

## การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

**Investigation of Influential Parameters**

**on Drying Shrinkage of Concrete**

นายชนพงศ์ เติร์วิไลรัตน์ รหัส 49380738  
นายนิกร กว้างปาละ รหัส 49380936  
นายสุพัฒน์ชัย ใจช่วย รหัส 49381490

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์	14 ก.ค. 2553
วันที่รับ.....	.....
เลขทะเบียน.....	15070235 e2
มร.	.....
เดบเรียกน้ำเสียง.....	ชูรุ่งนก...

ปริญญาในพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาชีวกรรมโยธา ภาควิชาชีวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552



## ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาดตัวแบบแห่งของคอนกรีต	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายชนินพงษ์ เลิศวิไกรตน์	รหัส 49380738
	นายนิกร กวังปะละ	รหัส 49380936
	นายสุพัฒน์ชัย ใจช่วย	รหัส 49381490
ที่ปรึกษาโครงการ	พศ.คร.สรัณกร เหมชะวุฒย์	
	ดร.สนธยา ทองอรุณศรี	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	
ปีการศึกษา	2552	

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาศึกษากรรมโยธา

..... มีที่ ..... ที่ปรึกษาร่วมโครงการ  
( พศ.คร.สรัณกร เหมชะวุฒย์ )

..... ที่ปรึกษาร่วมโครงการ  
( ดร.สนธยา ทองอรุณศรี )

..... กรรมการ  
( อาจารย์วรางค์สักยณ์ ช่อนกลิน )

..... กรรมการ  
( อาจารย์ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง )

<b>ชื่อหัวข้อรายงาน</b>	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบตัวแบบแห้งของคอนกรีต		
<b>ผู้ดำเนินโครงการ</b>	นายชนิพงษ์ เลิศวิไลรัตน์	รหัส 49380738	
	นายนิกร ภรร่วงป่าละ	รหัส 49380936	
	นาบสุพัฒน์ชัย ใจช่ำบ	รหัส 49381490	
<b>ที่ปรึกษาโครงการ</b>	ผศ.ดร.สรัณคร เนียมวิญญา		
	ดร.สันธยา ทองอรุณศรี		
<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมโยธา		
<b>ภาควิชา</b>	วิศวกรรมโยธา		
<b>ปีการศึกษา</b>	2552		

### บทคัดย่อ

การทดสอบร้าวของคอนกรีต เป็นปัญหาที่พบมากในงานก่อสร้างทั่วไป การทดสอบร้าวขังส่งผลต่อปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีต ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากเพื่อทำการบำรุงรักษา นอกจากนี้การทดสอบตัวแบบแห้งของคอนกรีตยังเป็นหนึ่งในสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในปัจจุบันสภาพอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากจากสภาพโลกร้อน ดังนั้น โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน( $0.25-0.80$ ) ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม( $1.2-1.4$ ) ขนาดของมวลรวมหยายน( $3/8"$  ,  $3/4"$  และ  $1"$ ) อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม( $0.36$  ,  $0.42$  และ  $0.48$ ) การแทนที่วัสดุประสานด้วยถ้าลอบ( $0-50\%$ ) และการแทนที่วัสดุประสานด้วยพิงหินปูนละเอียด( $0-20\%$ ) โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  ซม. และก้อนตัวอย่างย่างคอนกรีตถูกเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ  $28 \pm 1^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5\%$

จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษามีผลต่อพฤติกรรมการทดสอบตัวของคอนกรีต จากผลการทดลองพบว่า ส่วนผสมที่มีปริมาณเพสต์มากจะมีค่าการทดสอบตัวสูงกว่าส่วนผสมที่มีปริมาณเพสต์น้อยกว่า ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มปริมาณถ้าลอบของการทดสอบตัวมีค่าลดลง นอกจากนี้การเติมพิงหินปูนหรือการเพิ่มน้ำหนักของมวลรวมหยายนมีผลทำให้ค่าการทดสอบตัวลดลงได้เช่นกัน ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีอิทธิพลต่อค่าการทดสอบตัวของแห้งที่ทดสอบน้อยกว่า เมื่อเปรียบกับตัวแปรอื่น ๆ

<b>Project title</b>	Investigation of Influential Parameters on Drying Shrinkage of Concrete		
<b>Name</b>	Mr. Chinapong Lertvilairut	ID. 49380738	
	Mr. Nigorn Kwangpala	ID. 49380936	
	Mr. Supatchai Jaichouy	ID. 49381490	
<b>Project advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Saranagon Hemavibool Dr. Sontaya Tongaroonsri		
<b>Major</b>	Civil Engineering		
<b>Department</b>	Civil Engineering		
<b>Academic year</b>	2009		

## Abstract

Cracks in concrete structures are one common problem in concrete construction today. They can lead to significant durability problems which often result in high maintenance and repair costs. Drying shrinkage of concrete is the most common causes of concrete cracking especially in the warmer climate at present. Therefore, the main objective of this research is to study the influential parameters on the drying shrinkage of concrete. The following parameters were studied: water-binder ratio (0.25–0.8), paste volume fractions of concrete (1.2–1.4), Maximum size of coarse aggregate (3/8", 3/4" and 1"), sand to coarse aggregate ratio (0.36, 0.42 and 0.48), Fly ash (0–50%) and Limestone filler content (0–20%). The drying shrinkage of concrete was measured on the 7.5x7.5x28.5 cm. prisms using the length comparator, in a room at 28 °C and 50 ±5 % relative humidity.

All of the key parameters investigated were found to have an influence on the drying shrinkage of concrete. The results indicate that mixes having higher paste volume result in higher total shrinkage. On the contrary, an increase in fly ash content results in a reduction of the value of total shrinkage. Results also show that the addition of a limestone filler or increase of the size of coarse aggregate reduces the shrinkage. Moreover, the influence of water-binder ratio upon the drying shrinkage of the concrete specimens was found to be relatively small when compared to others key parameters.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญานินพน์เล่นน้ำสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนี้น ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ  
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการนิพนธ์ ศ.ดร.สรัณกร เหน่งวิญญา ที่ปรึกษาโครงการที่ท่านได้รับ  
ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินการโครงการ ตลอดจนข้อควรรู้เมื่อปฏิบัติงานต่างๆ  
และสารเคมีที่ใช้ในการทำโครงการให้คณะผู้จัดทำโครงการ พร้อมทั้งเสียสละเวลาของท่านมา  
ควบคุมดูแลให้คำแนะนำ สั่งสอน การปฏิบัติงานโครงการของคณะผู้จัดทำอย่างดีเยี่ยม

ขอขอบพระคุณ ดร.สนธยา ทองอรุณศรี อาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
ที่ท่านได้รับชี้แนะแนวทางการปฏิบัติงานโครงการ

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้แก่  
คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณครูช่างทุกท่าน ที่ให้ยืมอุปกรณ์ เครื่องมือทดสอบต่างๆ ตลอดจนให้  
คำแนะนำในการใช้เครื่องมือดำเนินงานโครงการ อำนวยความสะดวก และความสะดวก และเอื้อเพื่อการใช้สถานที่  
ในการปฏิบัติงานโครงการ

ขอขอบพระคุณบิรา นารา ที่อุปการคุณด้านการเงิน และให้กำลังใจที่ดี ตลอดมา  
จนกระทั่งทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆ ชาววิศวกรรมโยธาทุกคนที่ให้ยืมเครื่องมืออุปกรณ์ในการ  
ปฏิบัติงานบางอย่าง และช่วยปฏิบัติงานโครงการ รวมถึงให้กำลังใจที่ดีตลอดมา จนกระทั่ง  
โครงการนี้สำเร็จ

คณะผู้ดำเนินโครงการนิพนธ์

นายชินพงษ์ เกtrieวิไลรัตน์

นายนิกร ภรรภัส

นายสุพัฒน์ชัย ใจช่วย

มีนาคม 2553

# สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาบัณฑิต.....ก

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ก

กิตติกรรมประกาศ.....ก

สารบัญ.....ก

สารบัญตาราง.....ก

สารบัญรูป.....ก

สารบัญสัญลักษณ์และข้อมูลอื่น.....ก

บทที่ 1 บทนำ.....1

    1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....1

    1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....2

    1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

    1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....2

    1.5 แผนการดำเนินโครงการ.....3

    1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....3

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....4

    2.1 บทนำ.....4

    2.2 การหดตัวแบบออโตจีนส์ (Autogenous Shrinkage).....4

    2.3 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage).....5

    2.4 เกลือดอย (Fly Ash).....7

    2.5 ผงหินปูน (Limestone Powder).....10

    2.6 ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....10

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....12

    3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....12

    3.2 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการเรียนรู้ของผู้ทดสอบ.....18

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การทดสอบการวัดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต.....	28
3.4 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	34
4.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to Binder Ratio).....	34
4.2 ขนาดมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate).....	39
4.3 ปริมาณมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหิน细腻 (Sand / Aggregate).....	41
4.4 ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวม (Paste Content).....	43
4.5 การแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน (Fly Ash).....	45
4.6 การแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด (Limestone Powder).....	48
4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผล.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	54
ภาคผนวก ข ตารางและกราฟค่าการหดแบบแห้งตัวของแต่ละส่วนผสม.....	60
ภาคผนวก ค ตารางผลของกำลังอัดของแต่ละส่วนผสม.....	112
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	115

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการศึกษาโครงการ.....	3
2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของถ้วยอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	8
2.2 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618.....	8
2.3 องค์ประกอบของตัวอย่างถ้วยอยลิกไนต์เมื่อเวลาห่วงปี พ.ศ. 2528 – 2544.....	9
3.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์.....	12
3.2 อัตราส่วนผสมที่ต้องการหากค่าปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสมและค่าปริมาณฟองอากาศ ในคอนกรีต.....	19
3.3 สัมฤทธิ์ผลการทดสอบคอนกรีตสำหรับการทดสอบการทดสอบตัวของคอนกรีตแบบแห้ง.....	21



# สารบัญ

รูปที่	หน้า
2.1 อัตราการหดตัวแบบออ トイจีนส.	5
3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	13
3.2 มวลรวมหมายที่ใช้ในการทดสอบ	14
3.3 การขัดเก็บมวลรวมหมายเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น	14
3.4 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ	15
3.5 การเก็บมวลรวมละเอียดที่ในทำการทดสอบ	15
3.6 กราฟส่วนขนาดคละของมวลรวมหมายและมวลรวมละเอียด	16
3.7 สารพัฒน์ประเภทสารลดน้ำย่างแรง RHEOBUILD – 1000	17
3.8 เถ้าดอย (Fly Ash)	17
3.9 ผงหินปูนละเอียด (Limestone Powder)	18
3.10 เครื่องผสมคอนกรีตแบบราบ ขนาดความจุ 56 ลิตร	22
3.11 ชุดเครื่องมือทดสอบปริมาณฟองอากาศ	22
3.12 เครื่องชั่งน้ำหนัก	23
3.13 เครื่องสั่นคอนกรีต	23
3.14 แบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยม ขนาด ( $7.5 \times 7.5 \times 28.5$ เซนติเมตร)	23
3.15 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร	23
3.16 อุปกรณ์ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต	24
3.17 ชุดทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว (Length Comparator)	24
3.18 ชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	24
3.19 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาส่วนขนาดคละของมวลรวมหมายและมวลรวมละเอียด	25
3.20 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความอัดแน่น	25
3.21 การเตรียมวัสดุผสม	25
3.22 การเกลือนเครื่องผสมคอนกรีตแบบราบด้วยซีเมนต์เพสต์	25
3.23 การผสมคอนกรีต	26
3.24 การหาค่าการยุบตัว	26
3.25 การหาค่าปริมาณฟองอากาศ	26
3.26 ขั้นตอนการสั่นของคอนกรีต	27
3.27 การปิดหน้าฝิวคอนกรีต	27

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.28 การແກະແບນຫດ່ອຄອນກົງຕີ.....	27
3.29 ການນຳມຄອນກົງຕີໃນນ້ຳສະອາດ.....	28
3.30 ກາຮຈົບນັກຕົກຄ່າອຸພາກຸມແລກວານຊື່ນສັນພັກ.....	29
3.31 ຕັ້ງຄ່າແຫ່ງເຫັນອ້າງອີງ.....	29
3.32 ບັນຫວາຍຢ່າງຄອນກົງຕີໃນນ້ຳ.....	30
3.33 ວັດຄ່າການເປີ່ມຍິນແປ່ງວານຍາວຂອງກົອນຕັ້ວຢ່າງຄອນກົງຕີ.....	30
3.34 ເຊື່ອກົອນຕັ້ວຢ່າງຄອນກົງຕີ ໃຫ້ອູ້ໃນຄອນກົງຕີສກາພອິນຕົວພິວແຕ່ງ.....	30
3.35 ຂັ້ນນ້ຳໜັກກົອນຕັ້ວຢ່າງ.....	30
3.36 ຕໍາແໜ່ງທີ່ເກີນກົອນຕັ້ວຢ່າງຄອນກົງຕີ.....	31
3.37 ເຕີຍມກົອນຄອນກົງຕີທີ່ຈະທົດສອນກຳລັງອັດ.....	32
3.38 ວັດນາດວານສູງແລກເຕັ້ນຜ່ານສູນຢ່າດານ.....	32
3.39 ຂັ້ນນ້ຳໜັກກົອນຕັ້ວຢ່າງ.....	33
3.40 ທົດສອນກຳລັງອັດຄົວຍເກຣີງ Compaction Strength.....	33
4.1 ກາຮຟແສດງພຸດຂອງອັດຮ່າວນ້ຳທີ່ອວັດຖຸປະສານທີ່ມີຕ່ອດຄ່າກາຮົດຕ້ວາ ຂອງແຫ່ງທົດສອນ ຄອນກົງຕີ.....	34
4.2 ກາຮຟແສດງພຸດຂອງອັດຮ່າວນ້ຳທີ່ອວັດຖຸປະສານທີ່ມີຕ່ອດຄ່າກາຮົດຕ້ວາ ສູງເລີຍນ້ຳໜັກ ຂອງແຫ່ງ ທົດສອນຄອນກົງຕີ.....	35
4.3 ກາຮຟແສດງພຸດຂອງອັດຮ່າວນ້ຳທີ່ອວັດຖຸປະສານທີ່ມີພົດຕ່ອກຳລັງອັດ ຂອງແຫ່ງທົດສອນ ຄອນກົງຕີ.....	35
4.4 ກາຮຟແສດງພຸດຂອງນາຄມວລຽມຫຍານທີ່ມີຕ່ອດຄ່າກາຮົດຕ້ວາ ຂອງແຫ່ງທົດສອນຄອນກົງຕີ.....	37
4.5 ກາຮຟແສດງພຸດຂອງນາຄມວລຽມຫຍານທີ່ມີຕ່ອດຄ່າກາຮົດຕ້ວາ ສູງເລີຍນ້ຳໜັກ ຂອງແຫ່ງທົດສອນ ຄອນກົງຕີ.....	37
4.6 ກາຮຟແສດງພຸດຂອງນາຄມວລຽມຫຍານທີ່ມີຕ່ອກຳລັງຍັດ ຂອງແຫ່ງທົດສອນຄອນກົງຕີ.....	38
4.7 ກາຮຟແສດງພຸດຂອງປິຣິນາພົມວລຽມລະເອີດຕ່ອນວລຽມທັງໝາດທີ່ມີຕ່ອດຄ່າກາຮົດຕ້ວາ ຂອງແຫ່ງ ທົດສອນຄອນກົງຕີ.....	39
4.8 ກາຮຟແສດງພຸດຂອງປິຣິນາພົມວລຽມລະເອີດຕ່ອນວລຽມທັງໝາດທີ່ມີຕ່ອດຄ່າກາຮົດຕ້ວາ ສູງເລີຍນ້ຳໜັກ ຂອງແຫ່ງທົດສອນຄອນກົງຕີ.....	39

## สารบัญรูป (ต่อ)

ขุปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงผลของปริมาณมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดที่มีต่อกำลังอัด ของแท่ง ทดสอบคอนกรีต.....	40
4.10 กราฟแสดงผลของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมที่มีต่อค่าการหดตัว ของแท่งทดสอบ คอนกรีต.....	41
4.11 กราฟแสดงผลของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของแท่ง ทดสอบคอนกรีต.....	42
4.12 กราฟแสดงผลของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมที่มีต่อกำลังอัด ของแท่งทดสอบ คอนกรีต.....	42
4.13 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่เมนต์ค่วยถ้าลอยที่มีต่อค่าการหดตัว ของแท่งทดสอบ คอนกรีต ตั้งแต่ $g1.4w35r0 - g1.4w35r50$ และ $g1.4w55r0 - g1.4w55r50$ .....	44
4.14 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่เมนต์ค่วยถ้าลอยที่มีต่อค่าการหดตัว ของแท่งทดสอบ คอนกรีต ตั้งแต่ $g1.4w65r0 - g1.4w65r50$ และ $g1.4w80r0 - g1.4w80r50$ .....	44
4.15 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่เมนต์ค่วยถ้าลอยที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของแท่ง ทดสอบคอนกรีต ตั้งแต่ $g1.4w35r0 - g1.4w35r50$ และ $g1.4w55r0 - g1.4w55r50$ .....	45
4.16 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่เมนต์ค่วยถ้าลอยที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของแท่ง ทดสอบคอนกรีต ตั้งแต่ส่วนผสม $g1.4w65r0 - g1.4w65r50$ และ $g1.4w80r0 - g1.4w80r50$ .....	45
4.17 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่เมนต์ค่วยถ้าลอยที่มีต่อกำลังอัด ของแท่งทดสอบคอนกรีต .....	46
4.18 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่เมนต์ค่วยพิงหินปูนละเอียดที่มีต่อค่าการหดตัว ของแท่ง ทดสอบคอนกรีต.....	47
4.19 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่เมนต์ค่วยพิงหินปูนละเอียดที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของ แท่งทดสอบคอนกรีต.....	48
4.20 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่เมนต์ค่วยพิงหินปูนละเอียดที่มีต่อกำลังอัด ของแท่งทดสอบ คอนกรีต.....	48

## สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

$\mu$	= หน่วย ไมโครอน
e	= ความเครื่องดูด
F'c	= กำลังอัดที่กำหนดของคอนกรีต
ksc	= กิโลกรัมต่ำตราระยะหักเมตร
WL	= การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)
DS	= ค่าการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)
s/a	= มวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (Sand / Aggregate)
LP	= พงพินปูนละเอียด (Limestone Powder)
g	= ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม
w	= อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to Binder Ratio)
r	= อัตราส่วนการแทนที่ซึ่งกัน



# บทที่ 1

## บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ตึ้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจาก เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านราคาและคุณภาพ คอนกรีตจะประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน ใหญ่ๆ คือ ซีเมนต์เพสต์ (Cement Pates) และมวลรวมคละ (Aggregate) ซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และอากาศ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไขเครื่องทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติจับตัวเกาะ แน่นกับวัสดุผสม ส่วนวัสดุผสมคละ ประกอบด้วยมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลรวม ละเอียด (Fine Aggregate) โดยวัสดุผสมหยาบหมายถึง หินหรือกรวดที่คงค้างบนตะแกรงร่อน มาตรฐานเบอร์ 4 ส่วนวัสดุผสมละเอียดหมายถึง วัสดุที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่คงค้าง ตะแกรงร่อนเบอร์ 200 โดยกำลังของคอนกรีตจะเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับ น้ำ คอนกรีตในช่วงแรก ส่วนผสมจะคงสภาพเหลวอยู่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง สามารถนำไปเทลง แบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง สามารถรับน้ำหนักได้มาก ขึ้น คอนกรีตนี้เป็นวัสดุที่รับแรงอัดได้ดีแต่มีความเปราะและสามารถรับแรงดึงได้ประมาณ 10 % ของแรงอัด การที่คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้ดี จึงทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ง่าย และจะ ส่งผลต่อความคงทนของคอนกรีต

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงแต่เปราะ มีความสามารถในการรับ แรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้น้อย เมื่อมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นภายในตัวคอนกรีตมากกว่าความสามารถ ในการรับแรงดึง คอนกรีตจะเกิดแตกร้าว หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากการทำ ภายนอก หรือเกิดจากการหดตัวของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตเกิดการสูญเสียความชื้น นอกจากนี้การ เปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หากคอนกรีต เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวแต่ไม่มีการยึดรั้ง จะไม่ทำให้เกิดหนวยแรงดึงขึ้นในคอนกรีต แต่ใน ความจริงโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปจะมีการยึดรั้ง ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างข้างเคียง หรือแม้แต่ เหล็กเสริม ที่จะเป็นตัวยึดรั้งการหดตัวได้เช่นกัน ซึ่งจะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ หากเกิด การแตกร้าวภายนอก คือการหดตัวของตัวอาคาร จึงจะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ หากเกิด ปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการใช้อาคาร ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะนำไปสู่การซ่อมแซมที่ยุ่งยากซับซ้อนและมี ค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นการศึกษาการหดตัวของคอนกรีตสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการสร้าง

แบบจำลองการหดตัวของคอนกรีตในอนาคต เพื่อลดปัญหาด้านการແຕກร้าวนៅองจากการหดตัวของ  
คอนกรีตและสามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างถูกต้อง ตลอดจนลดค่าใช้จ่ายลงไปได้  
ในปัจจุบันยังมีข้อมูลที่ใช้สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตชนิดนี้อยู่มากในประเทศไทย  
ดังนั้นจึงมีการศึกษาการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต(Drying Shrinkage)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต
- 1.2.2 เพื่อหาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลอง  
ทำงานการหดตัวของคอนกรีตในอนาคต

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต
- 1.3.2 ทราบผลของเด็กออยและผงพิโน่ปูนต่อการหดตัวของคอนกรีต
- 1.3.3 ได้ข้อมูลการหดตัวสำหรับนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทำงานการหดตัวของ  
คอนกรีตในอนาคต

## 1.4 ขอบเขตการทำงาน

โครงงานนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ปัจจัยที่ศึกษา<sup>ได้แก่</sup>

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประسان	(0.25 – 0.80)
ขนาดของมวลรวมหยาบ	(3/8", 3/4" และ 1")
ปริมาณมวลรวมและเอียคต่อมวลรวมทั้งหมด	(0.36, 0.42 และ 0.48)
ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม	(1.2 และ 1.4)
การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเด็กออย	(10%-50%)
การแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงพิโน่ปูนและเอียค	(5 และ 8 ในกรอน)

### 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

เดือน	พฤษจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม
กิจกรรม					
1.การนำเสนอโครงการ	—				
2.การจัดทำหัวข้อโครงการ	—	—			
3.การทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบ		—	—	—	
4.วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น		—	—	—	
5.เขียนรายงาน		—		—	

### 1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1. ค่าวัสดุสำนักงาน	500	บาท
2. ค่าเอกสาร	1,000	บาท
3. ค่าถ่ายอัคูป	200	บาท
4. ค่าวัสดุอุปกรณ์	500	บาท
5. ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด	800	บาท
รวมเป็นเงิน	3,000	บาท (สามพันบาทถ้วน)

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### **2.1 บทนำ**

การหดตัวของคอนกรีตส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชิ้นเม้นต์เพสต์ และมีหลากหลายประเภทเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ กัน อาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุที่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปได้เป็น 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Chemical Shrinkage หรือ Hydration Shrinkage)
2. การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage)
3. การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)
4. การหดตัวเนื่องจากการรับอนิชั่น (Carbonation Shrinkage)

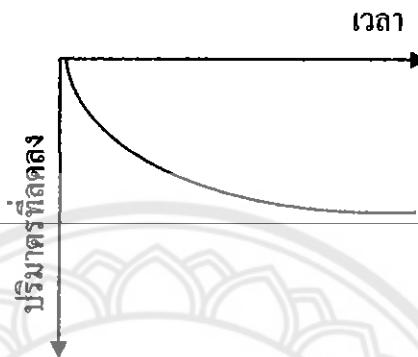
การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดในช่วงก่อนการก่อตัว เป็นการหดตัวที่มักไม่ก่อให้เกิดผลเสียหายต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว และมักไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต เมื่อจากจะเกิดมาก ในช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนเวลาถอยตัวสุดท้ายของคอนกรีต การหดตัวอีก 3 แบบ เป็นการหดตัวชนิดที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยรวมของคอนกรีตซึ่งจะนำไปสู่การแตกร้าวได้ตามการบีบอัด และจำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบคอนกรีตให้คงทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวอย่างมากในปัจจุบัน

