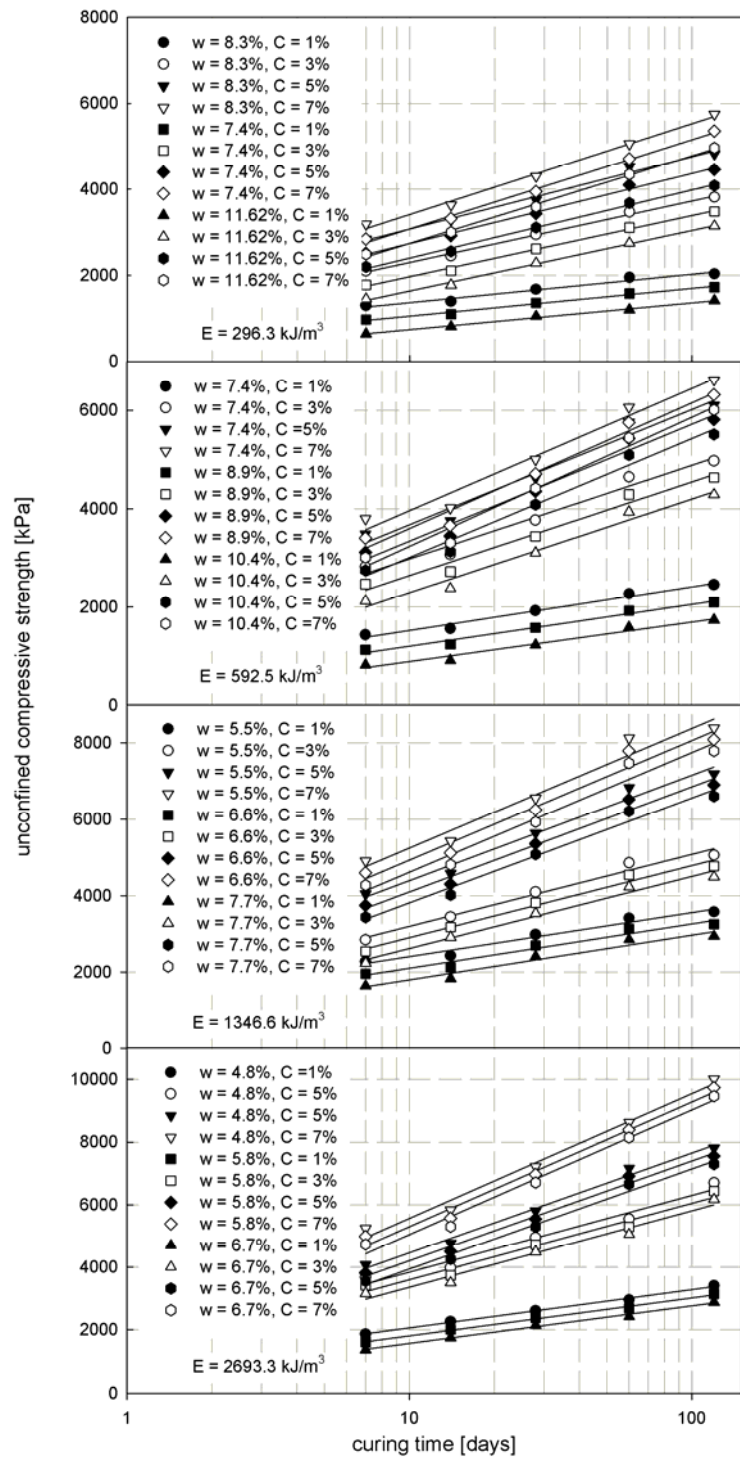


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$ ,  $w/C$  และเวลาบ่ม  $D$  ของดินโคลน

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่มในกราฟ ล็อกโดยแยกออกเป็นดินลูกรัง (Lateritic Soil) และหินคลุก (Crushed Rock) โดยแยกตามพลังงานที่ใช้ในการบดอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะได้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของ Lateritic soil



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของ Crushed rock



ซึ่งอาจเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ว่า

$$q_u = A' + B \log_{10} D \quad (4.1)$$

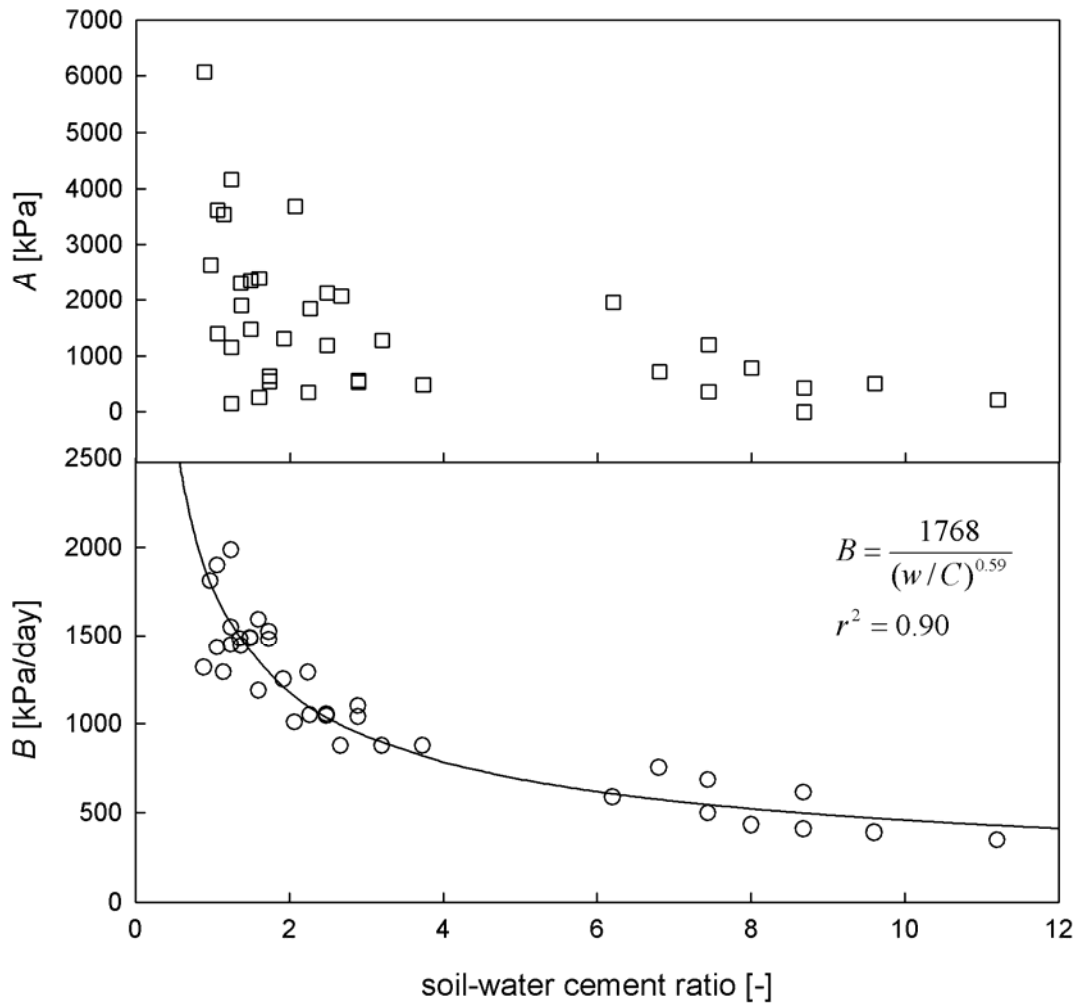
เมื่อ  $q_u$  คือ กำลังต้านแรงอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง

$A'$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

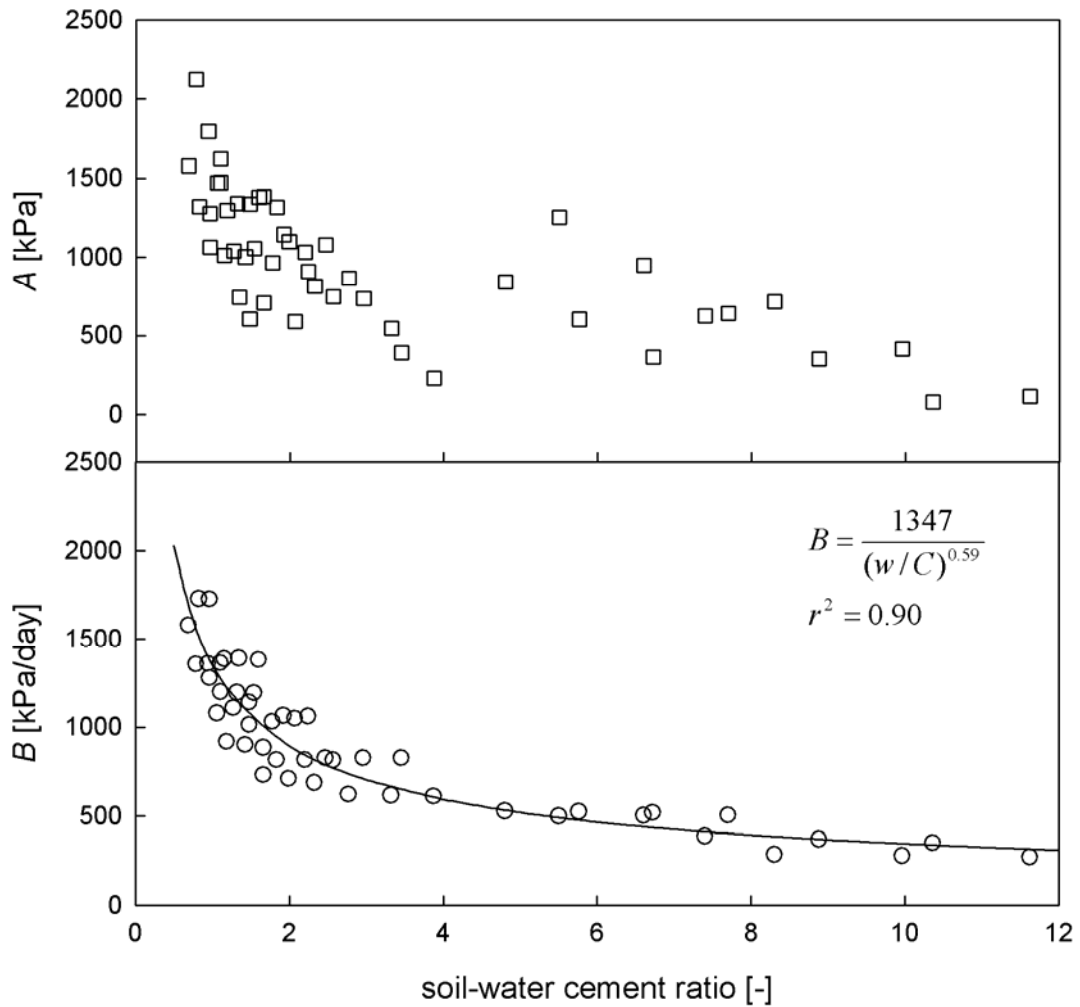
$B$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

$D$  คือ ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)

ลองเขียนกราฟความสัมพันธ์ของค่าคงที่  $A', B$  กับ  $w/C$  ดังรูป



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $A', B$  และ  $w/C$  ของ Lateritic soil



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $A'$ ,  $B$  และ  $w/C$  ของ Crushed Rock

ซึ่งจากกราฟพบว่าค่า  $B$  มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์กับค่า  $w/C$  ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$B = \frac{b}{(w/C)^\beta} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $b$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