#### **2.2 การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage)**

การหดตัวของคอนกรีตแบบออโตจีนัส เป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขึ้นสุดท้ายของคอนกรีต รวมกับที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งการหดตัวแบบออโตจีนัสนี้ เป็นการหดตัวที่ไม่มีน้ำเข้าไปทดแทนในส่วนที่นำไประไนในปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และทำให้เกิดหน่วงแรงคงขึ้นในคอนกรีต เมื่อหน่วงแรงคงนี้มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงคงของคอนกรีต จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวกล่าวโดยสรุปการหดตัวแบบออโตจีนัส เป็นการหดตัวที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเอง

### 2.2.1 ช่วงเวลาที่เกิดการหดตัวแบบอโตจีนัส

การหดตัวแบบอโตจีนัสจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ เมื่อองค์การหดตัวแบบอโตจีนัสเกิดในขณะที่มีปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ จึงทำให้การหดตัวแบบนี้มีอัตราสูงในช่วงวันแรกๆ และจะค่อยๆ มีอัตราต่ำลงเมื่อระยะเวลาผ่านออกไป ดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบอโตจีนัส โดยเริ่มต้นจากการระยะเวลาหดตัวเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อัตราการหดตัวแบบอโตจีนัส [2]

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนัส

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนัสมีดังต่อไปนี้

1. ความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไไซเดรชั่น ส่วนมากถ้าปฏิกิริยาไไซเดรชั่นเกิดขึ้นเร็วๆ ก็จะทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสเกิดขึ้นเร็ว และสูงตามไปด้วย ดังนั้นการหดตัวแบบอโตจีนัสจะสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น

2. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ก็จะทำให้เกิดการหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากความชื้นน้ำจะต่ำลง และขนาดของช่องว่างของคอนกรีต ก็เล็กลงด้วย

3. ลักษณะของโครงสร้างช่องว่างในชิ้นงาน เพศต์ ยิ่งมีขนาดเล็ก และมีความไม่ต่อเนื่อง ก็จะทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากน้ำอิสระจะเคลื่อนตัวไม่สะดวกและซ่องว่างที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดแรงดึงสูง

## 2.3 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสถับ裳อากาศสูญเสียน้ำ และเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิม ได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่

### 2.3.1 กสไกของภาระการแตกร้าวน่องจากการทดสอบแบบแห้ง

การทดสอบแบบแห้งมีกลไกการเกิดขึ้นในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศ มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างของคอนกรีตมาก เนื่องจากสารสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงดันในช่องว่างของคอนกรีต ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการทดสอบนี้ถูกยืนยัน ไม่ว่าด้วยโครงสร้างที่อยู่รอนช้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้น รอบแทกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยืนยันนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดครั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังดึงดันของคอนกรีตในขณะนั้น การแตกร้าวที่เกิดจากการทดสอบแบบแห้งเป็นการแตกร้าวที่เกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว และการตกแต่งผิวใหม่ไม่สามารถบรรยายแตกนี้ได้ [2]

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบแบบแห้ง

การทดสอบแบบแห้งเกิดจากสารสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตไปสู่บรรยากาศแวดล้อม ดังนั้นปัจจัยภายในและภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีต จึงมีผลต่อการทดสอบแบบแห้งทั้งสิ้น ปัจจัยดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง จะทำให้มีช่องว่างของคอนกรีตมาก ปริมาณน้ำอิสระก็จะมากด้วย การที่คอนกรีตมีช่องว่างของคอนกรีตมาก จะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก

2. ปริมาณของมวลรวม โดยปกติแล้วการทดสอบจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยหรือ อิกนิยานี่ที่มีปริมาณมวลรวมมาก ก็ทำให้เกิดการทดสอบน้อยลง

3. ชนิดและคุณภาพของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในเรื่องปริมาตร ดังนั้นมวลรวมที่มีคุณสมบัติที่จะช่วยต้านการทดสอบในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามวลรวมมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง การแต่กันของมวลรวมจะเป็นกลไกที่สำคัญ อันหนึ่งของการต้านทานการทดสอบซึ่งเกิดการทดสอบแบบแห้งในคอนกรีตมากตามไปด้วย หากคุณภาพของมวลรวมที่ดี ก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การทดสอบของคอนกรีตลดลงเนื่องจากจะทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลง

4. ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้สารปอช ไซลอน หรือวัสดุผสมบางชนิด ก็มีผลต่อการทดสอบของคอนกรีต เช่น เถ้าโลยกสามารถช่วยลดการทดสอบแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และถ้าโลยกบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติ ช่วยให้คอนกรีตขยายตัวได้เล็กน้อย ทำให้ช่วยการทดสอบได้บางส่วน

5. อุณหภูมิและความชื้นของตั้งเวลาทดสอบ ตั้งเวลาทดสอบที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการทดสอบแบบแห้งมากขึ้น

6. มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อวินาทรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวนៅองจากการหดตัวแบบแห้ง ได้ง่าย

### 2.3.3 บริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวนៅองจากการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งมักจะเกิดขึ้นให้เห็นตั่งบริเวณผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ บางครั้งถ้าเป็นผนังบางก้ออาจมีรอยแตกขึ้น ไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งได้ ในกรณีของผิวนั้นมักจะเห็นรอยแตกตามขวางหรือตามยาว รอยแตกตามมุมซ่องปีดของหน้าต่างหรือประตูก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของบริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวนៅองจากการหดตัวแบบแห้ง [2]

### 2.3.4 ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวนៅองจากการหดตัวแบบแห้ง

ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวนៅองจากการหดตัวแบบแห้งมักจะเป็นช่วงเวลาที่หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นตันไป รอยแตกร้าวนៅอ้างจะเพิ่มขึ้นไปได้เรื่อยๆ แม้ว่าบุกอนกรีตจะมากจนเป็นปีแล้ว ก็ตาม แต่ส่วนใหญ่แล้วมักจะเริ่มเกิดในช่วง 2-3 เดือนแรกหลังจากสิ้นสุดการบ่ม [2]

## 2.4 เถ้าโลบ (Fly ash)

เถ้าโลบเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตาจึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไม่โกรเมตร) จะถูกดึงประมวล 200 ไมครอน จะลองไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าโลบจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบๆบริเวณ โรงไฟฟ้า เถ้าโลบมีคุณสมบัติเป็นสารป้องโชลน์ใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้

ประเทศไทยมีแหล่งถ่านหินที่สำหรับอยู่หดใหญ่แหล่งใหญ่แก่ที่แม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดลำปาง ที่บ้านปูและบ้านป่าคา อำเภอตี้ จังหวัดลำพูน และที่เมืองกระนี่ บ้านปู จังหวัดกระนี่ โดยเฉพาะที่แม่น้ำมีโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่และเป็นแหล่งผลิตเถ้าโลบที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย

#### 2.4.1 ชนิดของถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 [10] แบ่งถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด

1) ชนิด F (Class F) เป็นถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไชต์ และบิทูมินัสปริมาณพัฒนาของซิลิกา(Silica,  $\text{SiO}_2$ ) อัลูมินา(Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริคออกไซด์(Ferric Oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 – 2.2 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 [11] โดยทั่วไปถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนี้จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ  $\text{SiO}_2$  มาจากแร่คินเนี่ยวและควอตซ์ ถ่านหินแอนตราไชต์และบิทูมินัส มีแรคินเนี่ยวสูงจึงให้ถ้าลอยที่มี  $\text{SiO}_2$  สูง

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [10]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ อย่างต่ำร้อยละ	70.0	70.0	50.0
$\text{SO}_3$ อย่างสูง, ร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI), สูงสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0

หมายเหตุ สารปอชโซลันชนิด N (class N) เป็นสารปอชโซลันธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618 [10]

ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม	ชนิด		
	N	F	C
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า $\text{Na}_2\text{O}$ , ร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ ปริมาณนี้จะใช้ระบุสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีอัลคาไลไม่เกินกำหนด

2) ชนิด C (Class C) เป็นถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าถ้าลอยแคลเซียมสูง

สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำทำให้เต้า洛阳นิค C นอกจากมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำแล้วยังมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำด้วย

ความต่างจำเพาะของเต้าลองสามารถทำการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C188 [4]

ยังที่ประกอบทางเคมีของเต้าลองเป็นอยู่กับของที่ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเต้าลองจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก และ  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  เป็นองค์ประกอบรอง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น และจากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเต้าลองลิกไนต์เม่ามะระระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี, %								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	LOI
2528	12.0	5.9	17.3	39.5	4.6	2.0	0.8	11.5	6.3
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2544	39.9	18.2	13.6	17.2	2.4	1.3	2.7	1.5	0.1

$\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80 – 90 ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเต้าถ่านหิน เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดคุณสมบัติของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ของเต้าลองไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่น้ำไปใช้งานได้

การทดสอบแห่งของปูนซีเมนต์ใช้การวัดการทดสอบตัวของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C596 [13] การทดสอบแห่งของมอร์ตาร์คล่องเนื้อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเต้าลองแม่เม่าเนื่องจากสามารถลดปริมาณน้ำของส่วนผสมและการเพิ่มเต้าลองเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพและความละเอียดของเต้าลองด้วย เต้าลองจะลดความละเอียดสามารถน้ำของมอร์ตาร์ได้ถ้าจะลดลงมากความต้องการน้ำจะกลับเพิ่มขึ้น เต้าลองขยายลงแม้ว่าไม่สามารถน้ำของมอร์ตาร์ได้แต่ถ้าการเพิ่มเต้าลองทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากจะทำให้การทดสอบแห่งของมอร์ตาร์คล่องได้ แต่ถ้าการเพิ่มเต้าลองทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากจะทำให้การทดสอบแห่งของมอร์ตาร์ได้ แต่ถ้าการเพิ่มเต้าลองทำให้การทดสอบแห่งเพิ่มขึ้น [14]

## 2.5 ผงหินปูน (Limestone Powder)

ผงหินปูนเป็นผลผลอยได้จากการย่บหิน สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยปกติแล้วผงหินปูนจะถูกเก็บไว้ในบริเวณแหล่งย่อยหิน และเนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนนี้ขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จึงเป็นขนาดที่ก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้กับแหล่งย่อยหินเหล่านั้น ผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็มหรือหล่อล่อ โดยมีผลกระทบด้านความทันทาน การกัดกร่อนจากเกลือซัลเฟต และผลกระทบด้านกายภาพ เมื่อผสมผงหินปูนลงในคอนกรีต จะทำให้ลดปริมาณซ่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คุณภาพมีเนื้อแน่น จึงส่งผลให้เกลือซัลเฟตซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณนำ้อิสระทั้งหมดที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัวลง ได้ปริมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยน้ำหนักของน้ำอิสระทั้งหมดที่อยู่ภายในคอนกรีตปริมาณผงหินปูนในส่วนผสมในสัดส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์เมื่อเวลาผ่านไป 5 ปี คอนกรีตที่ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และคอนกรีตที่บ่มในอาการจะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำ ในขณะที่ค่าการซึมผ่านของออกซิเจนจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณผงหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น การผสมผงหินปูนในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของคอนกรีตจะไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสมบัติของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ไม่ควรผสมผงปูนเกินกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ [18]

## 2.6 ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

สมนึก ตั้งเติมศิริกุลและคณะ (2538) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพส่วนประกอบทางเคมี เมื่อผสมมอร์ตาร์ที่มีเต้าลอยลิก ในที่จากแม่เมะ 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำกว่ากันถ้าลองจากประเทศปูน จากการเปรียบเทียบพบว่าเต้าลอยลิกในที่จากแม่เมะมีปริมาณ  $\text{CaO}$  และ  $\text{SO}_3$  สูงกว่า และปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ต่ำกว่าเต้าลอยจากญี่ปุ่น ซึ่งเต้าลอยจากแม่เมะสามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C ส่วนเต้าลอยจากญี่ปุ่นเป็นเต้าลอยจาก F ตามมาตรฐาน ASTM ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับเต้าลอยจากประเทศปูนแล้วเต้าลอยจากแม่เมะจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า และมีปริมาณอนุภาคใหญ่กว่า 50 ไมครอนมากกว่า มีปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไออกเรชั่นสูงกว่า (แต่ต่ำกว่ากรณีของตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว) และมีกำลังเท่าๆกันเมื่อทดสอบกำลังเท่าๆกันเมื่อทดสอบโดยมอร์ตาร์ กต่ำวโดยสรุปแล้ว เต้าลอยจากแม่เมะทั้งสองตัวอย่างมีคุณสมบัติที่ดีสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปูรองโซลาร์เซลล์ได้

วิศว จักร ไฟศาด และ ชัย โรจน์ จักร ไฟศาด (2542) ได้ทำการทดสอบหาการหดตัวของมอร์ตาร์ ผสมถ้าลอยแม่เมะ โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 15-35 โดยนำหันกแดดไว้เปรียบเทียบ กับการหดตัวของมอร์ตาร์มาตรฐานที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ ผสมถ้าลอยจะมีการหดตัวมากกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานประมาณร้อยละ 2-10 และเมื่อเพิ่มปริมาณถ้า ลอย การหดตัวจะเพิ่มตัวมากขึ้นประมาณร้อยละ 4 ทุกๆ การแทนที่ร้อยละ 10 ของมอร์ตาร์ท่ออายุ 28 วัน และการหดตัวจะเพิ่มมากขึ้นอย่างมากเมื่อมอร์ตาร์มีอายุน้อยกว่า 7 วัน หลังจากนั้นจะถึงอายุ 28 วัน ค่าการหดตัวจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยอย่างประมาณร้อยละ 5 ผลของการหดตัวที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าลอยซึ่งจะเป็นการเพิ่มนุภาคละเอียดในแพสต์และถ้าลอยในมอร์ตาร์ จะทำปฏิกิริยาปอซิโซลานนิกท่าให้เนื้อมอร์ตาร์แน่นขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแพสต์ต่อปริมาตรห้องหมุด ของมอร์ตาร์เพิ่มมากขึ้น การหดตัวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ไกรฤทธิ์ เกียรติโภุม และคณะ (2540) ได้ทำการทดสอบหาระยะเวลา ก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ของซีเมนต์ที่ผสมถ้าลอยแม่เมะ ในปริมาณร้อยละ 15 25 และ 35 โดยนำหันก พบว่า มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นนานกว่าซีเมนต์แพสต์ที่ไม่ได้ผสมถ้าลอยและในกรณีที่ซีเมนต์ที่มี ปริมาณถ้าลอยที่แทนที่โดยปูนซีเมนต์เท่ากันระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นจะเป็นกับความละเอียดของ ถ้าลอย โดยเมื่อใช้ถ้าลอยที่หยานที่สุดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จะให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ใกล้เคียงกับซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมถ้าลอยและเมื่อความละเอียดของถ้าลอยเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลา การก่อตัวเริ่มต้นมากกว่าซีเมนต์แพสต์ที่ไม่ได้ผสมถ้าลอยและเมื่อเพิ่มปริมาณของถ้าลอยเป็นร้อยละ 25 หรือ 35 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของระยะเวลาการ ก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) ของซีเมนต์แพสต์ที่ผสมถ้าลอยก็ให้ระยะเวลานานกว่า ซีเมนต์แพสต์ล้วนๆ ด้วยเห็นกัน ยกเว้นบางค่าซึ่งเมื่อใช้ถ้าลอยที่มีความละเอียดหยานที่สุด และความ ละเอียดที่กำกับจะแรงกว่า 200 ในปริมาณร้อยละ 15 จะให้ค่าการก่อตัวระยะปลายน้อยกว่า ซีเมนต์แพสต์ล้วน

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินโครงการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับ การศึกษาการทดสอบแบบแบ่งของคอนกรีต โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา, ขั้นตอนการทดสอบคอนกรีต และ ขั้นตอนการทดสอบต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

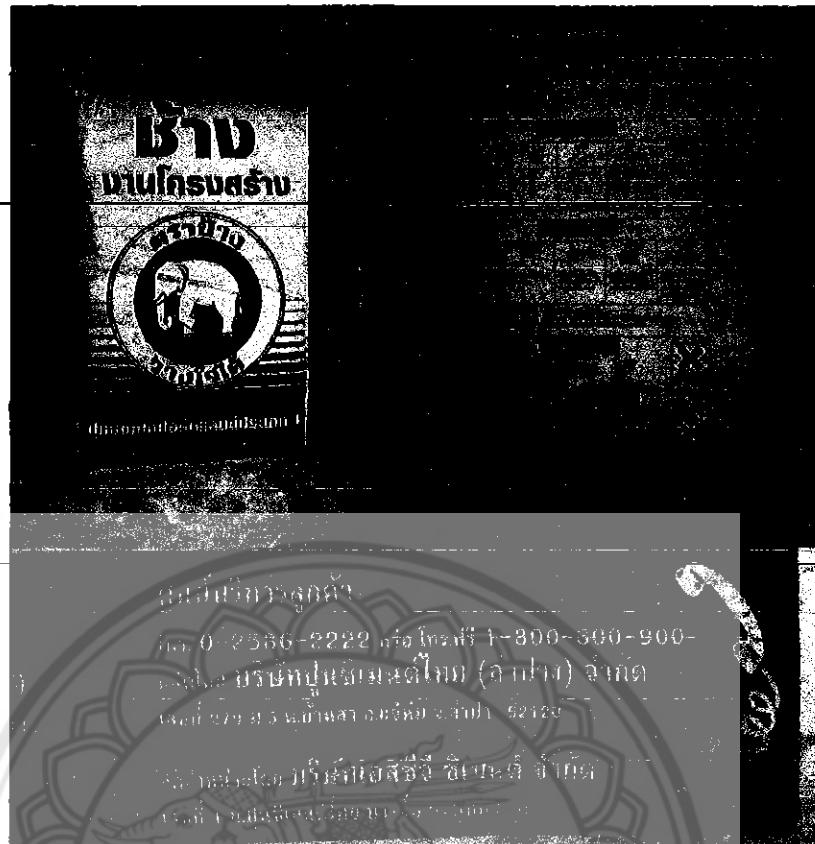
##### 3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) ผลิตโดย บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม 15-2532 หน่วยน้ำ / 1 ถุง 50 กิโลกรัม โดยมีองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปแสดง ดังตารางที่ 3.1

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต มี รายละเอียด โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C188 [4] ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ทดสอบมีค่า 3.13 (ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ [1, 3]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์
CaO	60 - 67
SiO <sub>2</sub>	17 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 - 6.0
MgO	0.1 - 5.5
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0.5 - 1.3
TiO <sub>2</sub>	0.1 - 0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1 - 0.2
SO <sub>3</sub>	1 - 3



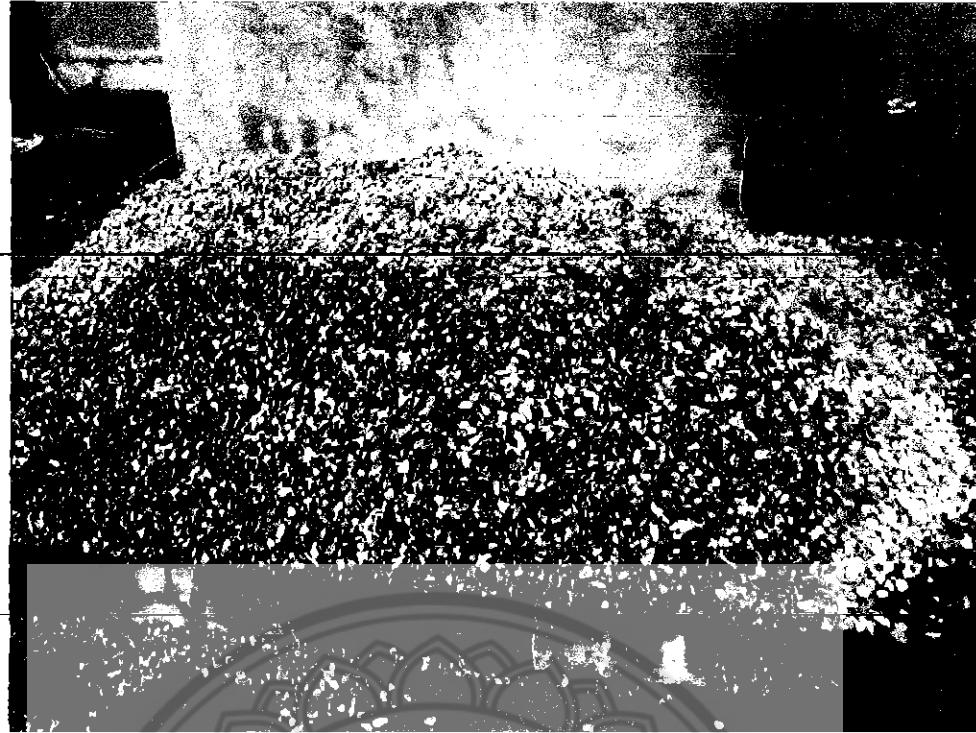
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ทแลนด์ประเภทที่ 1

### 3.1.2 มวลรวมหยาบ

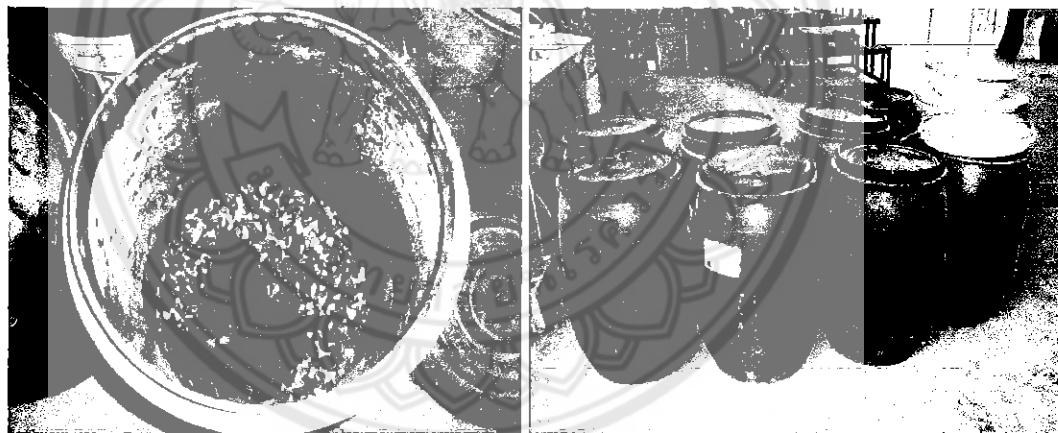
มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ คือ หินปูน (Limestone) ตั้งแสดงในรูปที่ 3.2 ที่แหล่งผลิตอยู่ที่ อำเภอคลองแ سنขัน จังหวัดอุตรดิตถ์ ขนาดトイสุดของหินที่ใช้เท่ากับ 3/4 นิ้ว

ในการเตรียมมวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ จะเริ่มจากการนำหินมาล้างด้วยน้ำสะอาด และผึ่งแดดให้อบยื่นในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง แล้วนำมาล้อมหยาบนาเก็บไว้ในถังพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นและผุนละลายดังรูปที่ 3.3

วิธีการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C127 [5] จากการทดสอบพบว่ามวลรวมหยาบที่ใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 2.764 ร้อยละการดูดซึมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.539 และมีค่าหน่วยวัสดุหนักของหินมีค่าเท่ากับ 1566.9 กก./ลบ.ม(ภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.2 มวลรวมหมายที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.3 การจัดเก็บมวลรวมหมายเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

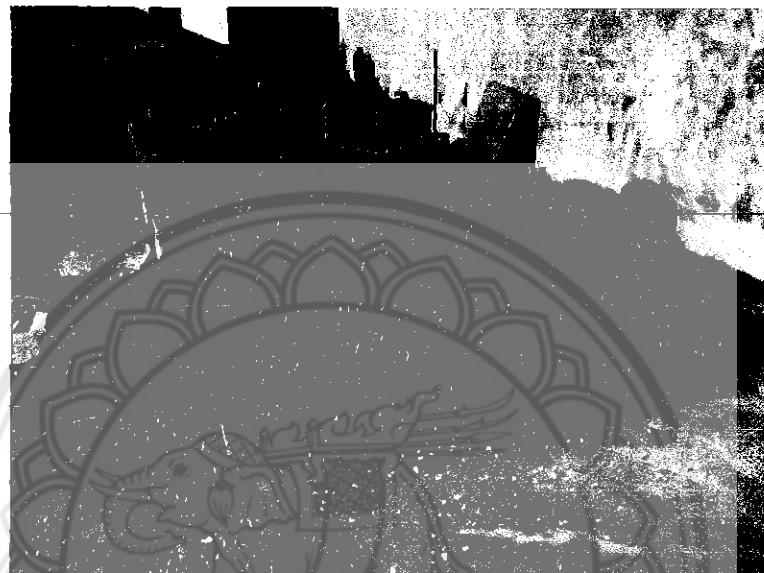
### 3.1.3 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ คือ ทรายแม่น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยมีแหล่งผลิตอยู่ที่อุปกรณ์ทางระกำ จังหวัดพิษณุโลก