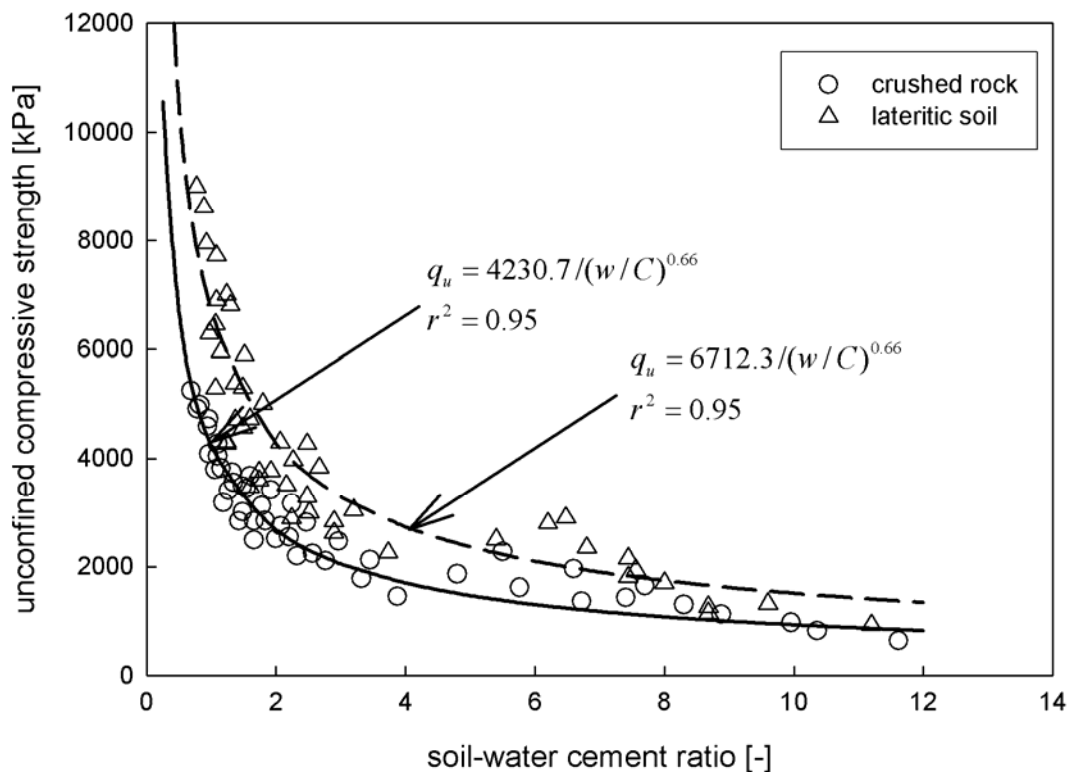
$\beta$  คือ ค่าคงที่

$w/C$  คือ Clay- water/Cement ratio และมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

ซึ่งจากการวิเคราะห์ความถดถอยจะได้ค่า  $b$  มีค่า 1347 และ 1768 สำหรับหินคลุก และ ดินลูกรัง แต่สำหรับค่า  $\beta$  พบว่ามีค่าคงที่ คือ 0.59 ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

ส่วนค่า  $A$  ยังไม่พบแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์กับค่า  $w/C$

ลองเปลี่ยนระยะเวลาเป็นการบ่มที่ 7 วัน โดยให้ค่านี้เป็น  $A$  แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $A$  และ  $w/C$  ของ Lateritic soil และ Crushed Rock

ซึ่งจากกราฟพบว่าค่า  $A$  มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์กับค่า  $w/C$  ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$A = \frac{a}{(w/C)^\alpha} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $a$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

$\alpha$  คือ ค่าคงที่

$w/C$  คือ Clay- water/Cement ratio และมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

ซึ่งจากการวิเคราะห์ความถดถอยจะได้ค่า  $a$  มีค่า 4230.70 และ 6712.30 สำหรับหินคลุก และดินลูกรัง แต่สำหรับค่า  $\alpha$  มีค่า 0.65 และ 0.66 ซึ่งแตกต่างกันน้อยมาก อาจใช้ค่าที่เป็นตัวแทน คือ 0.65 ได้เลยโดยไม่ต้องคำนึงถึงชนิดของดิน

ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดอาจเปลี่ยนสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ โดยใช้ค่าฐานการบ่มที่ 7 วันได้ดังนี้ คือ

$$q_u = \frac{a}{(w/C)^{0.65}} + \frac{b}{(w/C)^{0.59}} \log_{10}(D-6) \quad (4.4)$$

จากสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ ดังกล่าวจะสามารถคำนวณหาค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่มีระยะเวลาในการบ่มมากกว่า 7 วันได้โดยใช้ค่าฐานการบ่มที่ 7 วัน จะพบว่ามีค่าคงที่ที่ไม่รู้เพียง 2 ค่าเท่านั้น คือ ค่า  $a$  และ  $b$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน หากดำเนินการ Trial Design ก็จะสามารถใช้ตัวอย่างที่บดอัดเพียง 2 ตัวอย่าง ในอัตราส่วนค่า  $w/C$  ที่ต่างกันก็จะสามารถใช้กำลังอัดที่ต้องการ เพื่อทำนายค่า  $w/C$  ที่จะให้ค่ากำลังอัดตามที่ออกแบบได้

ได้ใช้ข้อมูลของ Ruenkraitergsa และคณะ (2001) เป็นข้อมูลฐานในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ เทียบกับกำลังอัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ วัสดุที่ใช้เป็นดินลูกรัง มีค่าขีดจำกัดเหลว 36% และขีดจำกัดพลาสติก 16%

ตารางที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดในห้องปฏิบัติการ Lateritic soil (Ruenkraitergsa และคณะ, 2001)

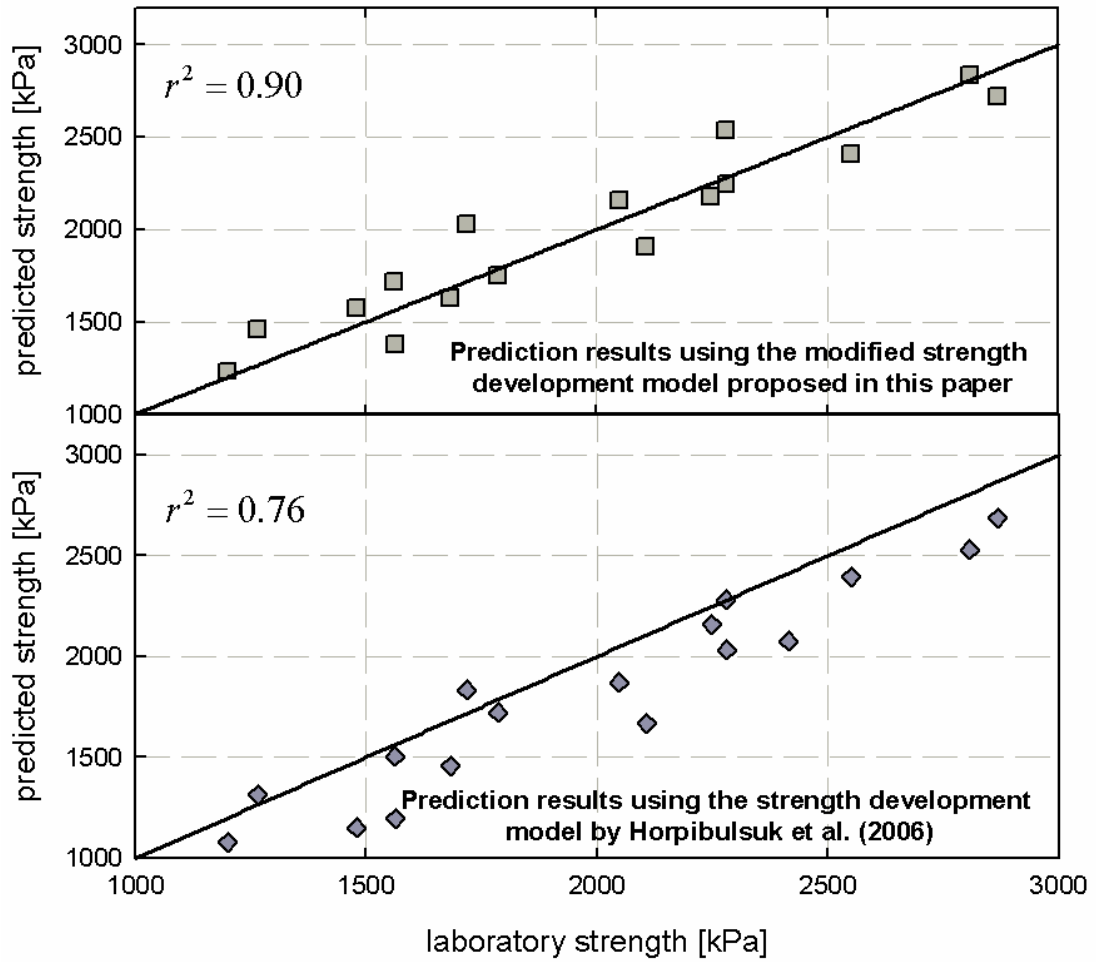
Curing time [days]	Water content [%]	Cement content [%]	w/C [-]	Laboratory strength [kPa]	Predicted strength [-]
7	13.5	3	4.5	1200	1233.1
7	13.5	5	2.7	1562	1718.7
7	13.5	7	1.9	2048	2159.8
14	13.5	3	4.5	1265	1461.2
14	13.5	5	2.7	1718	2027.0
14	13.5	7	1.9	2279	2539.1
28	13.5	3	4.5	1479	1572.1
28	13.5	5	2.7	2248	2177.0
28	13.5	7	1.9	2868	2723.6

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

Curing time [days]	Water content [%]	Cement content [%]	w/C [-]	Laboratory strength [kPa]	Predicted strength [-]
7	11.5	3	3.8	1563	1376.4
7	11.5	5	2.3	2107	1907.5
7	11.5	7	1.6	2415	Ref.
14	11.5	3	3.8	1682	1628.4
14	11.5	5	2.3	2281	2246.4
14	11.5	7	1.6	2807	2834.8
28	11.5	3	3.8	1786	1751.0
28	11.5	5	2.3	2551	2411.3
28	11.5	7	1.6	3039	Ref.