การเตรียมทรายที่จะใช้ในการทดสอบนั้น จะต้องทำความสะอาดทรายก่อน แล้วนำทรายที่มีสภาพเปียกไปตากแดดให้มีความชื้นอยู่ที่ 1ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำทรายที่จะใช้ในการ

ทดสอบเอาไปเก็บไว้ในถังพลาสติก ปิดฝาให้แน่น เพื่อบริโภคกันผู้นับถือของและการสูญเสียความชื้น ดังรูปที่ 3.5

วิธีการหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละอียด โดยยังคงตาม มาตรฐาน ASTM C128 [6] และ มาตรฐาน ASTM C29 [7] ตามลำดับ มวลรวมละอียดที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอุ่นตัววิวัฒนาแลกเปลี่ยนเท่ากับ 2.606 ร้อยละการคูณเป็นผลลัพธ์เท่ากับ 0.794 และมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 166.70 กก./ลบ.ม (ภาคผนวก ก)

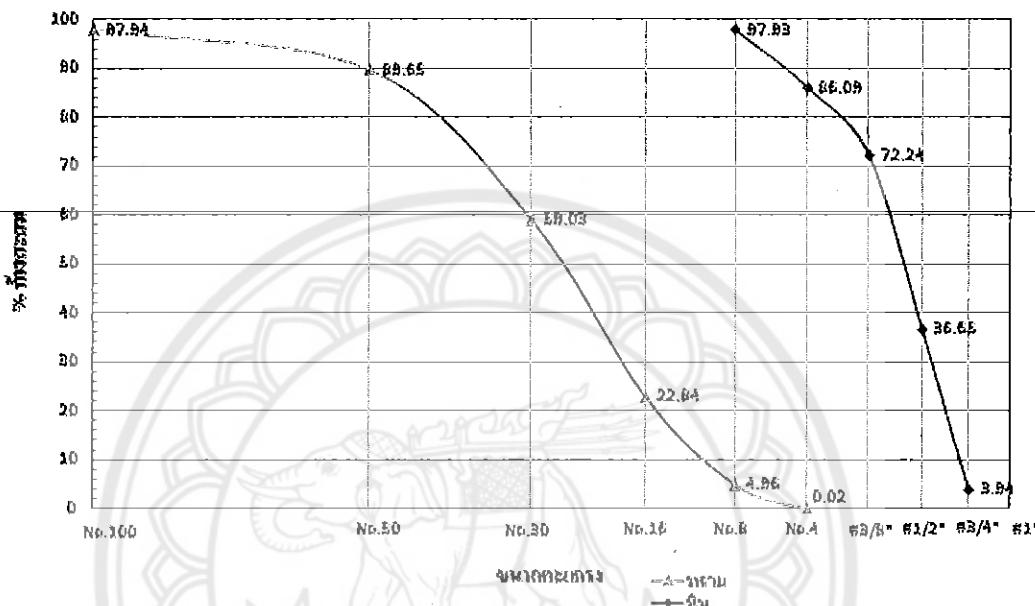


รูปที่ 3.4 มวลรวมละอียดที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.5 การเก็บมวลรวมละอียดที่ในการทดสอบ

ในการหานานาคคละของหินและทรายที่ใช้ในการทดสอบอั่งจิงตามมาตรฐาน ASTM C 136 [8] และ ASTM C 33 [9] ซึ่งเป็นการทดสอบที่เรียกว่า การวิเคราะห์ห้าส่วนของนาคคละของมวลรวมด้วยตะแกรง (Gradation of Aggregates by Sieve Analysis) การทดสอบคำนวณการโดยร่อนหินหรือทราย ผ่านตะแกรงมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยม แล้วใช้ตะแกรงมาตรฐานขนาด  $1/2"$   $3/4"$   $3/8"$  และเบอร์ 4 สำหรับการทดสอบหิน และใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 8 16 30 50 และ 100 สำหรับทดสอบทราย ซึ่งมีผลที่ได้จากการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงกราฟส่วนของนาคคละของมวลรวมหินและมวลรวมละเอียด

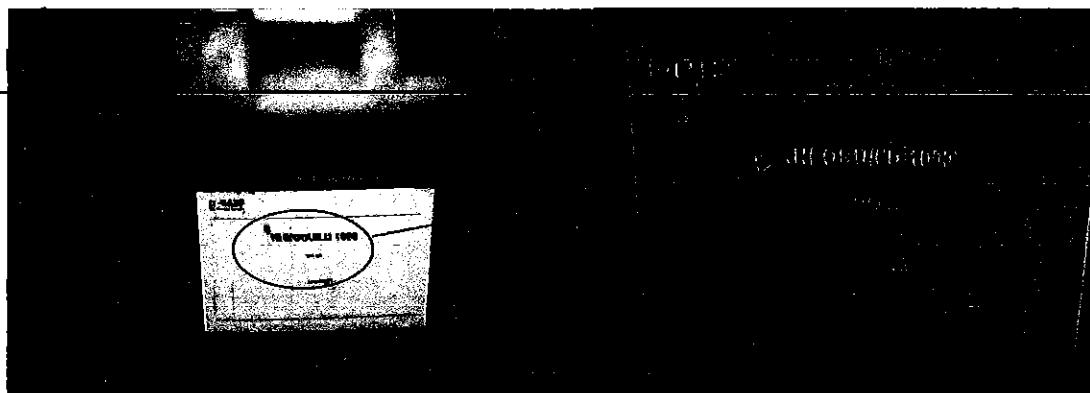
### 3.1.4 สารผสมเพิ่ม

จากการทดลองผสมคอนกรีตในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่น้อยในเบื้องต้น พบว่า คอนกรีตมีความขึ้นเหตุวน้อบมาก ซึ่งสร้างปัญหาต่อการทำงานหรือการเทลงในแบบหล่อ ดังนั้น จึงทำให้ต้องมีการใช้สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอ่าย่างแรง(Superplasticiser) ซึ่งสารผสมนี้จะทำให้ค่าการบูร์ตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสม สารผสมเพิ่มที่ใช้ในการทดสอบคือ RHEOBUILD 1000 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 สารผสมเพิ่มดังกล่าวนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท BASF Construction Chemicals Thailand Pty Ltd.

สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้จะต้องไม่ส่งผลเสียต่อส่วนผสม อันได้แก่ การส่งผลต่อการหน่วงการก่อตัวของคอนกรีต หรือก่อให้เกิดการแยกตัวของส่วนผสม

ปริมาณการใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอ่าย่างแรงนี้ในแต่ละส่วนผสมจะใส่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าการบูร์ตัวของคอนกรีตประมาณ 7.5-12.5 เชนติเมตร ซึ่งถ้าค่าการบูร์ตัวมีค่ามากกว่า 12.5 เชนติเมตร จะไม่ใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอ่ายางแรงและในทางกลับกันถ้าค่าการบูร์ตัว

มีค่าห้องกว่า 7.5 เซนติเมตร ต้องทำการทดสอบกอนกรีทใหม่ โดยการใส่สารพสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอ่าย่างแรง เพื่อให้ค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 7.5-12.5 เซนติเมตร



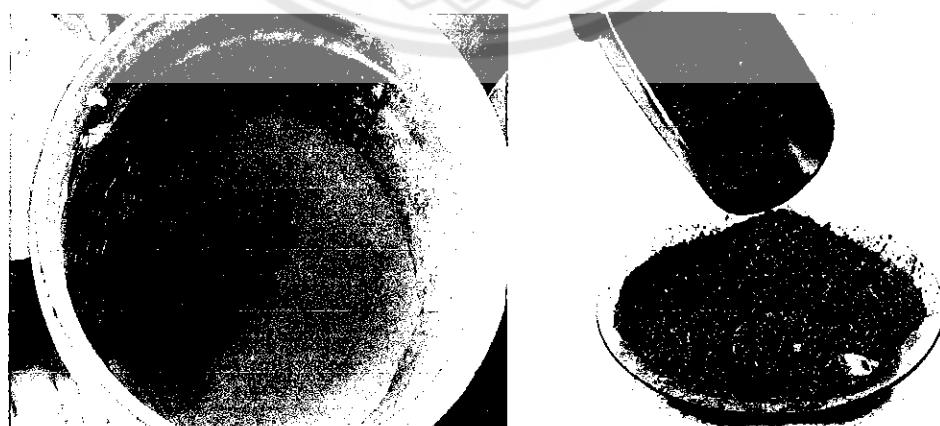
รูปที่ 3.7 สารพสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอ่าย่างแรง RHEOBUILD – 1000

### 3.1.5 เถ้าโลย (Fly ash)

เถ้าโลยที่นำมาทดสอบเป็นเถ้าโลยชนิด C มีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองเนื่องจากมีปริมาณ CaO สูง เถ้าโลยแม่เมะในระบบแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าโลยแคลเซียมสูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้าโลยแม่เมะมีปริมาณ CaO ต่ำลง โดยมีสารน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 10

ความถ่วงจำพวก ของเถ้าโลยสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ โดยใช้ชั่งอิงตามมาตรฐาน ASTM C188 [4]

เถ้าโลยที่นำมาใช้ทดสอบในโครงงานวิศวกรรมเป็นเถ้าโลยที่นำมาจาก โรงไฟฟ้าแม่เมะ กำเกอแม่เมะ จังหวัดลำปาง สามารถหาค่าความถ่วงจำพวกเฉลี่ยได้เท่ากับ 2.678 (ภาคผนวก ก)



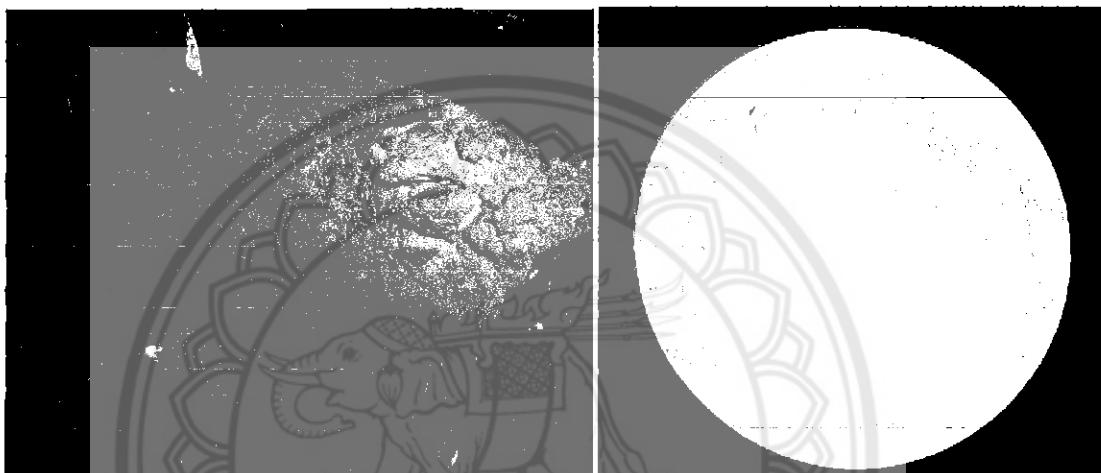
รูปที่ 3.8 เถ้าโลย (Fly Ash)

### 3.1.6 ผงหินปูนละเอียด (Limestone Powder)

ผงหินปูนละเอียด (Limestone Powder หรือ Calcium Carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) ที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้มีขนาด 5 และ 8 ไมครอน

ผงหินปูนละเอียด ที่นำมาใช้ทดสอบในโครงการวิศวกรรมเป็นผงหินปูนละเอียดที่นำมาจาก บริษัทสุรินทร์ อ่อนยา เคมีคอล ประเทศไทย

ความถ่วงจำเพาะของผงหินปูนละเอียด หาได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของผงหินปูนละเอียด ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2.621 และ 2.688 โดยผงหินปูนขนาด 5 ไมครอนและ 8 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 ผงหินปูนละเอียด (Limestone Powder)

## 3.2 วัสดุอุปกรณ์และการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบของการทดสอบของคอนกรีต เพื่อทำการทดสอบคอนกรีต หลังการทดสอบคอนกรีตเสร็จ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การเตรียมส่วนทดสอบคอนกรีต แบบมีน้ำยาทดสอบคอนกรีต และการเตรียมตัวอย่างส่วนทดสอบคอนกรีตแบบไม่ใส่น้ำยาทดสอบคอนกรีต

### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบหากำไรมาณน้ำยาทดสอบคอนกรีตที่เหมาะสม

เนื่องจากส่วนทดสอบบางส่วน มีอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานน้อย ทำให้ค่าการบุบตัวของคอนกรีตมีอ้อห ดังนั้นจึงต้องมีการใส่น้ำยาทดสอบคอนกรีตเพื่อให้ได้ค่าการบุบตัวที่เหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนการสอนดังนี้

- 1). กำหนดอัตราส่วนทดสอบที่ต้องการหากำไรมาณน้ำยาทดสอบคอนกรีตที่เหมาะสม ดังตารางที่ 3.2
- 2). เตรียมส่วนทดสอบในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หินขนาด  $3/4$  นิ้ว รายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง และน้ำสะอาด (รูปที่ 3.21 – 3.22)

- 3). นำทรายและหินใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีตชนิดรูป จากนั้นนำปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ค่อยๆใส่ลงไปในเครื่องผสมตามลำดับ และทำการผสมแห้งประมาณ 2 นาที (รูปที่ 3.23)
- 4). นำน้ำที่เตรียมไว้ค่อยๆใส่ลงไปในเครื่องผสมโดยการแบ่งน้ำออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนแรกเป็นน้ำและส่วนที่สองเป็นน้ำยาผสมคอนกรีต ซึ่งการใส่น้ำหรือน้ำยาผสมน้ำยาผสมคอนกรีตพยายามใส่ให้น้ำกระชาญให้หัวในวัสดุผสม และทำการผสมเป็นคราวประมาณ 2-3 นาที
- 5). เมื่อทำการผสมคอนกรีตเสร็จแล้ว นำเอาคอนกรีตสอดมาทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต ซึ่งให้ค่าอยู่ระหว่าง 7.5 - 12.5 เซนติเมตร จากนั้นทดสอบหาค่าปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต (รูปที่ 3.24 – 3.25)
- 6). เทคอนกรีตลงในแบบหล่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (รูปที่ 3.14) และทรงกระบอก (รูปที่ 3.15) แล้วนำไปวางบนเครื่องสั่นคอนกรีต ทำการสั่นประมาณ 10 วินาที แล้วนำไปเก็บในที่ร่มที่ขัดเจริญไว้ และปิดริเวณผิวน้ำของคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แกะคอนกรีตออกจากแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำ (รูปที่ 3.26 – 3.29)
- 7). บันทึกค่าปริมาณน้ำยาผสมคอนกรีตที่เหมาะสมและค่าปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต
- 8). ทำขั้นตอนเด้อข้อ 1 – 7 จนครบทั้ง 12 ชุดทดสอบ ซึ่งได้ค่าสรุปดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมที่ต้องการหาค่าปริมาณสารละน้ำที่เหมาะสมและค่าปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต

อัตราส่วน	ค่าการยุบตัว (cm.)	Air content (%)	น้ำยาผสมคอนกรีต (%)
g1.1w35r0	8.5	2	2.2
g1.1w55r0	7.5	1.5	0.75
g1.2w35r0	9	2.1	2.2
g1.2w55r0	9.5	1.5	1.5
g1.3w35r0	9	2.5	1.8
g1.3w55r0	10.5	1.4	1
g1.4w25r0	11.5	2.1	5
g1.4w55r0	10.5	1.3	-
g1.4w65r0	14.5	0.7	-
g1.4w75r0	19.5	0.6	-
g1.5w35r0	9	2.1	1.2
g1.5w55r0	19	0.9	-

### 3.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบคุณกรีตสำหรับทดสอบการทดสอบคุณกรีต

จากตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนผู้สมัครคุณกรีตที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างการทดสอบการทดสอบคุณกรีตแบบแห้งของคุณกรีต

1). เตรียมส่วนผู้สมัครส่วนที่กำหนด (รูปที่ 3.21 – 3.22) โดยใช้ปุ่มซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำอะစาด น้ำยาผู้สมัครคุณกรีต หินและทรัพย์ที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

2). นำทรัพย์และหินใส่ลงในเครื่องผู้สมัครคุณกรีตชนิดราบ จากนั้นนำปุ่มซีเมนต์ที่เตรียมไว้ค่อยๆ ใส่ลงไปในเครื่องผู้สมัครคุณกรีต แล้วทำการผสานแห้งประมาณ 2 นาที (รูปที่ 3.23)

3). การใส่น้ำลงในเครื่องผู้สมัครคุณกรีตชนิดราบเพื่อทำการผสานเปียกมืออยู่ 2 ถักจะขณะที่

#### -ส่วนผู้สมัครคุณกรีตที่มีการใส่น้ำยาผู้สมัครคุณกรีต

นำน้ำที่เตรียมไว้ค่อยๆ ใส่ลงไปในเครื่องผู้สมัครคุณกรีตโดยการแบ่งน้ำออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน ส่วนแรกเป็นน้ำและส่วนที่สองเป็นน้ำยาผู้สมัครคุณกรีต ซึ่งการใส่น้ำห้องน้ำผู้สมัครคุณกรีต จะต้องพยาบาลใส่ให้น้ำกระจายให้ทั่วในวัสดุผสาน และทำการผสานเปียกประมาณ 2 -3 นาที

#### -ส่วนผู้สมัครคุณกรีตที่ไม่ใส่น้ำยาผู้สมัครคุณกรีต

นำน้ำที่เตรียมไว้ค่อยๆ ใส่ลงไปในเครื่องผู้สมัครคุณกรีตโดยการแบ่งน้ำออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน ซึ่งการใส่น้ำ จะต้องพยาบาลใส่ให้น้ำกระจายให้ทั่วในวัสดุผสาน และทำการผสานเปียกประมาณ 2-3 นาที

4). เมื่อทำการผสานคุณกรีตเสร็จแล้ว นำเอาคุณกรีตตามหาค่าการบุนคุณกรีต ค่าปริมาณฟองอากาศในคุณกรีต จากนั้นทดสอบหาค่าปริมาณฟองอากาศในคุณกรีต (รูปที่ 3.24 – 3.25)

5). เทคุณกรีตลงในแบบหล่อรูปสีเหลืองผึ้งผ้า (รูปที่ 3.14) และรูปทรงกระบอก (รูปที่ 3.14) แล้วนำไปวางบนเครื่องสั่นคุณกรีต ทำการสั่นประมาณ 10 วินาที แล้วนำไปเก็บในที่ร่มที่จัดเตรียมไว้ และปิดบริเวณผิวน้ำของคุณกรีตด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แกะคุณกรีตออกจากแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำ 7 วัน และทำการหาค่าการทดสอบคุณกรีตและกำลังอัดของคุณกรีตต่อไป (รูปที่ 3.26 – 3.29)

6). ทำข้อต่อข้อ 1 – 5 จนครบตามอัตราส่วนผู้สมัครคุณกรีตสำหรับการทดสอบการทดสอบคุณกรีตแบบแห้งดังแสดงในตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงสัดส่วนผิวหน้าท่อหดสูบคอนกรีตสำหรับการหดหดตัวของ  
คอนกรีตแบบแห้ง**

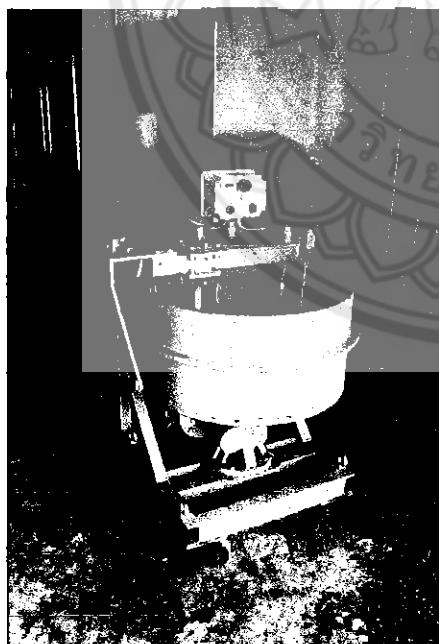
อัตราส่วน ผิวหน้า	จำนวน ท่อหด	ชิ้นหนึ่ง	น้ำ	สาร ผิวหน้า	ทราย	หิน	เดือย	ผง หินปูน	ค่า การ ยุบตัว (kg.)	Air content (%)
(litr)	(kg.)	(kg.)	(kg.)	(kg.)	(kg.)	(kg.)	(kg.)	(kg.)		
g1.2w55r0	15	4.743	2.339	0.000	11.997	17.394	0.000	0.000	9.0	-
g1.4w25r0	13	6.813	1.390	0.341	8.865	12.987	0.000	0.000	7.2	2.1
g1.4w35r0	13	6.278	2.023	0.094	9.604	14.070	0.000	0.000	7.5	-
g1.4w35r30	15	4.215	1.838	0.000	11.997	17.394	1.806	0.000	12.5	-
g1.4w35r50	15	4.949	2.338	0.000	11.082	16.234	2.121	0.000	9.0	-
g1.4w45r0	13	5.462	2.307	0.055	9.604	14.070	0.000	0.000	9.7	-
g1.4w55r0	21	7.809	4.104	0.000	15.515	22.728	0.000	0.000	10.0	1.3
g1.4w55r0 (หิน 3/8")	22	8.181	4.300	0.000	16.253	23.810	0.000	0.000	12.5	2.60
g1.4w55r0 (หิน 1")	22	8.181	4.300	0.000	16.253	23.810	0.000	0.000	12.0	1.30
g1.4w55r0 (s/a 0.36)	30	13.154	6.802	0.066	17.498	32.660	0.000	0.000	9.0	1.00
g1.4w55r0 (s/a 0.48)	30	11.473	5.744	0.000	25.206	28.669	0.000	0.000	11.0	2.05
g1.4w55r10	22	7.316	4.102	0.000	16.422	23.810	0.813	0.000	14.5	1.10
g1.4w55r20	22	6.463	4.074	0.000	16.422	23.810	1.616	0.000	16.5	0.90
g1.4w55r30	15	3.832	2.874	0.000	11.082	16.234	1.642	0.000	10.5	-
g1.4w55r40	15	3.264	2.856	0.000	11.082	16.234	2.176	0.000	11.0	-
g1.4w55r50	15	2.703	2.837	0.000	11.082	16.234	2.703	0.000	11.5	-
g1.4w55r60	15	2.150	2.819	0.000	11.082	16.234	3.224	0.000	13.0	-
g1.4w55r10LP (5 micron)	15	4.984	2.557	0.000	11.433	16.243	0.000	0.550	11.0	-
g1.4w55r20LP (5 micron)	15	4.398	2.535	0.000	11.433	16.234	0.000	1.100	8.5	-

อัตราส่วน ผงกับ น้ำ	จำนวน ที่ผสม (ลิตร)	ชิ้นเนนต์ (kg.)	น้ำ (kg.)	ผง เพิ่ม (kg.)	ท่วาย (kg.)	หิน (kg.)	เต้า ออกย (kg.)	ผง หินปูน (kg.)	ค่า การ ยุบตัว (kg.)	Air content (%)
g1.4w55r10LP (8 micron)	15	4.989	2.561	0.000	11.433	16.234	0.000	0.550	10.0	-
g1.4w55r20LP (8 micron)	15	4.408	2.542	0.000	11.433	16.234	0.000	1.100	8.0	-
g1.4w65r0	15	5.003	3.115	0.000	11.082	16.234	0.000	0.000	14.5	0.9
g1.4w65r30	21	4.820	4.285	0.000	15.515	22.728	2.066	0.000	20.0	0.30
g1.4w65r50	15	2.432	3.025	0.000	11.082	16.234	2.432	0.000	17.0	-
g1.4w80r0	15	4.332	3.329	0.000	11.082	16.234	0.000	0.000	17.0	0.5
g1.4w80r30	18	3.586	3.935	0.000	13.298	19.481	1.537	0.000	-	-
g1.4w80r50	18	2.537	3.895	0.000	13.298	19.481	2.537	0.000	20.5	0.20