และได้ลองเปรียบเทียบกับสมการทำนายกำลังอัดที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ (2006) โดยการเขียนในกราฟเส้น 1:1 แล้วให้แสดงค่า  $r^2$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการทำนายกำลังรับแรงอัด เทียบกับ เส้น 1:1

จะพบว่าสมการที่พัฒนาจะได้ค่า  $r^2$  ที่สูงกว่าสมการเดิม เป็นการพิสูจน์ว่าสมการที่เสนอ มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าสมการเดิม

## บทที่ 5

### บทสรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่แบบจำลองทำนายกำลังอัดดินซีเมนต์ โดยวิธีเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ จากข้อมูลทางสถิติจะพบว่า

ค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ดำเนินการในสนามจะมีค่าน้อยกว่าในห้องปฏิบัติการ

จากอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังอัดในสนามต่อกำลังอัดในห้องปฏิบัติการพบว่า มีการแจกแจงแบบปกติ และมีอยู่ 5 ลำดับที่อัตราส่วนดังกล่าวต่ำกว่า 0.52 ที่ความเชื่อมั่น 95 % หรือสรุปได้ว่า หากต้องการกำลังอัดในสนามที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่ากำลังอัดในห้องปฏิบัติการที่มีความเชื่อมั่น 95 % ต้องมีการชดเชยจำนวน 2 เท่า หรือใช้อัตราส่วนความปลอดภัย 2 เท่า

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังอัดในสนามกับในห้องปฏิบัติการพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดในสนามอย่างแท้จริง บ่งชี้ว่าเป็นวิธีการบ่ม ซึ่งควรมีการปรับปรุงวิธีการให้มีประสิทธิภาพ และมีความใกล้เคียงกับในห้องปฏิบัติการมากยิ่งขึ้น

แบบจำลองเพื่อทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ พบว่ามีค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินอยู่ 2 ค่า คือ  $a$  กับ  $b$  และสมการสามารถใช้ได้สำหรับดินที่มีเม็ดดินขนาดค่อนข้างใหญ่ (Coarse Grain Soil) ตามสมการ

$$q_u = \frac{a}{(w/C)^{0.65}} + \frac{b}{(w/C)^{0.59}} \log_{10}(D-6) \quad (5.1)$$

ซึ่งค่า  $a$  และ  $b$  สามารถคำนวณหาค่าได้ โดยการผสมดินซีเมนต์ที่ค่า  $w/C$  แตกต่างกันไปเพียง 2 ค่า ก็จะสามารถหาค่าคงที่ดังกล่าวได้ และเมื่อแทนค่าลงในสมการก็จะสามารถคำนวณหากำลังอัดที่ระยะในการบ่ม  $D$  ได้

เมื่อมีการเปรียบเทียบกับสมการที่มีการเสนอไว้เดิมก็พบว่า มีความถูกต้องมากกว่าโดยดูได้จากค่า  $r^2$

## เอกสารอ้างอิง

- กัลยา วานิชย์บัญชา (2553). การวิเคราะห์สถิติ : สถิติสำหรับการบริหารและการวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 12. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทรงพล บุญมาดี (2529). ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมโยธา สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแส จรัสกร (2544). กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน. รายงานวิจัยฉบับที่ วพ.188 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม. 160-163.
- A.A. Luondon & Partner Consulting Engineers. (1995). Cold Deep In Place Recycling: Technical Recommendations and Application Specification. South Africa. A.A. Luondon.
- Atkinson, P.W. (1995). Advacrete/Cement Additive for Stabilization. **Pavement Rehabilitation Workshop**. 24 & 25 August 1995. Queensland, 1-38.
- Bell, F.G. (1976) .The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement. **Association of Engineering Geologists**. 267 – 278.
- Circeo, L.T., Davidson, D.T. and David, H.T. (1962). Strength Maturity Relation of Soil-Cement Mixtures. **Iowa State University for 41<sup>th</sup> Annual Meeting of the Highway Research Board**. 35-45.
- Clare, K.E. and Pollard, A.E. (1951). The Relationship Between Compressive Strength and Age for Soil Stabilized with Four Type of Cement. **Magazine of Concrete Research**. 3(8):57-64.
- Czernin, W. (1962). Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers. **New York Chemical Publishing**. 36-50.
- Davidson, D.T., Katti, R.K. and Welch, D.E. (1958). Use of Fly Ash with Portland cement for Stabilization of Soil. **Highway Research Board**. Bulletin 198. 1-11.
- Davidson, D.T. and Bruns, B.W. (1960). Comparison of Type I and Type III Portland Cement for Soil Stabilization. **Highway Research Board**. Bulletin 267. 28-45.62