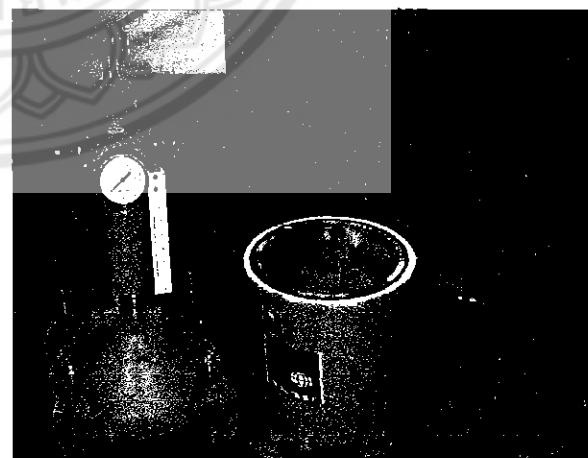
หมายเหตุ g = ปริมาณเชิงเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวม

w = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

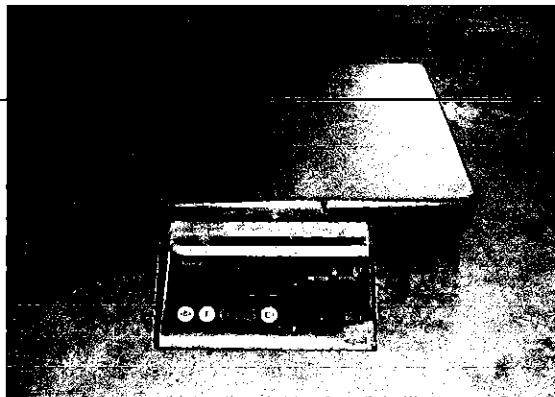
r = อัตราส่วนการแทนที่เชิงเมนต์



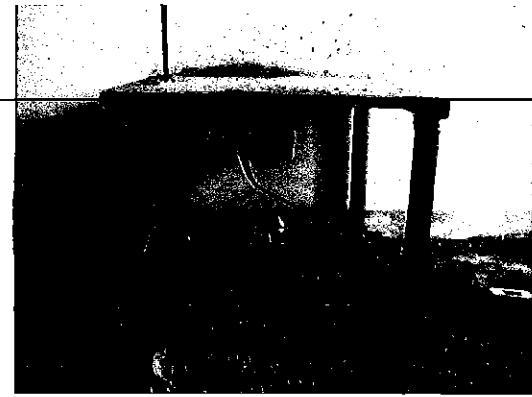
รูปที่ 3.10 เครื่องผสมคอนกรีตแบบร้าบ  
ขนาดความจุ 56 ลิตร



รูปที่ 3.11 ชุดเครื่องมือทดสอบปริมาณ  
ฟองอากาศ



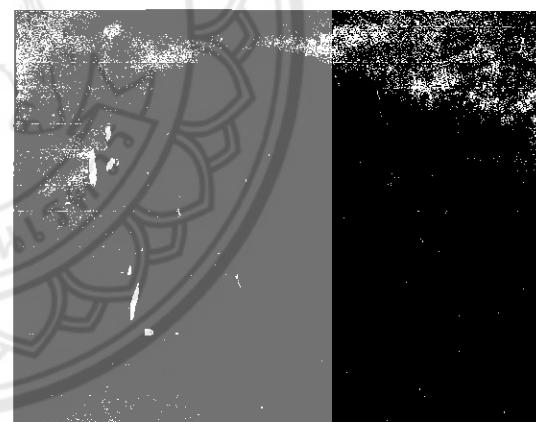
รูปที่ 3.12 เครื่องซั่งน้ำหนัก



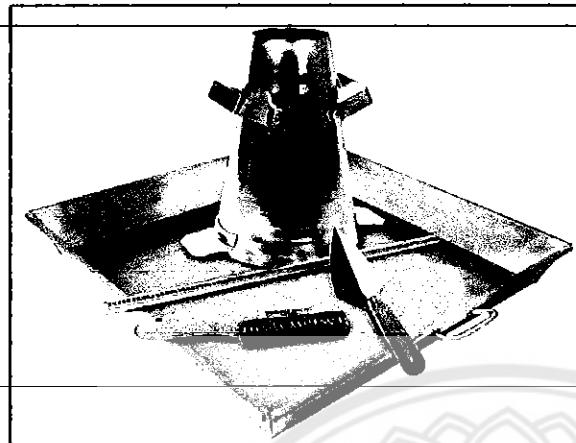
รูปที่ 3.13 เครื่องสั่นคอนกรีต



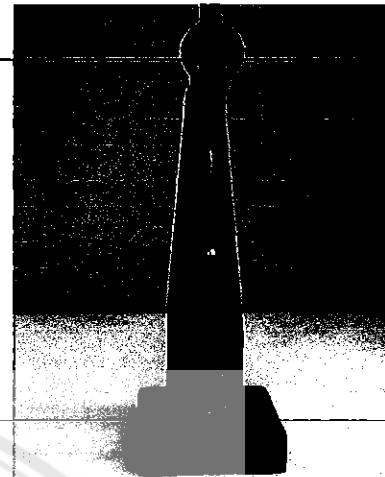
รูปที่ 3.14 แบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยม  
ขนาด ( $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  เซนติเมตร)



รูปที่ 3.15 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติ-  
เมตร สูง 20 เซนติเมตร



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ชุดทดสอบการขับตัว  
ของคอนกรีต

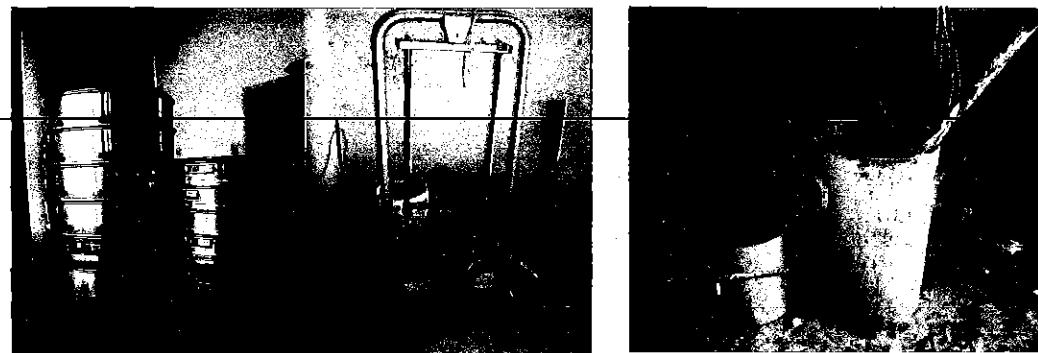


รูปที่ 3.17 ชุดทดสอบการเปลี่ยนแปลงความ  
ยาว (Length Comparator)



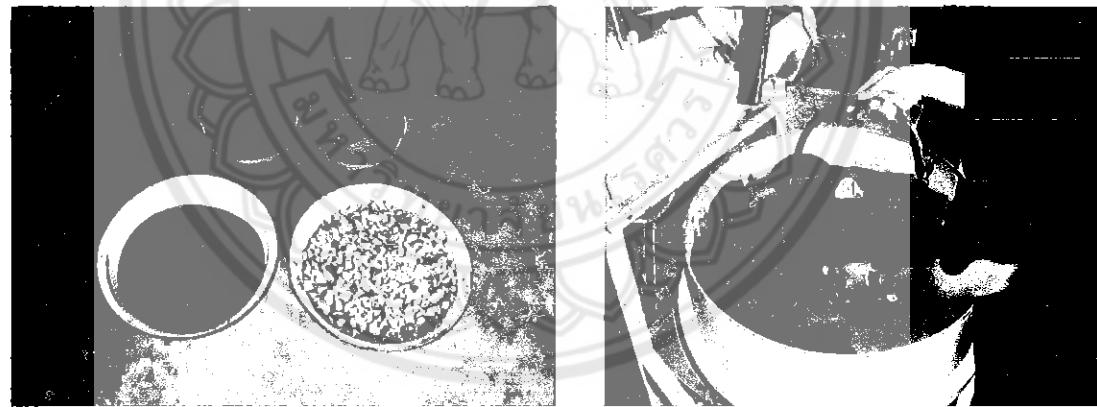
รูปที่ 3.18 ชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

๑๗๐๗๐๒๓๕ ๒.๒



รูปที่ 3.19 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาส่วนของนาคคละของ  
น้ำรวมท้ายและมวลรวมตะเข็บ

รูปที่ 3.20 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหา  
ค่าความอัดแน่น



รูปที่ 3.21 การเตรียมวัสดุทดสอบ

รูปที่ 3.22 การเคลือบเครื่องผสม กอนกรีต  
แบบรากศ์วิชีเมเนต์เพสต์



รูปที่ 3.23 การผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.24 การหาค่าการบุนตัว



รูปที่ 3.25 การหาค่าปริมาณ  
พองอากาศ

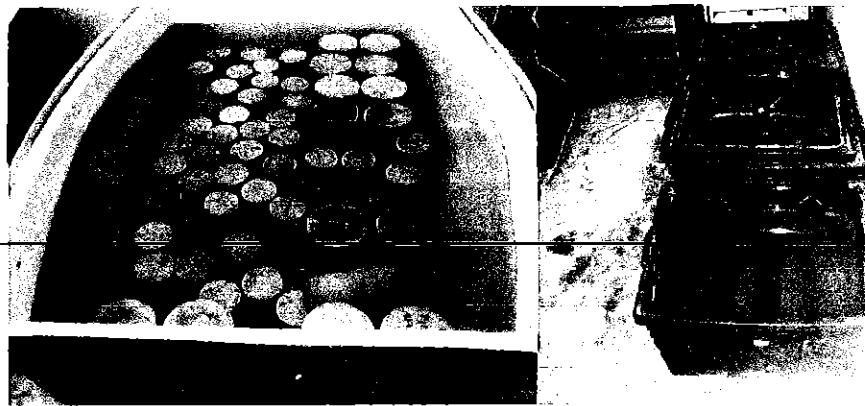


รูปที่ 3.26 การสั่นคอนกรีต

รูปที่ 3.27 การปิดหน้าผิวคอนกรีต



รูปที่ 3.28 การดัดแปลงหล่อคอนกรีต



รูปที่ 3.29 การบ่มคอนกรีตในน้ำสะอาด

### 3.3 การทดสอบการวัดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

การหาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การวัดค่าการหดตัวของคอนกรีตขณะบ่มอยู่ในน้ำ และการวัดค่าการหดตัวของคอนกรีตหลังจากอุ่นในช่วงหลังการบ่มน้ำ ใน การวัดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 490-00a

#### 3.3.1 การวัดค่าการหดตัวของคอนกรีต (บ่มในน้ำ 7 วัน)

หลังจาก ถอดแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตแล้ว นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตสูปสีเหลืองสีน้ำเงินบ่มน้ำในบ่มน้ำจากนั้น ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวและการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ตามระยะเวลาที่กำหนดในการทดสอบ

1). จับนับที่ก่อค่าอุณหภูมิและความชื้นทุกรรัง ก่อนเข้าห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (รูปที่ 3.30)

2). ทำการวัดแห่งเหล็กอ้างอิง (Reference Bar) ของเครื่องมือที่ใช้พิจารณาความยาวที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง (Length Comparator) แล้วจดบันทึกค่าความยาวอ้างอิงเริ่มต้น (รูปที่ 3.31)

3). นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตซึ่งจากน้ำ ใช้ผ้าแห้งเช็ดก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้อุ่นในรูปสภาพอื่นตัวผิวแห้งจากน้ำ ก้อนคอนกรีตไปวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว โดยใช้เครื่องวัดความเปลี่ยนแปลงความยาว (Length Comparator) จดบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (รูปที่ 3.32 - 3.34)

4). นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปชั่งน้ำหนัก แล้วจดบันทึกค่า (รูปที่ 3.35)

5). นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำ และทำการวัดค่าต่อไปในวันที่ 1, 3, 5 และ 7

6). ทำการวัดค่าต่างๆ ตามข้อที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับไปเรื่อยๆ

หมายเหตุ : หลังจากดัดแปลงคอนกรีตจะทำการบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีตไว้ 30 นาที ก่อนทำการวัดค่าการทดสอบตัวแบบแห้งของคอนกรีต

### 3.4.2 การวัดค่าการทดสอบตัวของคอนกรีต หลังขึ้นจากน้ำภายใน 7 วัน

หลังจากนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตถูปสีเหลี่ยมผืนผ้าขึ้นจากน้ำแล้ว จานนี้ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวและการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ตามระยะเวลาที่กำหนดในการทดลอง

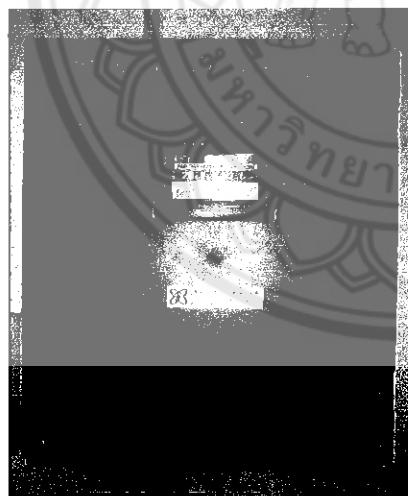
1). จดบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นทุกครั้ง ก่อนเข้าห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (รูปที่ 3.30)

2). ทำการวัดแห่งเหล็กอ้างอิง (Reference Bar) ของเครื่องมือที่ใช้พิจารณาความยาวที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง (Length Comparator) แล้วจดบันทึกค่าความยาวอ้างอิงเริ่มต้น (รูปที่ 3.31)

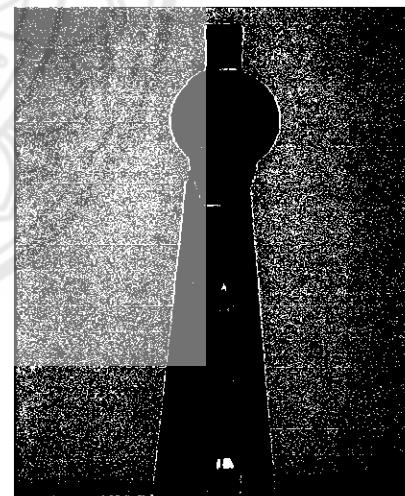
3).นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว โดยใช้เครื่องวัดความเปลี่ยนแปลงความยาว (Length Comparator) ทำการจดบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (รูปที่ 3.33)

4).นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปซั่งน้ำหนักแล้วทำการจดบันทึกค่า และเก็บก้อนตัวอย่างไว้ตัวแทนงวดนี้ (รูปที่ 3.35 และ 3.36)

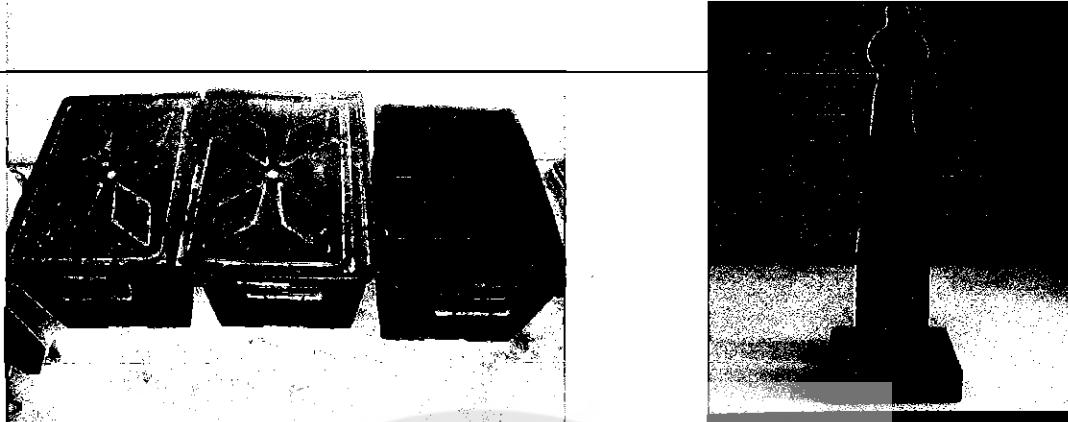
5).ทำการวัดค่าต่างๆ ตามข้อที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 3.30 การจดบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 3.31 ตัวค่าแห่งเหล็กอ้างอิง



รูปที่ 3.32 บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ

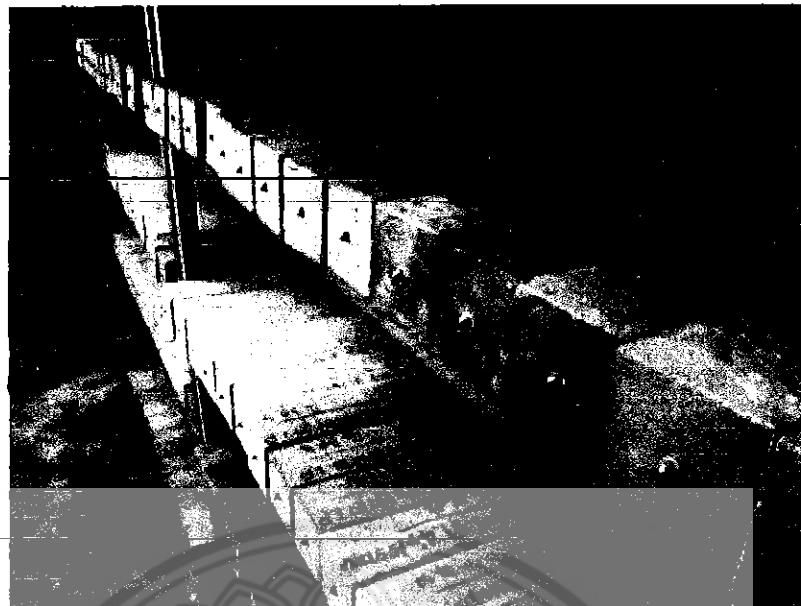
รูปที่ 3.33 วัดค่าการเปลี่ยนแปลง

ความยาวของก้อน  
ตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.34 เช็คก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้ออปู่ใน  
คอนกรีตสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

รูปที่ 3.35 ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง

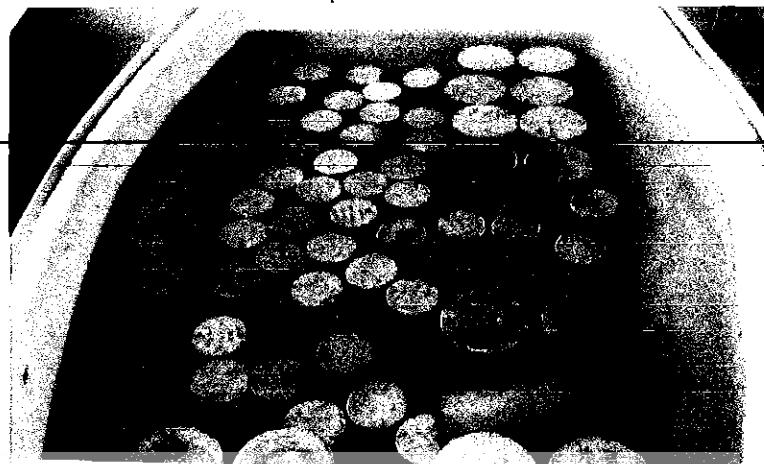


รูปที่ 3.36 ตัวแทนที่เก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต

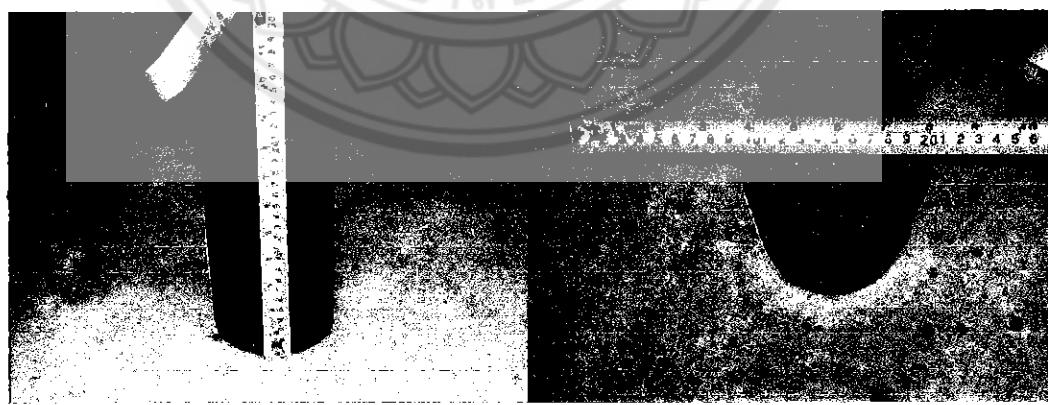
### 3.4 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

เมื่อ บ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ในน้ำครบ 28 วันแล้ว ต่อไปจะการทดสอบ หาค่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M-02

- 1). นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ขึ้นจากน้ำ (รูปที่ 3.37)
- 2). นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ไปวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง แล้วคงบันทึกค่า จากนั้นรอให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกให้แห้ง (รูปที่ 3.38)
- 3).นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ไปชั่งน้ำหนักแล้วคงบันทึกค่า (รูปที่ 3.39)
- 4). นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกไปทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ด้วยเครื่องทดสอบ (Compaction Strength) และคงบันทึกค่ากำลังอัดคอนกรีต (รูปที่ 3.40)



รูปที่ 3.37 เศรีษะก้อนคอนกรีตที่จะทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.38 วัสดุขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูง



รูปที่ 3.39 ชั้นน้ำหนักก้อนตัวอย่าง



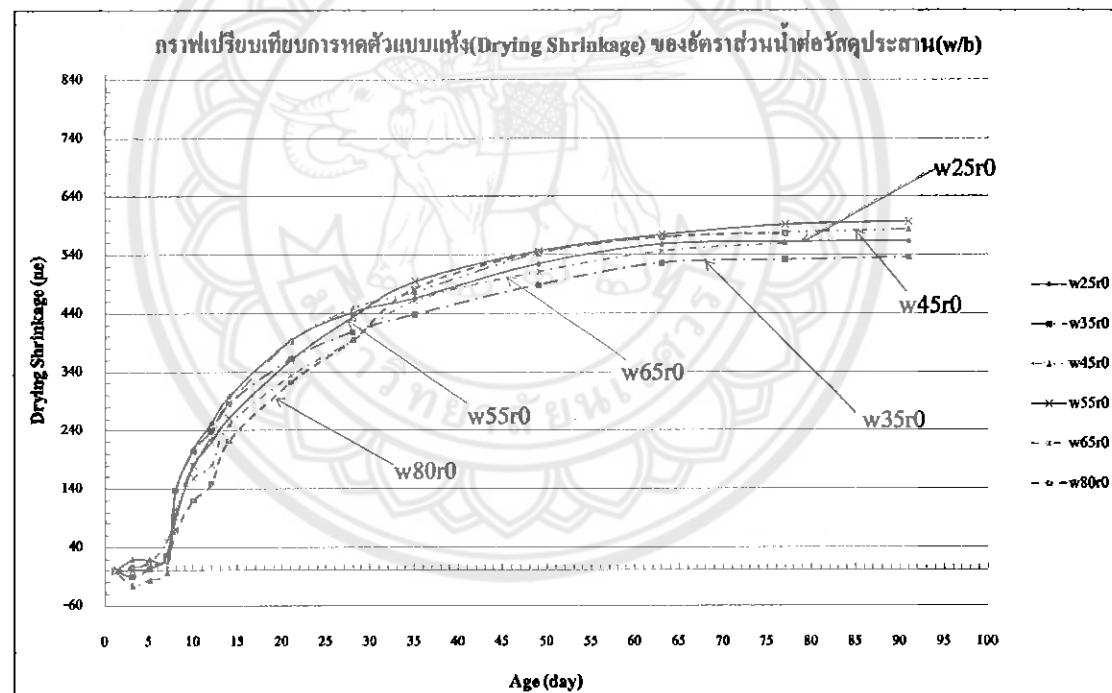
รูปที่ 3.40 ทดสอบกำลังอัดด้วย เครื่อง Compaction Strength