- Davidson, D.T. (1961). Soil Stabilization with Portland cement. **Highway Research Board**. Bulletin 292. 45-151.
- Davidson, D.T., Pitre, G.L., Matoes, M. and Kalankamary, P.G. (1962). Moisture-Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixtures. **Highway Research Board**. Bulletin. 353. 42-63.
- Felt, E.J. (1955). Factor Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board**. Bulletin 108. 138-163.
- Fuller, M.G. and Dabney, G.W. (1952). Stabilizing Weak and Defective Bases with Hydrated Lime. **Roads and Streets**. 95: 64-69.
- Gordon, R.G. (1984). Recent Experiences and Developments in Design and Construction of Cement Stabilized Pavement. **Australian Road Research Board Symposium**.
- Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963). Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement. **Highway Research Record**. 36: 146-171.
- Highway Research Board, (1949). Prevention of Moisture Loss in Soil-Cement with Bituminous Material. **Highway Research Board**. Research Report. 353.
- Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization. (1959). Definition of Term Relating to Soil-Portland Cement Stabilization. **Highway Research Abstracts**, 29(6): 28-29.
- Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2001). A new approach for studying behavior of cement stabilized clays. **Proceeding of 15<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. Turkey. 3: 1759-1762.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement admixed clays. **Geotechnique**. 53(4): 439-444.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. and Koga, H. (2002). Improvement of soft marine clays by deep mixing technique. **Proceeding of 12<sup>th</sup> International Conference Offshore and Polar Engineering**. Kitakyushu. Japan. 584-591.
- Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2006). Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: laboratory and field study. **Soil and foundations**. Vol.46, No.3, Japanese Geotechnical Society. 351-366

- Hogentogler, C.A. (1938). **Engineering Properties of the Soils**. New York. McGraw-Hill. 9-18.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). **Soil Stabilization**. Sydney. Butterworths. 64-69.63
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. (1981). Deep mixing method using cement hardening agent. **Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Stockholm. 721-724.
- Kuhlman, R.H. (1989). Soil-Cement from Recycled Pavement. **Concrete International Design and Construction**. 11(5): 35-38.
- Lade, P.V. and Overton, D.D. (1989). Cementation Effects in Frictional Material. **Journal of Geotechnical Engineering**. 115(9): 1373-1387.
- Lambe, T.W. and Moh, Z.C. (1957). Improvements of Strength of Soil-Cement with Additive. **Highway Research Board**. Bulletin. 183. 38-47.
- Lambe, T.W., Michaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959). Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compounds. **Highway Research Board**. Bulletin 241. 67-103.
- Leadabrand, J.A. (1956). Some Engineering Aspects of Soils-Cement Mixture. **Mid-South Section. ASCE**. April 27. 64-69.
- Lightsey, G.R., Arman, A. and Callihan, C.D. (1970). Change in Characteristics of Cement Stabilized Soils by Addition of Excess Compaction Moisture. **Highway Research Record**. 315: 36-45.
- Maclean, D.J., Robinson, P.J.M. and Webb, S.B. (1952), An Investigation of the Stabilization of Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction. **Roads and Road Construction**. 3(358): 287-292.
- Maner, A.W. (1952). Curing Soil Cement Base. **Proceeding of Highway Research Board**. Vol. 31. Washington. D.C., National Research Council, 540-558.
- Marshall, T.J. (1954). Some Properties of Soil Treated with Portland cement. **Symposium on Soil Stabilization**. Australia. 28-34.
- Massachusetts Institute of Technology, (1954). Soil Stabilization for Highways. Massachusetts. **Massachusetts Department of Public Works and Joint Highway Research Project**. 81.