## บทที่ 4

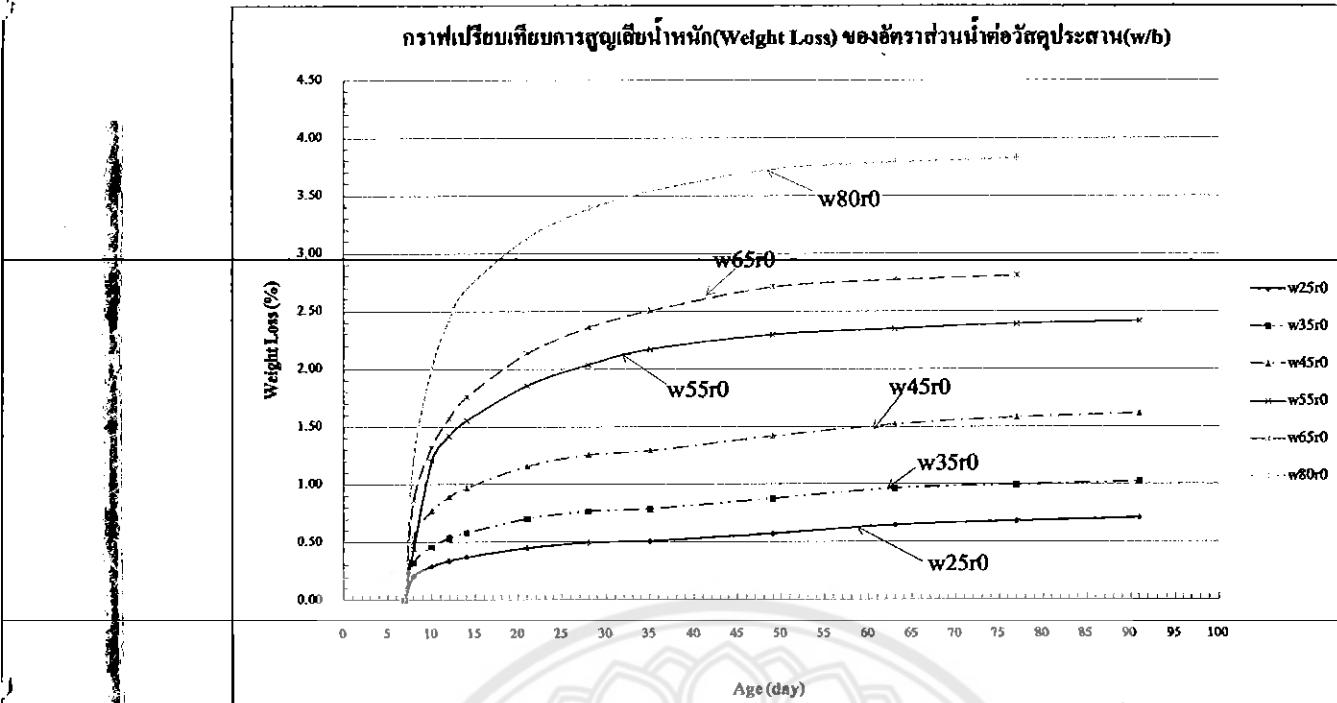
### ผลการทดสอบและวิเคราะห์

**การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ผ่านมา ซึ่งผลการทดสอบและวิเคราะห์ ในบทนี้จะแสดงถึง ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทดสอบตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยแบ่งออกเป็น 6 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, ขนาดของมวลรวมของบาน, ปริมาณมวลรวมและอัตราส่วนทั้งหมด, ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวม, การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเต้าโลย และการที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ละเอี๊บด ซึ่งแต่ละปัจจัยนี้จะมีการทดสอบหาค่าต่างๆ ได้แก่ การทดสอบตัวแบบแห้งของคอนกรีต, การสูญเสียน้ำหนัก และค่ากำลังขัดของคอนกรีต ตามลำดับ**

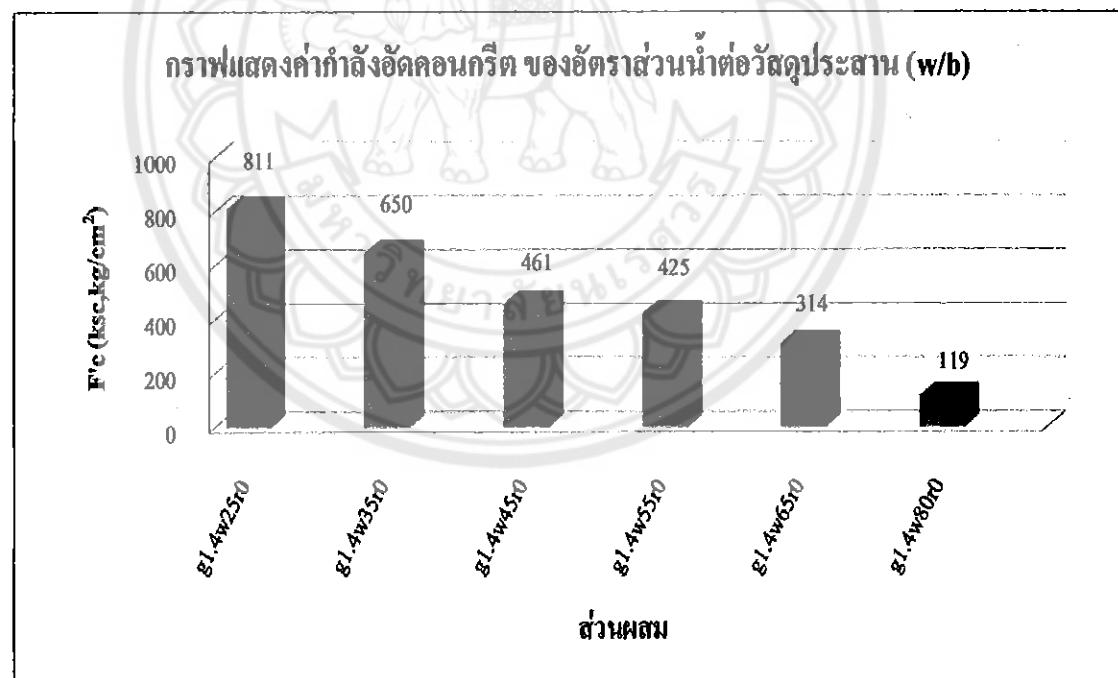
#### 4.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to Binder Ratio)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีต่อค่าการทดสอบตัว ของแห้งทดสอบ คอนกรีต



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนัก ของแท่งทดสอบคอนกรีต

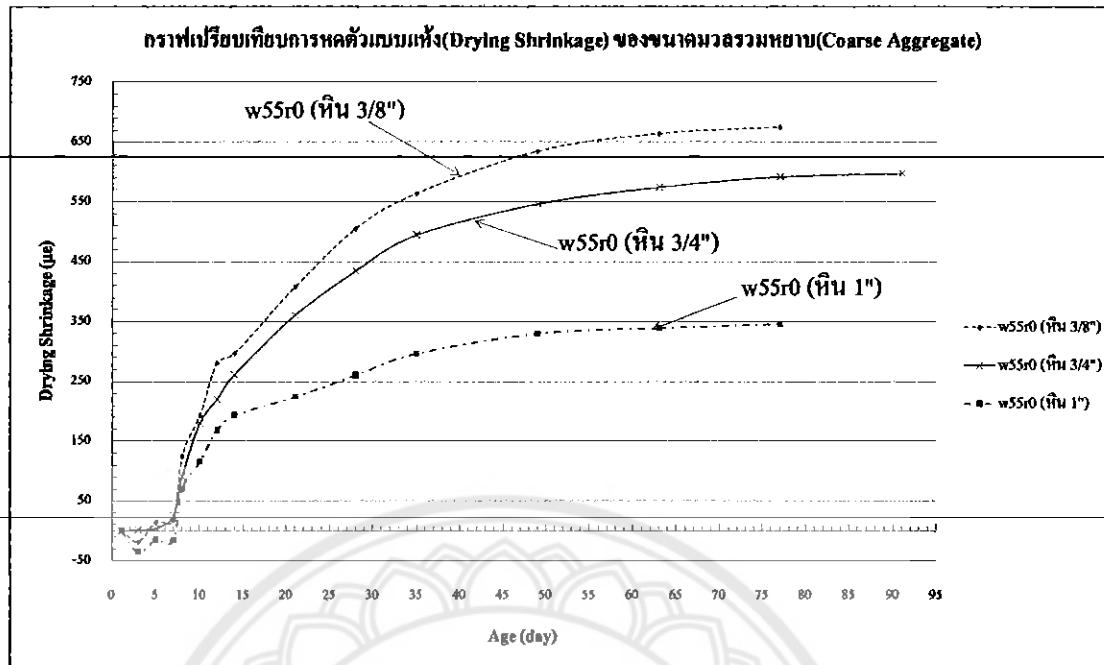


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีผลต่อกำลังอัด ของแท่งทดสอบคอนกรีต

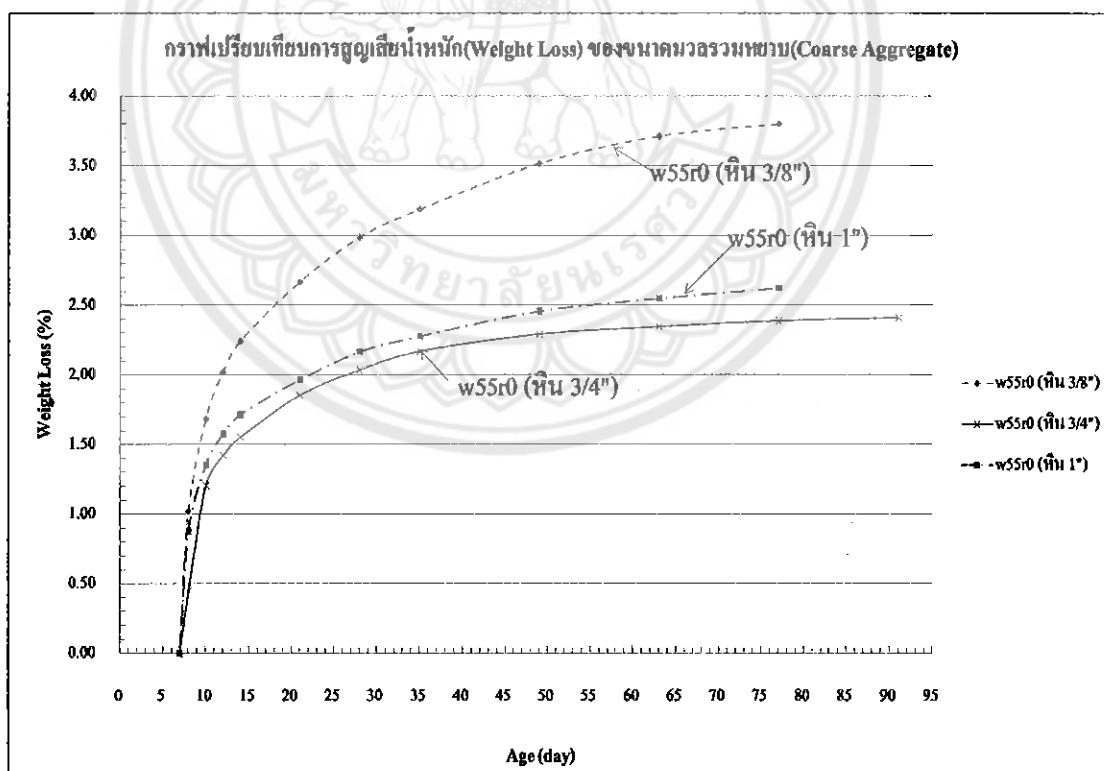
ในรูปที่ 4.1 แสดงค่าการหดตัวแบบแท้จริงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน จากผลการทดลองพบว่า ที่ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวมเท่ากัน ในระยะเวลาที่ 63 วัน ค่าการหดตัวของคอนกรีตที่มากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.55) ค่าการหดตัวเท่ากับ 575 ไมครอน และค่าการหดตัวของคอนกรีตที่น้อยที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.25) ค่าการหดตัวเท่ากับ เท่ากับ 526 ไมครอน ซึ่งในแนวโน้มจะขยายตัวส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.55) มีการหดตัวมากที่สุด ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักจากผลการทดลองพบว่า การสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.80)เท่ากับ 3.79 เมอร์เซ่นต์ และการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.25)เท่ากับ 0.65 เมอร์เซ่นต์ ซึ่งแสดงในรูป 4.2 สำหรับกำลังอัดของคอนกรีต ส่วนผสมที่มีกำลังอัดมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.25) ค่ากำลังอัดเท่ากับ 811 กก/ ซม<sup>2</sup>. และกำลังอัดน้อยที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.80) ค่ากำลังอัดเท่ากับ 119 กก/ ซม<sup>2</sup>. ดังแสดงในรูป 4.3

จากผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่มีปริมาณเชิญนต์เพสต์เท่ากันและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน ในช่วงที่บ่มน้ำในช่วงแรกของคอนกรีตมีการขยายตัว ภายหลังน้ำคอนกรีตขึ้นจากการบ่มน้ำ ผลคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีแนวโน้มที่จะหดตัวมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง อาจเนื่องมาจากการผสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ การทำปฏิกิริยาไออกเรชันสูงกว่าจึงทำให้ค่าการหดตัวแบบของโอลจีนสูมากกว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไปผลของการหดตัวแบบของโอลจีนสูจะลดลงและการหดตัวแบบแท้จริงมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการหดตัวของการทำปฏิกิริยาไออกเรชันลดลงและการสูญเสียความชื้นสูงภาวะแวดล้อมมากขึ้น สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง อาจทำให้มีช่องว่างภายในคอนกรีตมากและมีขนาดใหญ่ อาจส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และคอนกรีตที่มีช่องว่างภายในคอนกรีตมากอาจทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อมได้สะดวก จึงอาจเป็นผลทำให้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงมีการสูญเสียน้ำหนักมากได้

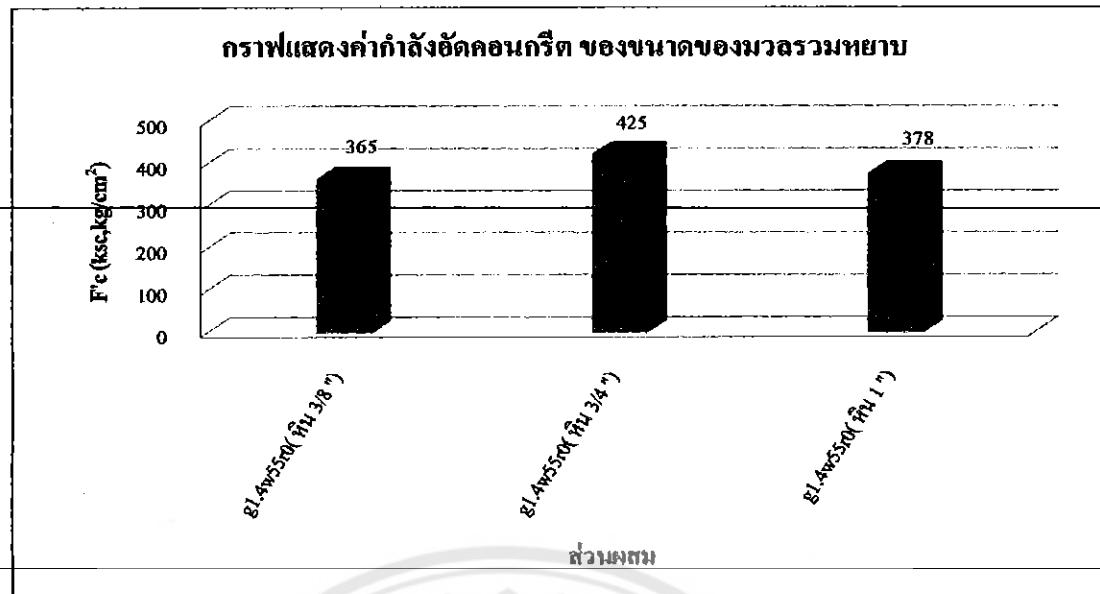
## 4.2 ขนาดมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลของขนาดมวลรวมหยาบที่มีต่อค่าการหดตัว ของแท่งทดสอบคอนกรีต



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของขนาดมวลรวมหยาบที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของแท่งทดสอบคอนกรีต



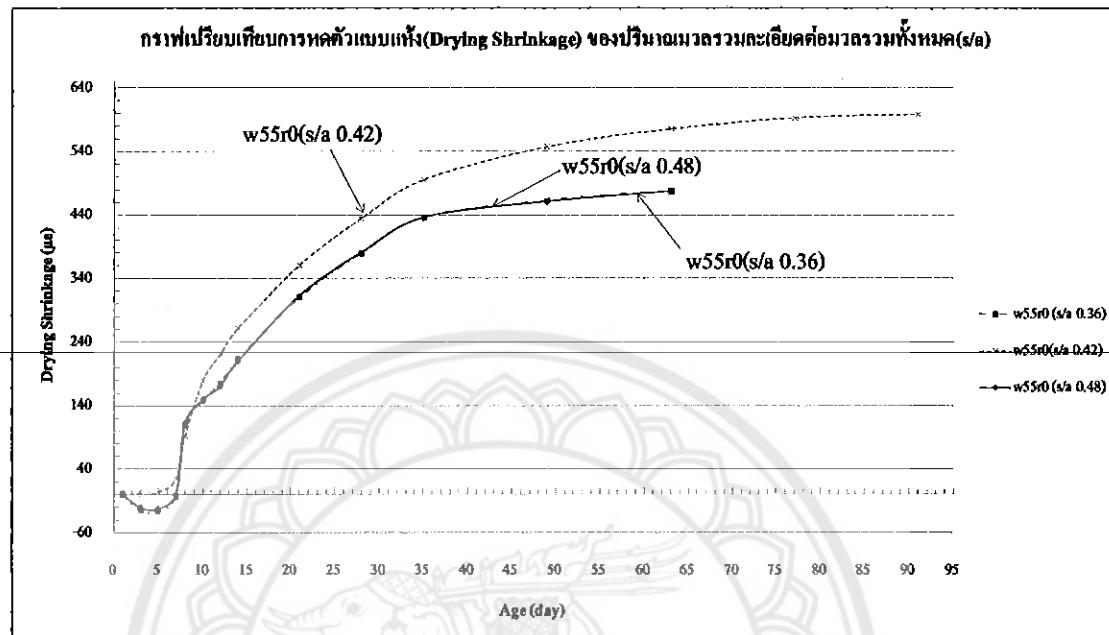
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของขนาดมวลรวมหินที่มีต่อกำลังขัด ของแท่งทดสอบคอนกรีต

ในรูปที่ 4.4 แสดงค่าการทดสอบตัวแบบแห้งของขนาดมวลรวมหิน จากผลการทดลองพบว่า ทำการทดสอบของคอนกรีตในระยะเวลาที่ 63 วัน โดยปริมาณเพสต์คือซ่องว่างมวลรวม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่ใช้ขนาดมวลรวมหินที่ต่างกัน ผลของค่าการทดสอบของคอนกรีตที่มากที่สุดคือ มวลรวมหินขนาด 3/8" ค่าการทดสอบเท่ากับ 664 ไมครอน และค่าการทดสอบตัวของคอนกรีตที่น้อยที่สุดคือ มวลรวมหินขนาด 1" ค่าการทดสอบเท่ากับ 339 ไมครอน ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการทดสอบพบว่า การสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดคือ มวลรวมหินขนาด 3/8" เท่ากับ 3.71 เปอร์เซ็นต์ และการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ มวลรวมหินขนาด 1/2" เท่ากับ 2.35 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูป 4.5 สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตส่วนผสมที่มีกำลังอัดมากที่สุดคือ มวลรวมหินขนาด 3/4" เท่ากับ 425 กก./ซม.<sup>2</sup>. และกำลังอัดน้อยที่สุดคือ มวลรวมหินขนาด 3/8" เท่ากับ 365 กก./ซม.<sup>2</sup>. ดังแสดงในรูป 4.6

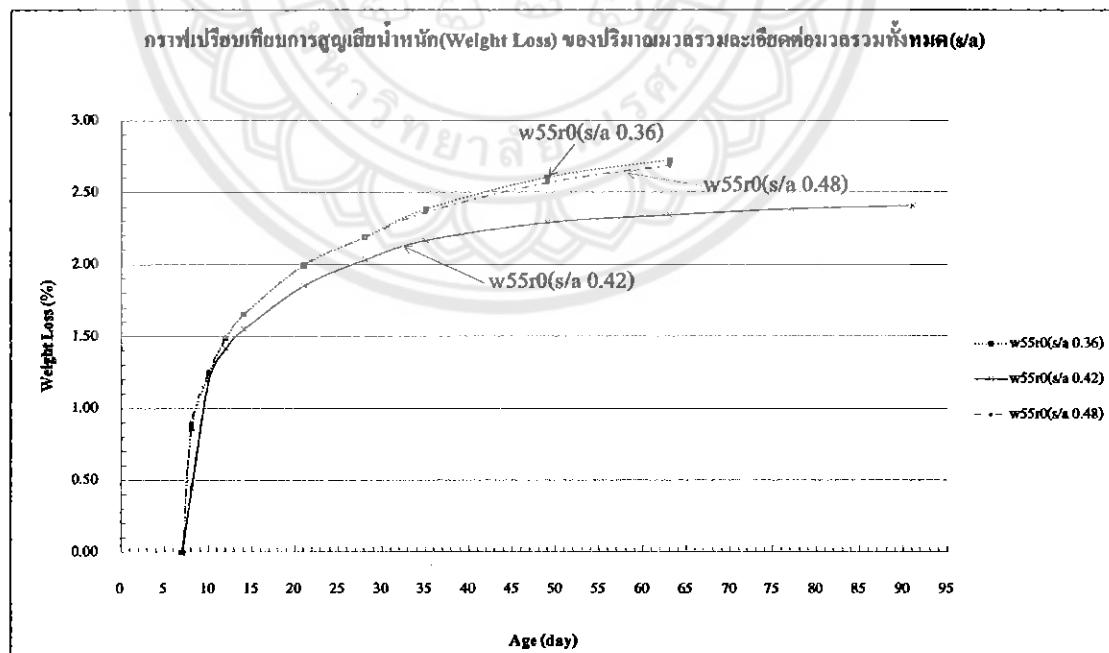
จากการทดลองพบว่า คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากันและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่ใช้ขนาดมวลรวมหินที่ต่างกันคือ หินขนาด 3/8 นิ้ว, 3/4 นิ้ว และ 1 นิ้ว ผลคือ ในช่วงที่มีการบ่มน้ำคอนกรีตมีการขยายตัวเร็วเดียวกัน ภายหลังนำคอนกรีตเข้ากระบวนการบ่มน้ำ พลิกคือ ส่วนผสมที่ใช้หินขนาด 1 นิ้ว การทดสอบน้อยกว่า หินขนาด 3/4 นิ้ว และ 3/8 นิ้ว ทั้งนี้อาจเนื่องจากความสามารถในการยึดรักษาการทดสอบของหินที่มีขนาดใหญ่มีการยึดรักษามากกว่าหินขนาดเล็ก และขนาดคละของมวลรวมที่ต้องใช้เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การทดสอบของคอนกรีตลดลง กำลังอัดของคอนกรีตที่มีหินขนาด 3/4 นิ้ว มีกำลังอัดมากที่สุด สำหรับหินขนาด 3/4 นิ้ว อาจเป็นขนาดคละของมวลรวมหินที่ดีและส่งผลทำให้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของหินขนาด 3/8 นิ้ว และมี

การสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของหินขนาด 1 นิ้ว อาจเป็นเพราะคอนกรีตที่มีส่วนผสมของหินขนาด 3/8 นิ้ว มีความแน่นที่คึกว่า

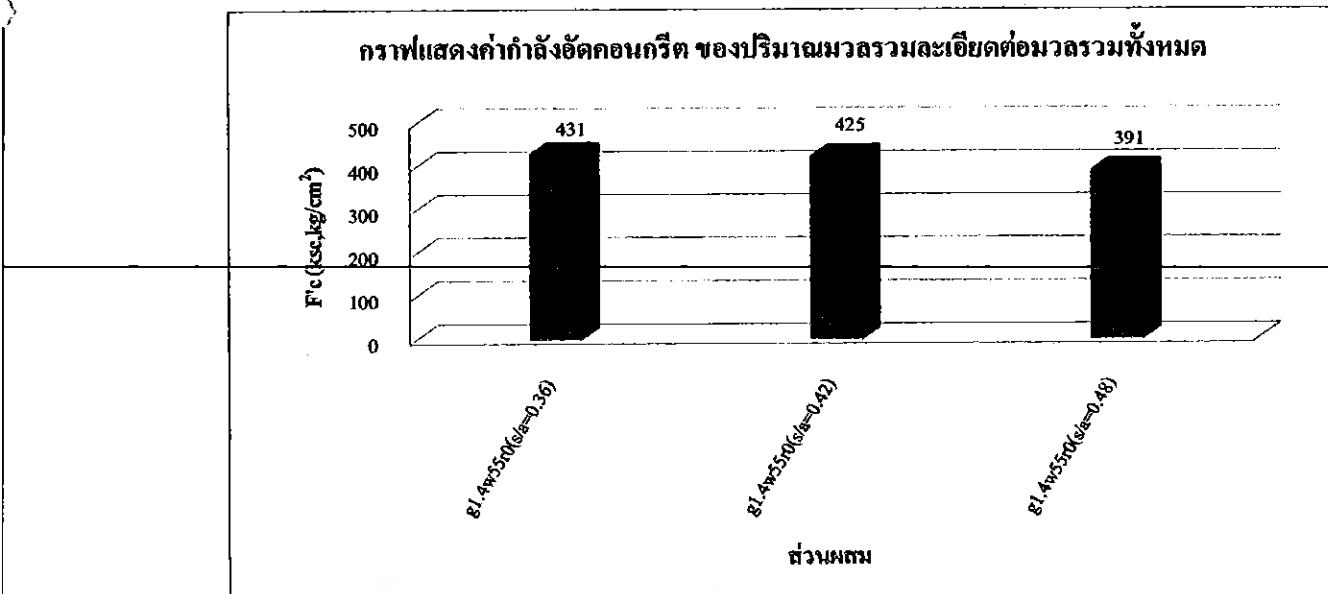
#### 4.3 ปริมาณมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมห้องหมุด (Sand / Aggregate)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลของปริมาณมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมห้องหมุดที่มีต่อค่าการหดตัวของเท่งทดสอบคอนกรีต



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลของปริมาณมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมห้องหมุดที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของเทงทดสอบคอนกรีต



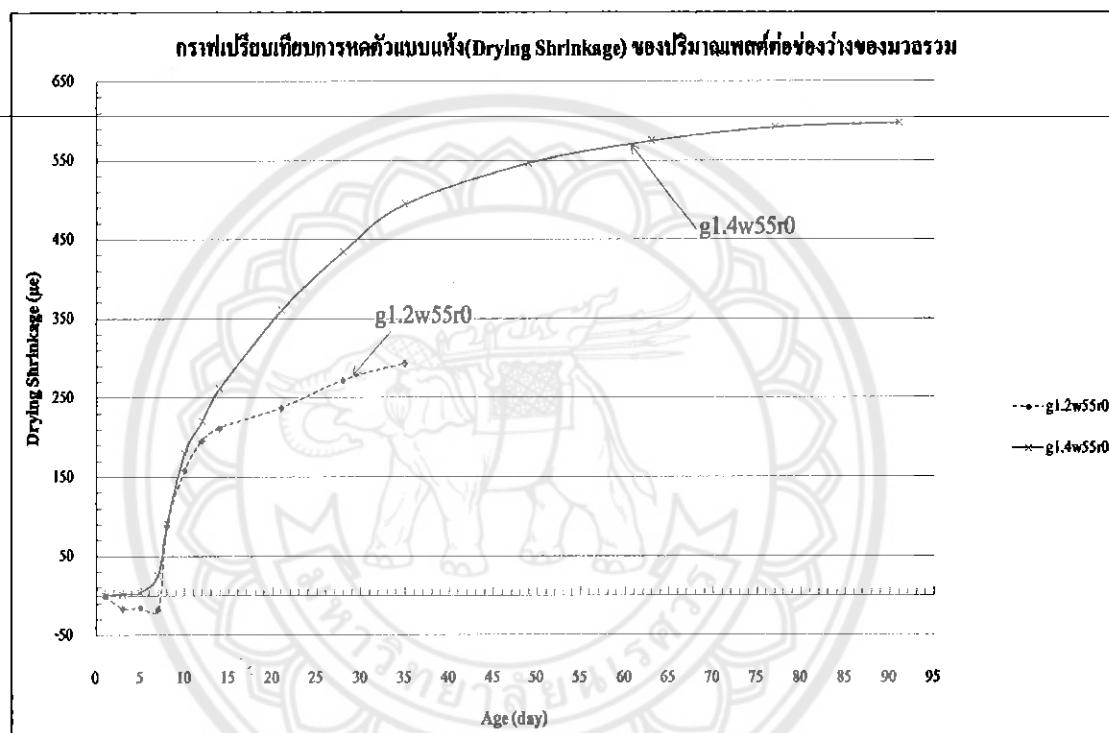
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมดที่มีต่อกำลังอัคค์ ของแท่งหดสูบค่อนกรีต

ในรูปที่ 4.7 แสดงค่าการหดตัวแบบแห้งของปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด จากผลการทดลองพบว่า ค่าการหดตัวของค่อนกรีตในระยะเวลาที่ 63 วัน โดยปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่ใช้ปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมดที่แตกต่างกัน ผลของการหดตัวของค่อนกรีตที่มากที่สุดคือ ปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด(0.42) ค่าการหดตัวเท่ากับ 575 ในครอน และค่าการหดตัวของค่อนกรีตที่น้อยที่สุดคือ ปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด(0.36 และ 0.48) เท่ากับ 447 ในครอนซึ่งการหดตัวเท่ากัน ในแนวโน้มระยะเวลาปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด (0.42) มีการหดตัวมากที่สุด ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการทดลองพบว่า การสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดคือ ปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด(0.36)เท่ากับ 2.72 เปอร์เซ็นต์ และการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ ปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด(0.42)เท่ากับ 2.35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงในรูป 4.8 สำหรับกำลังอัคคีของค่อนกรีตส่วนผสมที่มีกำลังอัคคีมากที่สุดคือ ปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด(0.36) ค่ากำลังอัคคีเท่ากับ 431 กก/ซม<sup>2</sup>. และกำลังอัคคีน้อยที่สุดคือ ปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด(0.48) ค่ากำลังอัคคีเท่ากับ 391 กก/ซม<sup>2</sup>. ดังแสดงในรูป 4.9

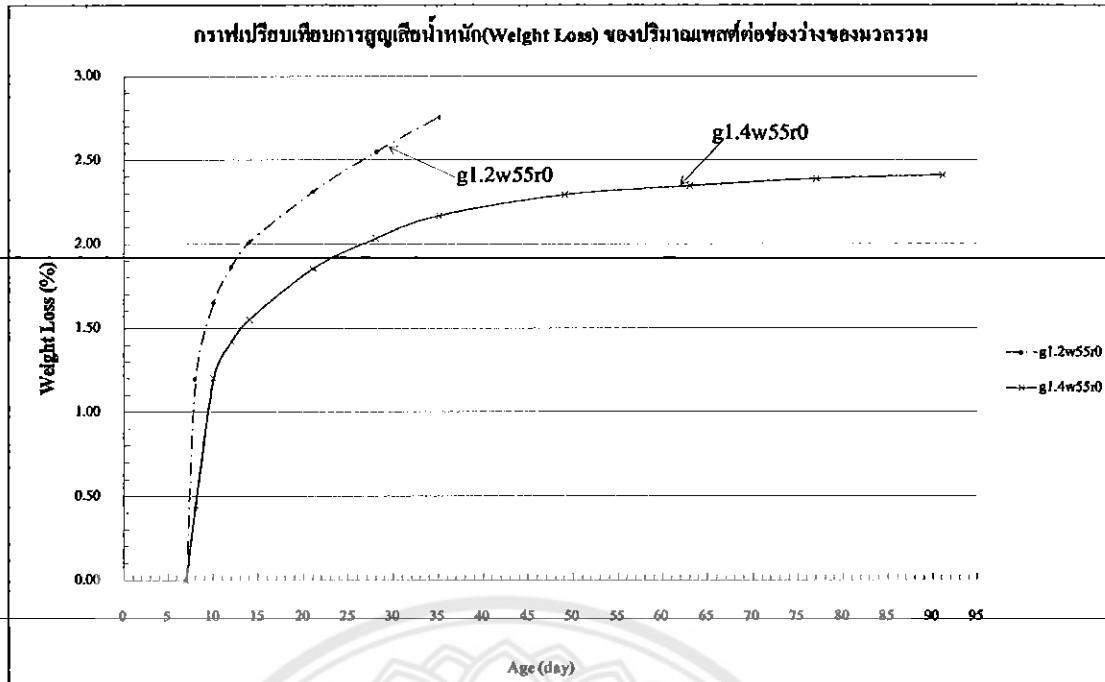
จากการทดลองพบว่า ค่อนกรีตที่มีปริมาณเพสต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่ใช้อัตราส่วนปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด ที่ต่างกันคือ 0.36, 0.42 และ 0.48 ผลคือในช่วงที่ทำการบ่มค่อนกรีตมีการขยายตัวชั่วคราวเกิดขึ้น ภายหลังจากนำค่อนกรีตเข้าจากน้ำ เนื่นได้ว่าการหดตัวของส่วนผสมที่มีอัตราส่วนปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด (0.36 และ 0.48) มีการหดตัวไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ปริมาณมวลรวมจะเสียดต่อมวลรวมทั้งหมด

เท่ากับ(0.42) มีการหดตัวมากกว่า แต่เมื่อคุณการสูญเสียน้ำหนักส่วนผสมที่มีปริมาณมวลรวมลดลงต่ำกว่าทั้งหมด(0.42) มีการสูญเสียน้ำหนักน้อย อาจเป็นเพราะเป็นสัดส่วนที่มีมวลรวมลดลงที่สุด ซึ่งต่างจากกำลังยืด โดยยัตราช่าว่าส่วนปริมาณมวลรวมลดลงต่ำกว่าทั้งหมด(0.36) มีกำลังอัดมากที่สุดและลดลงตามลำดับ อาจเนื่องมาจากการปริมาณมวลรวมลดลงต่ำกว่าทั้งหมด(0.36) มีปริมาณมวลรวมหมายมากกว่า ปริมาณมวลรวมลดลงต่ำกว่าทั้งหมด(0.42 และ 0.48) จึงอาจทำให้มีกำลังอัดมากที่สุด

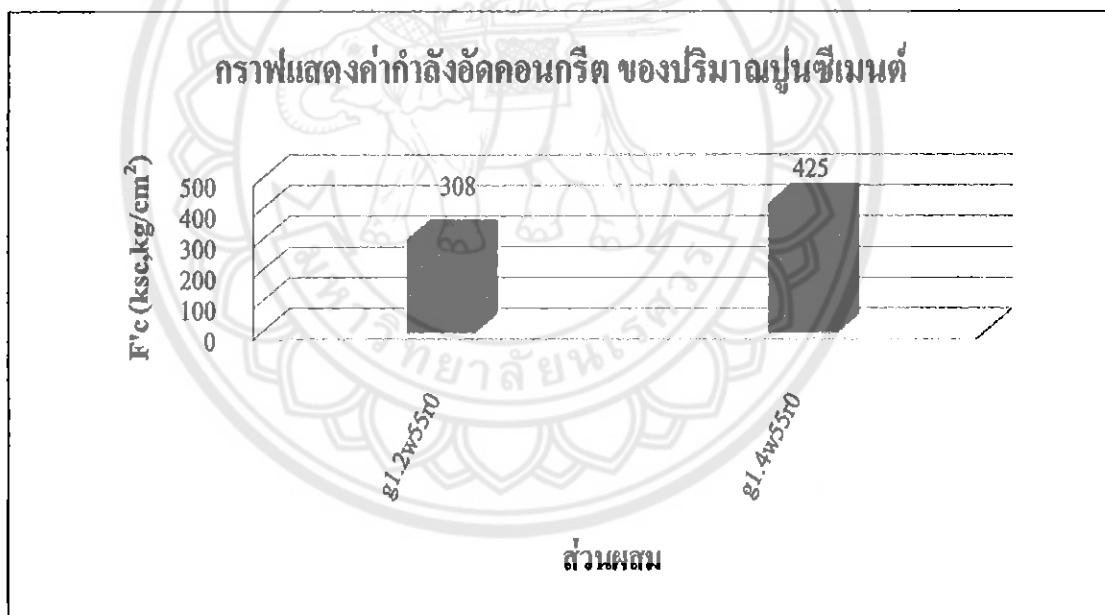
#### 4.4 ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวม (Paste Content)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมที่มีต่อการหดตัว ของแท่งทดสอบคอนกรีต



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของแท่งทดสอบคอนกรีต



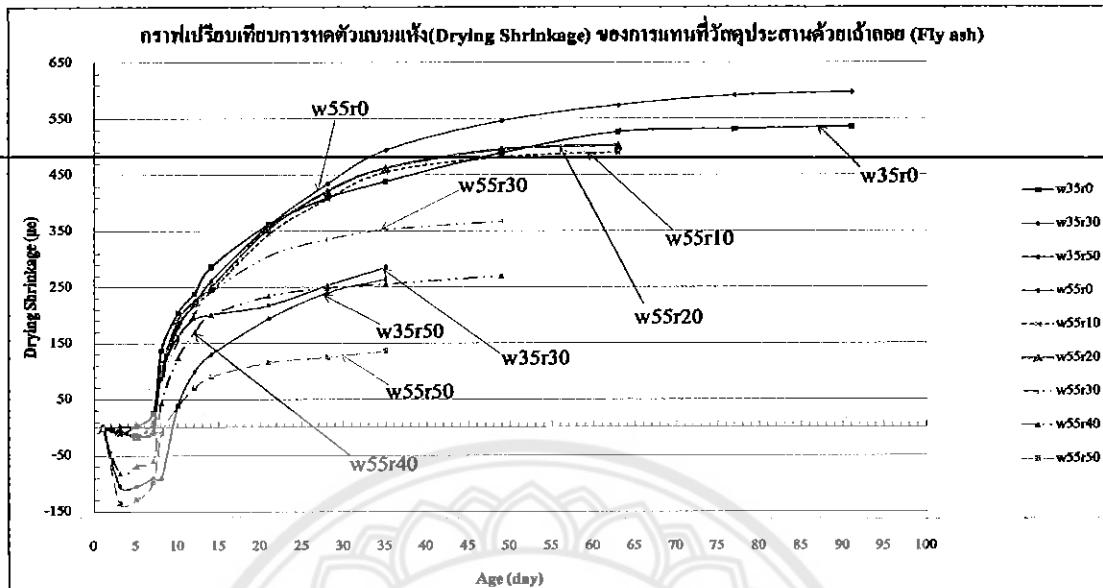
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมที่มีต่อกำลังอัด ของแท่งทดสอบคอนกรีต

ในรูปที่ 4.10 แสดงค่าการหดตัวแบบแท้จริงของปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวม จากการทดสอบพบว่า ค่าการหดตัวของคอนกรีตในระยะเวลาที่ 35 วัน โดยอัตราส่วนน้ำหินท่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวมต่างกัน ผลของค่าการหดตัวของคอนกรีตที่มากที่สุดคือ

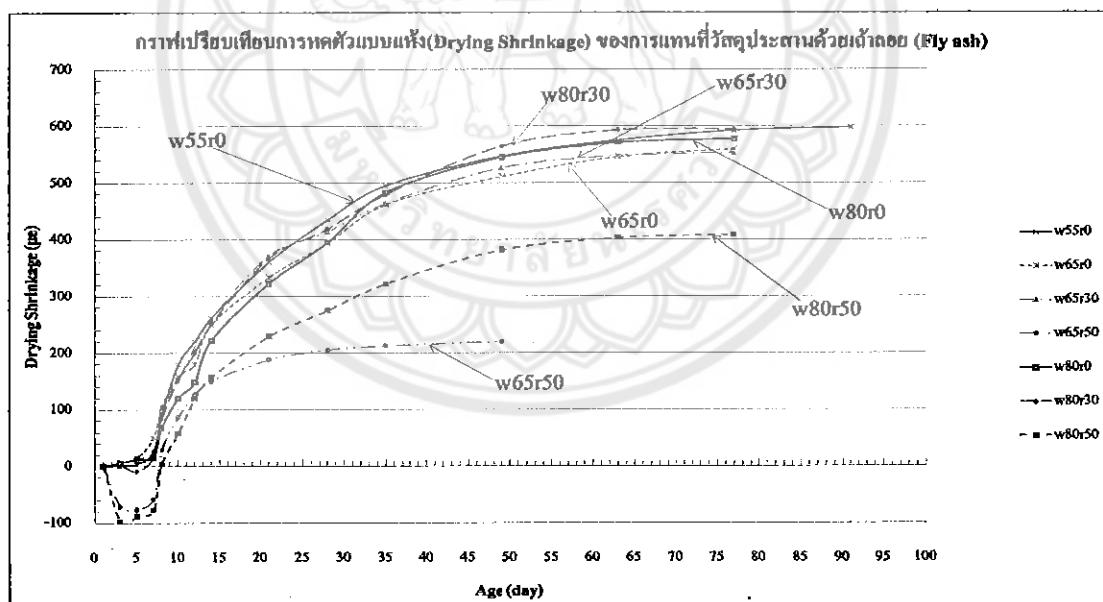
ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม(1.4) ค่าการทดสอบเท่ากับ 495 ไมครอน และค่าการทดสอบของคอนกรีตที่น้อยที่สุดคือ ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม(1.2) ค่าการทดสอบเท่ากับ 294 ไมครอน ในแนวโน้มระบบข้าว ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม(1.4) มีการทดสอบจำนวนมากที่สุด ส่วนค่าการสูญเสียหนักจากการทดสอบพบว่า การสูญเสียหนักมากที่สุดคือ ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม(1.2) เท่ากับ 2.75 เปอร์เซ็นต์ และการสูญเสียหนักน้อยที่สุดคือ ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม(1.4) เท่ากับ 2.17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงในรูป 4.11 สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตส่วนผสมที่มีกำลังอัดมากที่สุดคือ ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม(1.4) ค่ากำลังอัดเท่ากับ 425 กก./ซม.<sup>2</sup>. และ กำลังอัดน้อยที่สุดคือ ปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวม(1.2) ค่ากำลังอัดเท่ากับ 308 กก./ซม.<sup>2</sup>. ดัง แสดงในรูป 4.12

จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมที่ต่างกัน ผลคือในช่วงที่ทำการปั่นคอนกรีตมีการขยายตัวเท่ากัน ภายหลังจากน้ำก้อนกรีตขึ้นจากน้ำส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์มากมีการทดสอบมากกว่า ส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์ต่ำ โดยปกติแล้วการทดสอบจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนี้อาจเป็น เพราะ คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยหรืออิกนัชหนึ่งมีปริมาณมวลรวมมาก ทำให้เกิดการทดสอบน้อยลง อาจเนื่องจากอัตราส่วนที่มีปริมาณเพสต์มาก จึงมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า และอาจเป็นสาเหตุทำให้น้ำที่ทำปฏิกิริยาไอลเรชั่นมาก ทำให้น้ำอิสระในช่องว่างคอนกรีตมีน้อย และการสูญเสียหนักอาจเนื่องจากการระเบยของน้ำสู่สิ่งแวดล้อมก็มีอยู่ด้วย สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตสามารถเห็นชัด คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกำลังอัดอาจมากด้วย

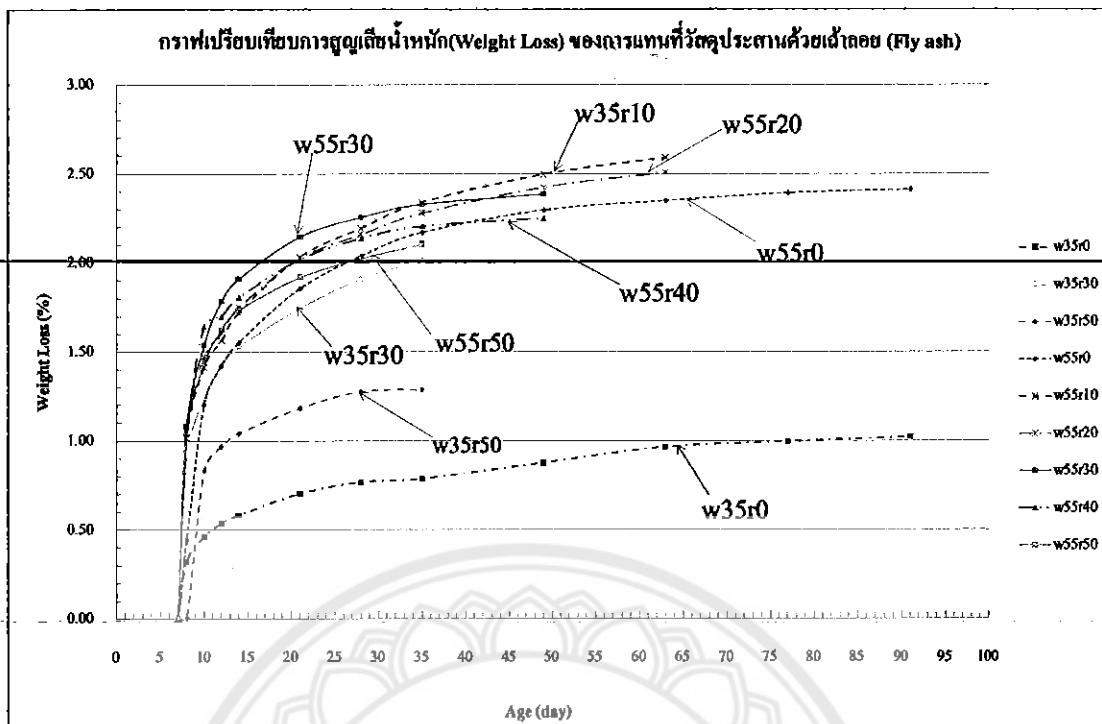
#### 4.5 การแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน (Fly Ash)



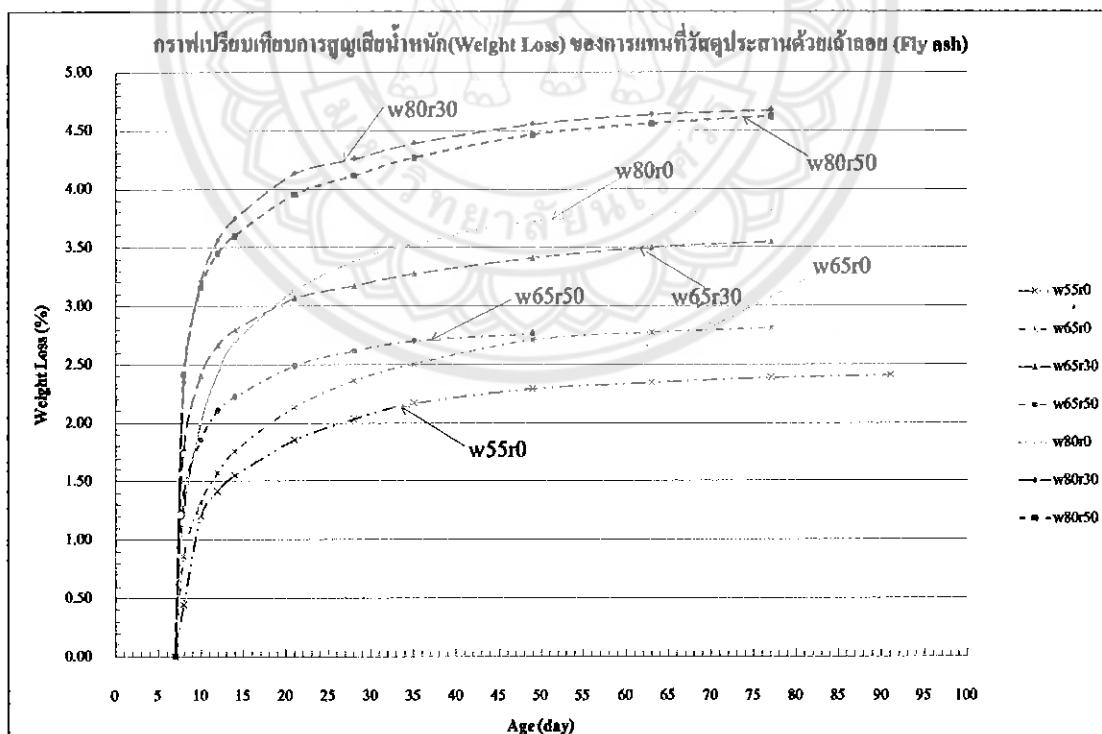
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหินที่มีต่อค่าการหดตัว ของแท่งทดสอบคอนกรีต ตั้งแต่ g1.4w35r0 – g1.4w35r50 และ g1.4w55r0 – g1.4w55r50