- Mills, W.H., Jr. (1935). Road Base Stabilization with Portland cement. **Engineering News-Record**, 115(22): 751-753.
- Mills, W.H., Jr. (1936). Stabilizing soils with Portland cement, Experiments by South Carolina Highway Department. **Highway Research Board Proceedings**. 16: 322-347. 64
- Mitchell, J.K. and El Jack, S.A. (1966). The fabric of soil-cement and its formation. **Proceedings of 14<sup>th</sup> National Conference Clay and Clay Minerals**. 26: 297-305.
- Miura., N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. **Soils and Foundations**. 41(5): 33-45.
- Moh, Z.C. (1965). Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals. **Highway Research Record**. 86: 39-61.
- Moh, Z.C., Chin, Y.P., and Ng, S.C. (1967). Cement stabilization of lateritic soil. **Proceeding 3<sup>rd</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 42-46.
- Ng, S.C. (1966). Cement Stabilization of Lateritic Soils. **Master of Engineering Thesis**. Civil Engineering Program. No. 125. Seato Graduate School of Engineering. 55-65.
- Norling, L.T. and Packard, R.G. (1958). Expanded Short-Cut Test Method for Determining Cement Factors for Sandy Soil. **Highway Research Board**. Bulletin. 198. 20-31.
- Pendola, H.J., Kennady, T.W. and Hutson, W.R. (1969). Evaluation of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials. **University of Texas at Austin Research Report**. 98(3)
- Pinto, C.D.S., Davidson, D.T. and Laguros, J.G. (1962). Effect of Lime on Cement Stabilization of Monmorillonitic Soils. **Highway Research Board**. Bulletin 353. 64-83.
- Portland cement Association, (1959). Soil-Cement Laboratory Handbook. **Illinois, Skokie**.
- Redus, J.F. (1958). Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields. **Highway Research Board**. Bulletin. 198. 13-19.
- Reinhold, F. (1955). Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board**. Bulletin. 108. 128-137.
- Ruenkraitersa, T. (1982). Principle of Soil Stabilization. **Group Training in Road Construction**. Bangkok, Thailand. 17-26.

- Ruenkraitersa, T. (1982). **Principle of Soil Stabilization. Bangkok.** Highways Department. 17-27.
- Shackel, B. and Lee, R.H.F. (1974). Some Aspect of Curing of Soil-Cement. **The 7<sup>th</sup> Conference of the Australian Road Research Board.** 7(7): 5-17.
- Tabensky, W. (1990). Road Recycling in US. **Shirr of Buln Buln Memo.** 83: 66-73. 65
- Terrel, R.J., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomson, M.R. (1979). **Soil Stabilization in Pavement Structure a User's Manual Mixture Design Consideration.** Vol. 2. Washington D.C. Government Printing Office.
- Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T. (1979). Engineering properties of lime treated marine soils and DMM. **Proceedings of 6<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.** 1: 191-194.
- The Siam Cement Company Ltd. (1965). Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization. Bangkok. Thailand. Siam Cement. 25-26.
- Walton, J.E. (1995). Cold In Place Recycling Result and Procedures Most Often Ask Question and Answers. **Pavement Rehabilitation Workshop.** 25 & 25 August 1995. Queensland. 1-15.
- Wang, M.C. and Huston, M.T. (1972). Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil. **Highway Research Record.** 351: 19-24.
- Winterkorn, H.F. and Chandrasekharn, E.C. (1951), "Lateritic Soil and Their Stabilization", **Highway Research Board.** Bulletin. 44, 10-29.
- Wilmot, T.D. (1995). Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement. **Pavement Rehabilitation Workshop.** 24&25 August 1995. Queensland. 1-14.
- Wirtgen. (1992). Cold Recycling. **An Economic and Ecologically Construction Process.** West Germany. Wirtgen.

## ประวัติผู้เขียน

นายมงคล ดัชนี เกิดเมื่อวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2516 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล จังหวัดชัยภูมิในปี พ.ศ.2535 เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2539 หลังจากจบการศึกษาได้ปฏิบัติงานในบริษัทเอกชนเป็นเวลาประมาณ 2 ปี จากนั้นได้บรรจุเป็นข้าราชการในตำแหน่งวิศวกรโยธา 3 ฝ่ายวิชาการ สำนักงานโยธาธิการจังหวัดสิงห์บุรี กรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย ปี พ.ศ.2544 ได้ย้ายมาดำรงตำแหน่ง วิศวกรวิชาชีพ 4 (วิศวกรรมโยธา) ฝ่ายวิชาการ สำนักงานโยธาธิการจังหวัดชัยภูมิ ตามพระราชบัญญัติ ปรับปรุง กระทรวง ทบวง กรม พ.ศ.2545 ได้มีการตั้งกรมทางหลวงชนบท สังกัดกระทรวงคมนาคมขึ้น จึงได้ย้ายมาสังกัดสำนักงานทางหลวงชนบท จังหวัดชัยภูมิ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ ฝ่ายวิชาการ สำนักทางหลวงชนบทจังหวัดชัยภูมิ ทำงานที่เกี่ยวข้องกับงานด้านวิศวกรรมงานทาง ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้ตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2551