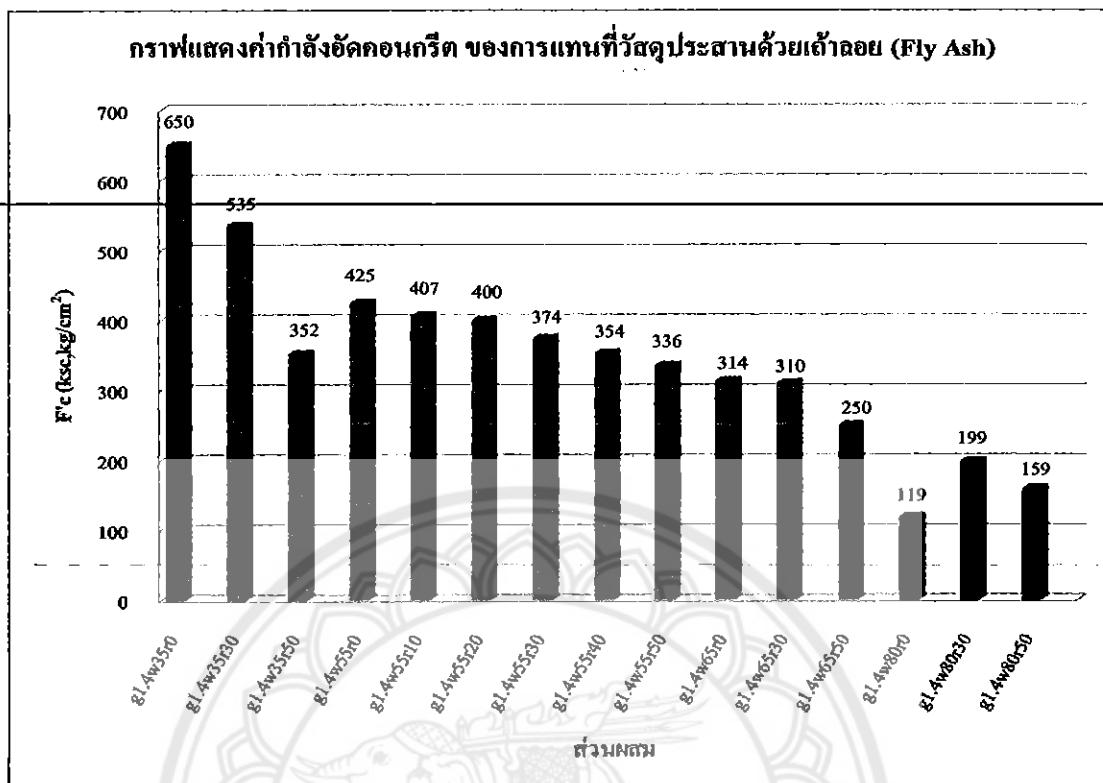
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหินที่มีต่อค่าการหดตัว ของแท่งทดสอบคอนกรีต ตั้งแต่ g1.4w65r0 – g1.4w65r50 และ g1.4w80r0 – g1.4w80r50



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่มในตัวยึดถือที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของแท่งทดสอบคอนกรีต ตั้งแต่ g1.4w35r0 – g1.4w35r50 และ g1.4w55r0 – g1.4w55r50



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซึ่มในตัวยึดถือที่มีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของแท่งทดสอบคอนกรีต ตั้งแต่ ส่วนผสม g1.4w65r0 – g1.4w65r50 และ g1.4w80r0 – g1.4w80r50



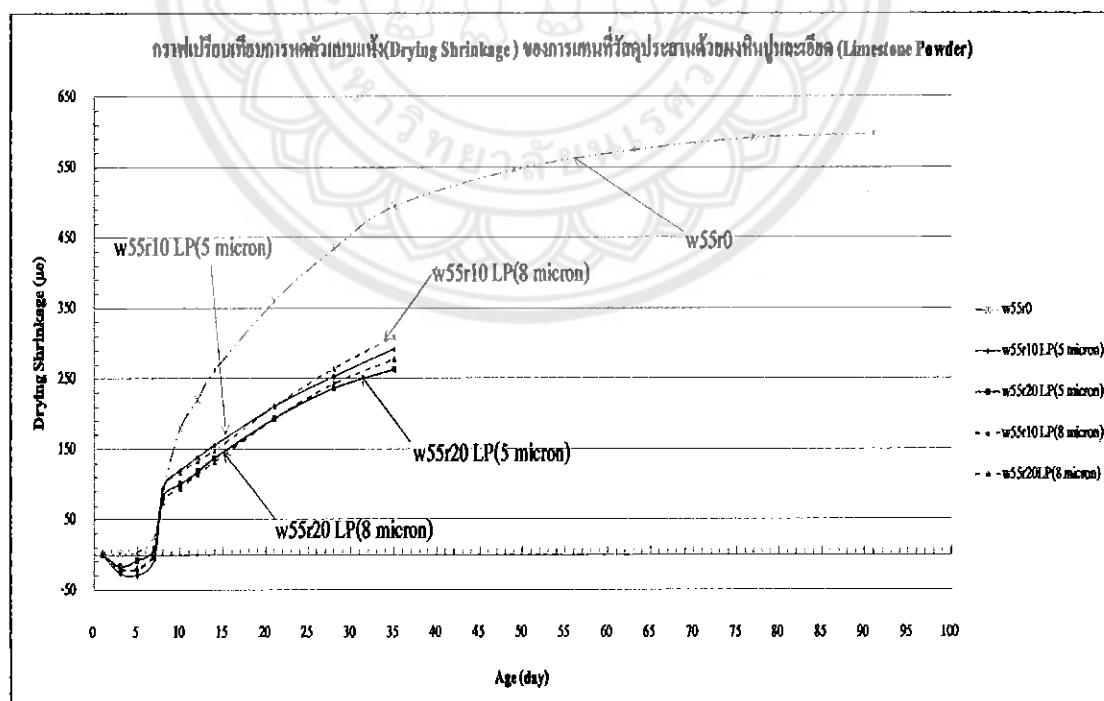
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหินที่มีต่อกำลังอัด ของแท่งทดสอบ คอนกรีต

ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงค่าการทดสอบตัวแบบแห้งของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการทดสอบตัวของคอนกรีตในระยะเวลาที่ 35 วัน โดยปริมาณเพสต์ต่อปริมาตร ซ่องว่างมวลท่ากัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประسان และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหินต่างกัน ผลกระทบตัวของคอนกรีตที่มากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประسان(0.80) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน(30%) ค่าการทดสอบเท่ากับ 479 ใหมครอน และค่าการทดสอบตัวของคอนกรีตที่น้อยที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประسان(0.55) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน(50%) ค่าการทดสอบเท่ากับ 136 ใหมครอน ในแนวโน้มระยะเวลา อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประسان(0.80) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน(30%) มีการทดสอบตัวมากที่สุด ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักจากผลการทดสอบพบว่า การสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประسان(0.80) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน(30%) เท่ากับ 4.39 เปอร์เซ็นต์ และการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประسان(0.35) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน(50%) เท่ากับ 1.29 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงในรูป 4.15 และ 4.16 สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตส่วนผสมที่มีกำลังอัดมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประسان(0.35) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน(30%) ค่ากำลังอัดเท่ากับ 535 กก/ซม<sup>2</sup>. และกำลัง

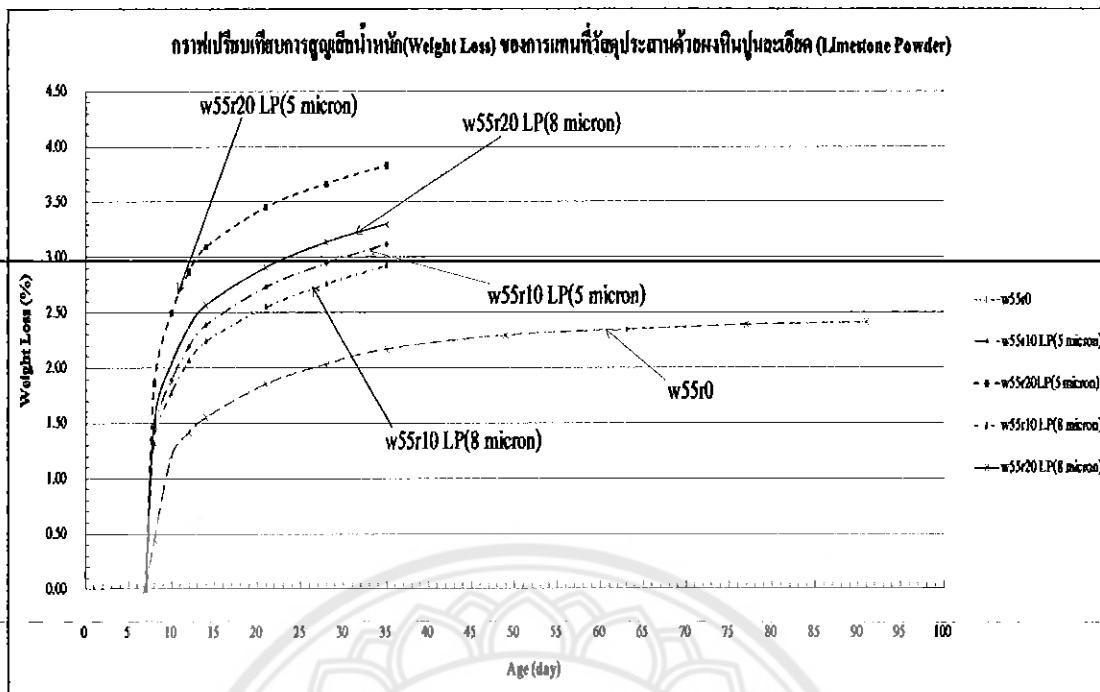
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.80) และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่าน้อย(50%) ค่ากำลังอัคเท่ากับ 159 กก./ซม.<sup>2</sup>. ดังแสดงในรูป 4.17

จากผลการทดลอง โดยพิจารณา ค่อนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพст์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันแต่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่าน้อยในอัตราส่วนที่ต่างกัน พบว่าในช่วงการบ่มน้ำ ค่อนกรีตมีการผสานถ่าน้อยจะมีการขยายตัวมากกว่า อ่างเพราะว่าในถ่านอยู่มีปริมาณซัตเพอร์ไทร ออกไซด์มาก ทำให้เกิดการขยายตัวมากกว่าค่อนกรีตที่ไม่ใช้ขยายตัวเนื่องจากการดูดซึมน้ำ ภายหลังจากน้ำเข้าสู่จากการบ่มน้ำ เห็นได้ว่าส่วนผสมที่มีการใส่ถ่านอยู่มากทำให้เกิดการหดตัวน้อย และการหดตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อถ่านอยู่ในกล่อง อาจเนื่องจากถ่านอยู่ในแพนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ การเกิดปฏิกิริยาไออกเรชั่นลดลงและความต้องการน้ำเพื่อทำปฏิกิริยาไออกเรชั่นอาจลดลงด้วยเช่นกัน ทำให้ปริมาณน้ำอิสระที่เหลืออยู่ในค่อนกรีตมีมาก ส่วนการสูญเสิน้ำหนักจะตรงกันข้ามกับการหดตัว อิสระส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยถ่านอย่างวนมาก น้ำอิสระที่ไม่ทำปฏิกิริยาไออกเรชั่นอาจมีมาก เมื่อเกิดการสูญเสิน้ำสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ค่อนกรีตอาจมีการสูญเสิน้ำหนักมากกว่า และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านอย่างทำให้กำลังอัคค่อนกรีตลดลง โดยอาจเนื่องจากไม่เลกุลของถ่านอยู่จะมีผิวกลมกว่าปูนซีเมนต์จึงทำให้การขัดเกลากองปูนซีเมนต์ซึ่งอาจคิดว่าถ่านอยู่

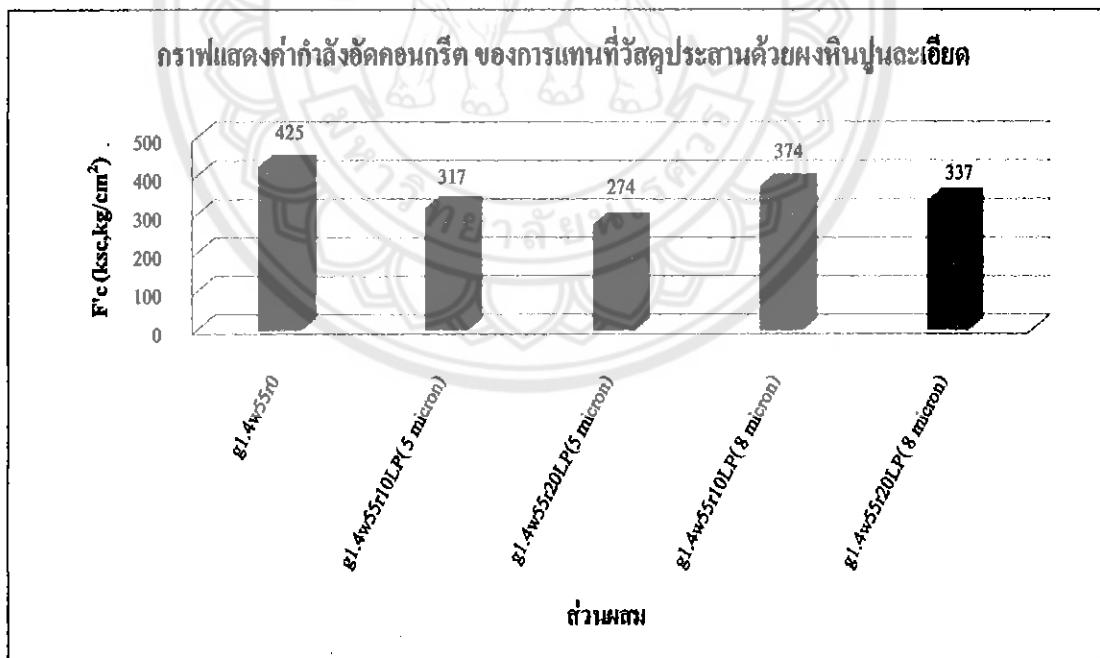
#### 4. 6 การแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด (Limestone Powder)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียดที่มีต่อค่าการหดตัว ของเท่งทศสอบค่อนกรีต



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียดที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนักของแท่งทดสอบคอนกรีต



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียดที่มีต่อกำลังอัด ของแท่งทดสอบคอนกรีต

ในรูปที่ 4.18 แสดงค่าการทดสอบแบบแห้งของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด จากผลการทดลองพบว่า ค่าการทดสอบของคอนกรีตในระยะเวลาที่ 35 วัน โดยปริมาณเพสต์ต่อช่องว่าง มวลรวม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่ใช้ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียดที่ต่างกัน ผลของค่าการทดสอบของคอนกรีตที่มากที่สุดคือ แทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด(10% ขนาด 8 ไมครอน) ค่าการทดสอบตัวเท่ากับ 310 ไมครอน และค่าการทดสอบของคอนกรีตที่น้อยที่สุดคือ แทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด(20% ขนาด 5 ไมครอน) ค่าการทดสอบตัวเท่ากับ 263 ไมครอน ซึ่งในแนวโน้มระยะเวลา แทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด(10% ขนาด 8 ไมครอน) มี การทดสอบมากที่สุด ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการทดลองพบว่า การสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดคือ แทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด(20% ขนาด 2 ไมครอน) เท่ากับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ และ การสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ แทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด(10% ขนาด 8 ไมครอน) เท่ากับ 2.93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงในรูป 4.19 สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตส่วนผสมที่มีกำลังอัดมากที่สุดคือ แทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด(10% ขนาด 8 ไมครอน) ค่ากำลังอัดเท่ากับ 374 กก/ซม<sup>2</sup>. และกำลังอัดน้อยที่สุดคือ แทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด(20% ขนาด 8 ไมครอน) เท่ากับ 337 กก/ซม<sup>2</sup>. ดังแสดงในรูป 4.20

จากผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียดที่ต่างกันคือ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผลคือในช่วงการบ่มคอนกรีตมีการขยายตัวน้อย แต่ภาชนะหลังนำคอนกรีตขึ้นจากน้ำ เห็นได้ว่า ส่วนผสมที่มีการใส่ผงหินปูนละเอียดเริ่มน้ำการทดสอบค่อนข้างน้อย อาจเป็นเพราะผงหินปูนละเอียดเข้าไปแทนที่และไปอุดช่องว่างที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไอลเครชั่นลดลงจึงอาจทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตน้อยลง สำหรับการสูญเสียน้ำหนักคงกันขึ้นกับการทดสอบส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยผงหินปูนละเอียด อาจทำให้น้ำอิสระที่ไม่ทำปฏิกิริยาไอลเครชั่นมีมาก เมื่อการสูญเสียน้ำสูงถึงแวดล้อมก็อาจทำให้คอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักมาก การแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียดอาจทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง แต่ถ้าใส่ในปริมาณที่เหมาะสมอาจทำให้กำลังอัดคอนกรีตได้กำลังอัดในระยะเวลาที่เร็วในช่วงระยะเวลาสั้นลงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมผงหินปูนละเอียด

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

##### 5.1.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to Binder Ratio)

จากผลทดลองพบว่า เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มมากขึ้นการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีแนวโน้มทำให้ค่าการทดสอบทั้งหมดของคอนกรีตสูงขึ้น

##### 5.1.2 ขนาดมวลรวมหินยาน (Coarse Aggregate)

ขนาดของมวลรวมหินยานมีผลต่อพฤติกรรมต่อการทดสอบทั้งหมดของคอนกรีต โดยการใช้มวลรวมหินยานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น มีผลทำให้ค่าการทดสอบของคอนกรีตลดลง

##### 5.1.3 ปริมาณมวลรวมละเอียดต่อนมวลรวมทั้งหมด (Sand/Aggregate)

ปริมาณมวลรวมละเอียดต่อนมวลรวมทั้งหมด มีผลต่อพฤติกรรมการทดสอบแท่งทดสอบคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า ส่วนผสมที่ใช้สัดส่วนระหว่างมวลรวมหินยานต่อนมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.36 และ 0.48 มีค่าการทดสอบทั้งหมดอย่างกว่าส่วนผสมที่ใช้สัดส่วนเท่ากับ 0.42

##### 5.1.4 ปริมาณแพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวม (Paste Content)

จากการศึกษาพบว่าค่าการทดสอบทั้งหมดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อส่วนผสมมีปริมาณแพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมลดลง

##### 5.1.5 การแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านหิน (Fly Ash)

การใส่ถ่านหินแทนปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยลดค่าการทดสอบของคอนกรีตได้โดยค่าการทดสอบมีค่าลดลงตามปริมาณถ่านหินที่เพิ่มขึ้น

##### 5.1.6 การแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียด (Limestone Powder)

การใส่ผงหินปูนละเอียดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยลดค่าการทดสอบของคอนกรีตได้ โดยการใส่ผงหินปูนละเอียดแทนปูนซีเมนต์มีแนวโน้มทำให้ค่าการทดสอบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ความมีการศึกษาการทดสอบแบบแห้งของคอนกรีตที่เกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ของโครงงานนี้ใน  
ระยะยาว โดยละเอียดต่อไป
2. ก่อนแทรกคอนกรีตลงแบบหล่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  เซนติเมตร และรูป  
ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร แล้วทำการสั่นคอนกรีต ควร  
ใช้ดินน้ำมันอุดรอยต่อ เพื่อป้องกันน้ำออกซิเจนทำให้ การวัดค่าการทดสอบแบบแห้งและน้ำหนักของคอนกรีต  
มีค่าที่ถูกต้องเป็นจริงมากขึ้น
3. การตั้งแบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  เซนติเมตร ให้มีความขาว  
เท่ากับ  $2.5$  เซนติเมตร ยังไม่ถูกต้องมากนัก เพราะรูปของแบบหล่อคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  
 $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  เซนติเมตร เกิดการซ้ำซ้อน ดังนั้นต้องมีการตรวจสอบทุกครั้งก่อนการตั้งแบบหล่อ
4. ความมีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยการทดสอบแบบแห้งของคอนกรีต ในการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ต  
แลนค์ประเภทต่างๆ เพื่อที่จะนำไปใช้ได้ในอนาคต
5. ในการวัดค่าการทดสอบของคอนกรีตในแต่ละครั้งด้วย เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความขาว  
ควรใช้สามค่าที่ต่ำที่สุดมาเฉลี่ยหาค่าการทดสอบของคอนกรีต เพื่อความแม่นยำของข้อมูลมากขึ้น
6. ในการวัดค่าการทดสอบของคอนกรีตบางครั้งเกิดความผิดพลาดเนื่องจาก เครื่องวัดการ  
เปลี่ยนแปลงความขาวล้วน ไม่นั่นคงทำให้ค่าการทดสอบของคอนกรีตเกิดการเปลี่ยนแปลง
7. ในการทดสอบคอนกรีตแต่ละครั้ง ต้องมีการควบคุมอัตราส่วนผสมอย่างเข้มงวดเนื่องจากหาก  
ส่วนผสมที่ใช้ไม่ถูกต้องจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปอย่างมาก

## เอกสารอ้างอิง

1. คونกรีตเทคโนโลยี, บริษัท พลิตภณ์และวัสดุก่อสร้าง (CPAC), 2537
2. คณะกรรมการการคونกรีตและวัสดุ, ความคงทนของคุณภาพ, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543
3. ปริญญา จินคำประเสริฐ และ ชัย ชาตรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอร์ไซดาน และคุณภาพ, สมาคมคุณภาพไทย, 2547
4. American Society for Testing and materials, ASTM C188-95: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 179-180.
5. American Society for Testing and materials, ASTM C127-88: (Reapproved 2001): Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 64-68.
6. American Society for Testing and materials, ASTM C128-97: Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 69-73.
7. American Society for Testing and materials, ASTM C29/C29-M97a: Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 1-4.
8. American Society for Testing and materials, ASTM C136-96a: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 78-82.
9. American Society for Testing and materials, ASTM C33-01: Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 1997, Vol. 04.02, Philadelphia, 10-17.
10. American Society for Testing and materials, ASTM C618-00: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 310-313.

11. American Society for Testing and materials, ASTM C311-00: Standard Test Methods for sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 191-199.
12. ปริญญา จินดาประเสริฐ , เถ้าloyในงานคอนกรีต , สุนทรีย์และพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนมหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2549
13. American Society for Testing and materials, ASTM C596-96: Standard Test Methods for Drying Shrinkage of Mortar made from Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia.
14. ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร , ปูนซีเมนต์ปอร์ทแลนด์ผสมซึ่งถูกเผาสักนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาเชิงบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2528
15. ไกรฤทธิ์ เกียรติโภมา , ชัย ชาตรีพิทักษ์กุล และ ทิน เกตุรัตนบวร.(2540). “การคัดเลือกถ้าถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต”. วารสาร กฟผ. , 3: 3-17.
16. วิศว จักร ไฟศาล และ ชัย ใจกลาง จักร ไฟศาล (2542). “ผลของซึ่งถูกเผาในปฏิกรณ์ปูนซีเมนต์”. วารสาร กฟผ. , 1, 60-67.
17. สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, ไบร์ทมิ ทะอุระ และชุมนชุกเกะ อะเนะะระ. (2538) “คุณสมบัติพื้นฐานของถ้าลอดคลิกในตัวจากโรงไฟฟ้าน้ำมاء”, การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2538, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
18. ปิติ เสรเมชาคุณ, บุรณัตร พัตรวีระ, สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, “การใช้ประโยชน์จากผงหินปูนร่วมกับวัสดุปูนซีเมนต์” คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

## ภาคผนวก ก

### คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ ก1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ มาตรฐาน ASTM C188 [4]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. จีดปริมาตรของน้ำมันก้าคครึ่งแรก, มล.	0.4	1.2
2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครึ่งแรก, °c	20	20
3. น้ำหนักซีเมนต์และถ้วยครึ่งแรก, ก.	420.7	340
4. จีดปริมาตรของน้ำมันก้าคครึ่งหลัง, มล.	20.2	18.6
5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครึ่งหลัง, °c	20	20
6. น้ำหนักซีเมนต์และถ้วยครึ่งหลัง, ก	358.8	285.7
7. น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้, ก. (3)-(6)	61.9	54.3
8. ปริมาตรของน้ำมันก้าคที่ถูกแทนที่, มล (4)-(1)	19.8	17.3
9. ความถ่วงจำเพาะ, (7)/(8)	3.126	3.139
10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย		3.13

ตารางที่ ก2 การหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหมาย มาตรฐาน ASTM C29 [7]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของระบบอุดตัว, กก.	9.415	9.415
2. น้ำหนักของระบบอุดตัวกับน้ำ, กก.	18.805	18.765
3. น้ำหนักของน้ำที่เติมในระบบอุดตัว, กก. (2-1)	9.39	9.35
4. อุณหภูมน้ำ, °c	30	30
5. ปริมาตรของระบบอุดตัว(จากการคำนวณ), ลิตร	9.43	9.39
6. น้ำหนักของระบบอุดตัวกับมวลรวม, กก.	24.155	24.165
7. น้ำหนักของมวลรวมในระบบอุดตัว, กก. (6-1)	14.74	14.75
8. หน่วยน้ำหนักของมวลรวม, กก./m³	1563.0	1570.8
9. หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเฉลี่ย, กก./m³		1566.9

ตารางที่ ก3 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาน มาตรฐาน ASTM C127 [5]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง, กก.	3.00	3.50
2. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กในน้ำ, กก.	2.50	2.50
3. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กรวมหินในน้ำ, กก.	4.40	4.75
4. น้ำหนักของหินในน้ำ, กก. (3-2)	1.90	2.25
5. น้ำหนักของหินในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ, กก.	2.985	3.480
6. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.714	2.784
7. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.727	2.800
8. ความถ่วงจำเพาะปูรากฎ	2.751	2.829
9. ร้อยละของการคูณซึ่ม	0.503	0.575

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ 2.749  
 ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง 2.764  
 ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปูรากฎ 2.790  
 ค่าเฉลี่ยร้อยละการคูณซึ่ม 0.539

ตารางที่ ก4 การหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละอิชค มาตรฐาน ASTM C29 [7]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของกระบอกดวง, กก.	3.98	3.98
2. น้ำหนักของกระบอกดวงกับน้ำ, กก.	6.84	6.845
3. น้ำหนักของน้ำที่เติมในกระบอกดวง, กก. (2-1)	2.860	2.865
4. อุณหภูมน้ำ, °C	30	30
5. ปริมาตรของกระบอกดวง(จากการคำนวณ), ลิตร	2.872	2.877
6. น้ำหนักของกระบอกดวงกับมวลรวม, กก.	8.740	8.805
7. น้ำหนักของมวลรวมในกระบอกดวง, กก. (6-1)	4.760	4.825
8. หน่วยน้ำหนักของมวลรวม, ก./m³	165.72	167.69
9. หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเฉลี่ย, ก./m³	166.70	

ตารางที่ ก 5 การหาค่าความต่ำงจำเพาะของมวลรวมละเอียด มาตรฐาน ASTM C128 [6]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของระบบอกรด, กรัม	142.5	169.6
2. น้ำหนักของรายอื่มตัวผิวแห้ง, กรัม	400	400
3. น้ำหนักของระบบอกรดที่ใส่น้ำและราย, กรัม	881.5	907.5
4. น้ำหนักของระบบอกรดที่ใส่น้ำ, กรัม	635	661
5. น้ำหนักของรายแห้งด้วยเตาอบ, กรัม	396.8	396.9
6. ความต่ำงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.585	2.586
7. ความต่ำงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอื่มตัวผิวแห้ง	2.606	2.606
8. ความต่ำงจำเพาะปรากฎ	2.640	2.639
9. ร้อยละของการคุณซึ่น	0.806	0.781

ค่าเฉลี่ยความต่ำงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.585
ค่าเฉลี่ยความต่ำงจำเพาะทั้งหมดที่สภาวะอื่มตัวผิวแห้ง	2.606
ค่าเฉลี่ยความต่ำงจำเพาะปรากฎ	2.640
ค่าเฉลี่ยร้อยละการคุณซึ่น	0.794

ตารางที่ ก6 หาขนาดคงของมวลรวมหยาน มาตรฐาน ASTM C 33 [9]

ขนาด ตะแกรง มาตรฐาน	นน. ตะแกรง (กรัม)	นน. ตะแกรง+ พิน(กรัม)	นน.ที่ค้าง อยู่บน ตะแกรง	นน.ค้าง สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละที่ ค้างบน ตะแกรง	ร้อยละ สะสมที่ ค้างบน
			(กรัม)	(กรัม)		ตะแกรง
1"	1235	1570	335	335	3.95	3.94
3/4"	1280	4055	2775	3110	32.70	36.65
1/2"	1305	4325	3020	6130	35.59	72.24
3/8"	1290	2465	1175	7305	13.85	86.09
เมตร์ 4	1165	2170	1005	8310	11.84	97.93
เมตร์ 8	0	0	0	0	0.00	97.93
เมตร์ 16	0	0	0	0	0.00	97.93
เมตร์ 30	0	0	0	0	0.00	97.93
เมตร์ 50	0	0	0	0	0.00	97.93
เมตร์ 100	0	0	0	0	0.00	97.93
total	845	1035	190	8500	2.24	100.17
รวม	7120	15620	8500		100.18	886.66

ค่าไม่ถูกตัด = 8.8666

ตารางที่ ก7 หาขนาดคละของมวลรวมละอียด มาตรฐาน ASTM C 136 [8]

ขนาด ตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนัก ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง+	น้ำหนักที่ถัง อยู่บน ตะแกรง	น้ำหนักถัง สะสมบน ตะแกรง(g)	ร้อยละที่ ถังบน ตะแกรง	ร้อยละ สะสมที่ ถัง
	(g)	(g)	(กรัม)			บน ตะแกรง
เมอร์ 4	511.1	511.3	0.2	0.2	0.04	0.04
เมอร์ 8	491.9	517.6	25.7	25.9	5.14	5.18
เมอร์ 16	443.2	533.6	90.4	116.3	18.09	23.27
เมอร์ 30	426.9	602	175.1	291.4	35.03	58.30
เมอร์ 50	395.5	549.6	154.1	445.5	30.83	89.14
เมอร์ 100	230.7	273.2	42.5	488	8.50	97.64
total	314.1	325.9	11.8	499.8	2.36	100.00
รวม	2813.4	3313.2	499.8		100.00	373.57

ค่าไม่ถูกตัดความละอียด = 3.7357

ตารางที่ ก8 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของถ้าโลหะ มาตรฐาน ASTM C188 [4]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. ปีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครึ่งแรก, มล.	1.0	1.1
2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครึ่งแรก, °c	30	30
3. น้ำหนักถ้าโลหะและถุงครึ่งแรก, ก.	318	271
4. ปีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครึ่งหลัง, มล.	18.55	18.3
5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครึ่งหลัง, °c	30	30
6. น้ำหนักถ้าโลหะและถุงครึ่งหลัง, ก	271.1	224.9
7. น้ำหนักถ้าโลหะที่ใช้, ก. (3)-(6)	46.9	46.2
8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่, มล (4)-(1)	17.55	17.2
9. ความถ่วงจำเพาะ, (7)/(8)	2.672	2.686
10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.679	

ตารางที่ ก9 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของผงพิเศษในปูนละอีดขนาด 5 ไมครอน มาตรฐาน ASTM

C188 [4]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1.จีดปริมาตรของน้ำมันก้าคครึ่งแรก, มล.	0.8	0.7
2.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครึ่งแรก, °c	30	30
3.น้ำหนักผงพิเศษในปูนละอีดและถ้วย, ก.	344.6	430.2
4.จีดปริมาตรของน้ำมันก้าคครึ่งหลัง, มล.	21	23
5.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครึ่งหลัง, °c	30	30
6.น้ำหนักผงพิเศษในปูนละอีดและถ้วย, ก	291.9	281.5
7.น้ำหนักผงพิเศษที่ใช้, ก. (3)-(6)	52.7	58.7
8.ปริมาตรของน้ำมันก้าคที่ถูกแทนที่, มล (4)-(1)	20.2	22.3
9.ความถ่วงจำเพาะ, (7)/(8)	2.609	2.632
10.ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.621	

ตารางที่ ก10 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของผงพิเศษในปูนละอีดขนาด 8 ไมครอน มาตรฐาน ASTM

C188 [4]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1.จีดปริมาตรของน้ำมันก้าคครึ่งแรก, มล.	0.6	0.5
2.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครึ่งแรก, °c	30	30
3.น้ำหนักผงพิเศษในปูนละอีดและถ้วย, ก.	355.4	345.6
4.จีดปริมาตรของน้ำมันก้าคครึ่งหลัง, มล.	26	23
5.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครึ่งหลัง, °c	30	30
6.น้ำหนักผงพิเศษในปูนละอีดและถ้วย, ก	287.7	284.6
7.น้ำหนักผงพิเศษที่ใช้, ก. (3)-(6)	67.7	61
8.ปริมาตรของน้ำมันก้าคที่ถูกแทนที่, มล (4)-(1)	25.4	22.5
9.ความถ่วงจำเพาะ, (7)/(8)	2.665	2.711
10.ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.688	

## ภาคผนวก ข

### ตารางและกราฟการหดตัวแบบแห้งของแต่ละส่วนผสม

ตารางที่ ข1 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w25r0

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	$\mu\epsilon$	WL %	$\mu\epsilon$	WL %	$\mu\epsilon$	WL %	$\mu\epsilon$	WL %
1	0		0		0		0	
3	20		20		16		19	
5	16		16		24		19	
7	16	0.00	20	0.00	24	0.00	20	0.00
8	140	0.21	136	0.21	136	0.20	138	0.21
10	204	0.30	208	0.30	212	0.28	208	0.29
12	248	0.34	256	0.35	252	0.33	252	0.34
14	288	0.37	300	0.38	304	0.36	298	0.37
21	389	0.45	393	0.46	401	0.44	394	0.45
28	433	0.49	441	0.51	453	0.49	442	0.50
35	457	0.51	465	0.52	477	0.50	466	0.51
49	517	0.58	525	0.58	533	0.57	525	0.57
63	553	0.65	557	0.66	565	0.64	558	0.65
77	557	0.68	561	0.69	569	0.68	562	0.68
91	561	0.71	561	0.71	569	0.70	564	0.71

ตารางที่ ข2 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w35r0

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-12		20		-40		-11	
5	8		24		-24		3	
7	12	0.00	32	0.00	32	0.00	25	0.00
8	124	0.31	144	0.34	144	0.32	138	0.32
10	184	0.44	216	0.48	212	0.47	204	0.46
12	224	0.52	244	0.55	248	0.54	239	0.54
14	264	0.56	296	0.60	296	0.58	286	0.58
21	349	0.68	369	0.72	369	0.71	362	0.70
28	401	0.74	421	0.78	405	0.78	409	0.77
35	417	0.76	457	0.81	441	0.80	438	0.79
49	465	0.84	509	0.89	493	0.89	489	0.88
63	501	0.93	549	0.98	529	0.98	526	0.96
77	509	0.98	553	1.00	533	1.00	531	0.99
91	513	1.00	557	1.03	537	1.03	536	1.02

ตารางที่ ข3 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w45r0

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-28		-24		-24		-25	
5	-16		-16		-16		-16	
7	-4	0.00	-8	0.00	0	0.00	-4	0.00
8	88	0.55	108	0.56	112	0.55	103	0.56
10	180	0.76	188	0.79	184	0.77	184	0.77
12	216	0.88	236	0.91	232	0.89	228	0.89
14	280	0.96	292	0.99	284	0.97	286	0.97
21	385	1.14	405	1.18	389	1.15	393	1.16
28	441	1.23	465	1.28	441	1.25	449	1.26
35	465	1.27	493	1.32	473	1.29	477	1.29
49	533	1.39	565	1.45	529	1.42	542	1.42
63	561	1.49	597	1.55	553	1.52	570	1.52
77	569	1.55	605	1.61	561	1.58	578	1.58
91	577	1.57	609	1.64	565	1.62	584	1.61

ตารางที่ ข4 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r0

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-4		0		8		1	
5	0		0		12		4	
7	22	0.00	24	0.00	30	0.00	25	0.00
8	88	0.45	88	0.44	98	0.45	91	0.45
10	174	1.21	178	1.19	186	1.21	180	1.20
12	216	1.43	218	1.40	226	1.42	220	1.42
14	256	1.56	260	1.54	268	1.56	262	1.55
21	359	1.87	359	1.84	365	1.86	361	1.85
28	433	2.04	431	2.02	441	2.04	435	2.03
35	497	2.18	491	2.15	497	2.17	495	2.17
49	549	2.29	547	2.27	545	2.31	547	2.29
63	577	2.34	575	2.32	573	2.37	575	2.35
77	593	2.39	595	2.37	589	2.41	592	2.39
91	597	2.41	603	2.39	593	2.43	598	2.41

ตารางที่ ข5 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w65r0

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	0		16		0		5	
5	12		20		12		15	
7	48	0.00	60	0.00	44	0.00	51	0.00
8	100	0.86	116	0.85	100	0.87	105	0.86
10	152	1.30	168	1.29	156	1.38	159	1.32
12	176	1.55	188	1.53	176	1.64	180	1.57
14	248	1.75	260	1.73	240	1.81	250	1.76
21	337	2.16	345	2.10	320	2.14	334	2.13
28	401	2.40	401	2.33	381	2.36	394	2.36
35	469	2.55	473	2.47	445	2.49	462	2.51
49	525	2.77	525	2.67	485	2.69	511	2.71
63	561	2.83	557	2.73	521	2.75	546	2.77
77	573	2.87	573	2.77	533	2.79	560	2.81

ตารางที่ ข6 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w80r0

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	4		8		0		6	
5	12		12		36		12	
7	20	0.00	12	0.00	28	0.00	16	0.00
8	68	1.19	68	1.25	108	1.30	68	1.22
10	116	2.00	124	2.01	164	2.05	120	2.00
12	148	2.44	148	2.41	208	2.44	148	2.42
14	220	2.71	224	2.68	276	2.71	222	2.69
21	320	3.16	325	3.11	393	3.13	323	3.13
28	393	3.41	397	3.36	473	3.38	395	3.39
35	481	3.56	485	3.51	561	3.52	483	3.54
49	545	3.75	545	3.70	617	3.70	545	3.73
63	569	3.82	573	3.76	641	3.77	571	3.79
77	577	3.85	577	3.80	649	3.81	577	3.83

ตารางที่ ข7 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r0 (หิน 3/8")

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-24		-20		-12		-19	
5	8		8		28		15	
7	12	0.00	12	0.00	28	0.00	17	0.00
8	116	0.99	116	1.01	140	1.06	124	1.02
10	176	1.64	188	1.70	212	1.71	192	1.68
12	268	1.97	276	2.05	296	2.04	280	2.02
14	288	2.19	292	2.28	308	2.26	296	2.24
21	397	2.61	409	2.72	417	2.67	407	2.67
28	497	2.92	505	3.05	513	2.99	505	2.99
35	553	3.12	565	3.26	573	3.19	564	3.19
49	625	3.45	637	3.59	641	3.52	634	3.52
63	653	3.63	665	3.77	673	3.74	664	3.71
77	665	3.71	677	3.85	681	3.83	674	3.80

ตารางที่ ข8 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r0 (หน้า 1")

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-48		-20		-36		-35	
5	-32		0		-12		-15	
7	-32	0.00	0	0.00	-16	0.00	-16	0.00
8	60	0.92	88	0.89	64	0.83	71	0.88
10	104	1.37	132	1.41	112	1.33	116	1.35
12	148	1.58	184	1.66	172	1.57	168	1.58
14	172	1.72	204	1.82	204	1.71	194	1.71
21	208	1.95	228	2.11	236	1.97	224	1.96
28	248	2.16	260	2.32	272	2.17	260	2.16
35	280	2.26	300	2.43	308	2.29	296	2.28
49	312	2.44	337	2.63	341	2.47	330	2.46
63	325	2.54	345	2.74	349	2.56	339	2.55
77	333	2.61	353	2.82	353	2.63	346	2.62

ตารางที่ บ9 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r0 (S/A 0.36)

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-28		-24		-24		-25	
5	-28		-28		-24		-27	
7	0	0.00	-4	0.00	-4	0.00	-3	0.00
8	108	0.93	108	0.79	108	0.86	108	0.86
10	144	1.31	148	1.18	152	1.23	148	1.24
12	164	1.56	180	1.42	180	1.48	175	1.49
14	204	1.73	220	1.58	216	1.64	214	1.65
21	296	2.08	316	1.92	316	1.98	310	1.99
28	365	2.27	389	2.13	385	2.16	379	2.19
35	417	2.46	445	2.34	445	2.35	435	2.38
49	441	2.67	477	2.57	469	2.57	462	2.60
63	457	2.79	489	2.69	485	2.69	477	2.72

ตารางที่ ข10 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r0 (S/A 0.48)

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-32		-16		-12		-20	
5	-24		-24		-20		-23	
7	-4	0.00	0	0.00	4	0.00	0	0.00
8	108	0.90	112	0.91	116	0.88	112	0.89
10	144	1.25	152	1.28	152	1.24	150	1.26
12	164	1.48	176	1.52	168	1.49	170	1.50
14	204	1.64	216	1.68	208	1.65	210	1.65
21	312	1.97	316	2.04	308	1.99	312	2.00
28	377	2.17	385	2.23	381	2.18	381	2.19
35	433	2.34	441	2.41	433	2.35	435	2.36
49	461	2.54	465	2.62	457	2.55	461	2.57
63	477	2.66	481	2.74	473	2.67	477	2.69

ตารางที่ ช 11 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.2w55r0

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %
1	0		0		0		0	
3	-12		-16		-20		-16	
5	-8		-20		-16		-15	
7	-12	0.00	-20	0.00	-20	0.00	-17	0.00
8	92	1.23	88	1.19	84	1.17	88	1.20
10	160	1.67	160	1.67	156	1.62	159	1.65
12	200	1.90	196	1.88	192	1.81	196	1.86
14	216	2.07	212	2.02	208	1.94	212	2.01
21	244	2.38	236	2.33	232	2.22	238	2.31
28	280	2.62	268	2.57	268	2.45	272	2.55
35	300	2.83	288	2.79	292	2.65	294	2.75

ตารางที่ ช12 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w35r30

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %
1	0		0		0		0	
3	-8		-8		-16		-11	
5	-12		-12		-12		-12	
7	-12	0.00	-8	0.00	-12	0.00	-11	0.00
8	96	0.92	100	0.93	92	0.91	96	0.92
10	160	1.23	168	1.24	160	1.24	163	1.23
12	188	1.40	200	1.44	192	1.43	194	1.42
14	200	1.50	204	1.55	200	1.53	202	1.53
21	216	1.71	220	1.77	216	1.75	218	1.74
28	252	1.88	256	1.93	252	1.92	254	1.91
35	284	1.97	284	2.04	288	2.03	286	2.01

ตารางที่ ๑๓ ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w35r50

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %
1	0		0		0		0	
3	-92		-124		-116		-104	
5	-96		-120		-112		-104	
7	-80	0.00	-112	0.00	-100	0.00	-90	0.00
8	-64	0.00	-96	0.01	-116	0.02	-90	0.01
10	40	0.86	32	0.89	40	0.81	40	0.84
12	100	0.98	96	1.03	100	0.96	100	0.97
14	128	1.06	132	1.11	132	1.03	130	1.04
21	184	1.20	196	1.27	204	1.17	194	1.18
28	232	1.28	244	1.38	248	1.27	240	1.28
35	256	1.29	264	1.38	272	1.28	264	1.29

ตารางที่ ข14 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r10

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-8		0		-12		-7	
5	-20		-16		-16		-17	
7	-16	0.00	68	0.00	-20	0.00	11	0.00
8	80	0.98	168	1.03	84	1.04	111	1.02
10	-144	1.38	232	1.43	172	1.44	183	1.41
12	172	1.53	260	1.58	220	1.57	218	1.56
14	192	1.69	280	1.74	256	1.73	243	1.72
21	280	2.00	369	2.05	385	2.04	345	2.03
28	337	2.17	429	2.21	457	2.20	407	2.19
35	381	2.31	473	2.36	513	2.34	455	2.34
49	405	2.47	497	2.52	545	2.50	482	2.50
63	417	2.56	505	2.61	549	2.59	490	2.59

ตารางที่ ข15 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r20

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %
1	0		0		0		0	
3	-8		-4		-4		-5	
5	-4		-12		-28		-15	
7	0	0.00	-4	0.00	-12	0.00	-5	0.00
8	96	1.10	96	1.08	104	1.09	99	1.09
10	180	1.48	188	1.46	204	1.48	191	1.47
12	212	1.60	216	1.59	244	1.62	224	1.60
14	236	1.75	244	1.74	268	1.77	250	1.75
21	337	2.01	349	2.00	377	2.06	354	2.02
28	401	2.15	413	2.14	449	2.19	421	2.16
35	445	2.26	453	2.26	489	2.33	462	2.28
49	477	2.39	481	2.40	529	2.48	495	2.43
63	485	2.47	485	2.48	537	2.57	502	2.51

ตารางที่ ๑๖ ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r30

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %
1	0		0		0		0	
3	-4		-4		-12		-7	
5	4		4		0		3	
7	4	0.00	4	0.00	4	0.00	4	0.00
8	92	1.07	68	1.11	92	1.06	84	1.08
10	164	1.56	144	1.59	156	1.47	155	1.54
12	212	1.76	192	1.85	204	1.74	203	1.78
14	248	1.88	232	1.99	244	1.86	242	1.91
21	312	2.11	300	2.24	304	2.09	306	2.15
28	341	2.22	329	2.35	337	2.19	335	2.26
35	357	2.31	349	2.42	353	2.26	353	2.33
49	369	2.38	365	2.49	369	2.30	367	2.39

ตารางที่ ข17 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r40

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>
1	0		0		0		0	
3	-76		-84		-84		-81	
5	-64		-72		-68		-68	
7	-56	0.00	-60	0.00	-60	0.00	-59	0.00
8	48	1.04	44	1.07	40	1.03	44	1.05
10	128	1.69	120	1.63	124	1.61	124	1.64
12	172	1.72	168	1.72	168	1.67	170	1.70
14	204	1.82	196	1.83	200	1.77	200	1.81
21	240	2.04	228	2.03	232	1.99	234	2.02
28	252	2.15	244	2.17	248	2.10	248	2.14
35	260	2.22	248	2.23	256	2.17	255	2.21
49	276	2.27	264	2.28	268	2.21	270	2.25

ตารางที่ ข18 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r50

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>
1	0		0		0		0	
3	-148		-124		-132		-135	
5	-152		-112		-120		-128	
7	-116	0.00	-88	0.00	-88	0.00	-97	0.00
8	-16	1.04	8	1.02	-24	1.08	-11	1.05
10	28	1.40	56	1.46	32	1.45	39	1.44
12	60	1.58	88	1.65	64	1.65	71	1.62
14	76	1.69	108	1.77	88	1.75	91	1.74
21	100	1.87	136	1.96	112	1.93	116	1.92
28	108	1.97	144	2.06	124	2.04	126	2.02
35	120	2.05	152	2.14	136	2.12	136	2.11

ตารางที่ ช 19 พลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w65r30

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-16		28		8		7	
5	0		28		8		12	
7	12	0.00	40	0.00	32	0.00	28	0.00
8	84	1.82	116	1.80	100	1.73	100	1.78
10	136	2.44	160	2.44	160	2.33	152	2.40
12	192	2.70	220	2.71	216	2.58	210	2.66
14	240	2.83	276	2.84	264	2.71	260	2.79
21	345	3.10	401	3.12	369	2.97	371	3.07
28	385	3.21	449	3.23	409	3.08	414	3.17
35	437	3.31	497	3.34	457	3.18	463	3.28
49	493	3.44	557	3.48	529	3.32	526	3.41
63	509	3.53	585	3.57	549	3.40	548	3.50
77	517	3.57	589	3.62	553	3.45	553	3.55

ตารางที่ ข20 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w65r50

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %	$\mu\text{e}$	WL %
1	0		0		0		0	
3	-80		-72		-60		-71	
5	-92		-76		-60		-76	
7	-68	0.00	-56	0.00	-48	0.00	-57	0.00
8	16	1.45	36	1.39	36	1.34	29	1.40
10	68	1.94	96	1.84	96	1.80	87	1.86
12	104	2.19	140	2.07	136	2.08	127	2.11
14	124	2.31	164	2.20	164	2.16	151	2.22
21	160	2.59	204	2.47	200	2.42	188	2.49
28	176	2.72	220	2.59	220	2.54	206	2.62
35	184	2.80	224	2.68	228	2.63	212	2.70
49	192	2.87	232	2.74	236	2.69	220	2.77

ตารางที่ ข21 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w80r30

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	12		-24		16		1	
5	-4		-32		12		-8	
7	28	0.00	-12	0.00	36	0.00	17	0.00
8	80	2.39	64	2.19	108	2.46	84	2.35
10	144	3.20	156	3.13	164	3.31	155	3.21
12	180	3.51	196	3.52	224	3.65	200	3.56
14	232	3.68	248	3.74	276	3.82	252	3.75
21	341	4.03	365	4.18	397	4.19	367	4.13
28	385	4.15	433	4.32	441	4.30	419	4.26
35	437	4.27	501	4.47	501	4.43	479	4.39
49	517	4.43	589	4.64	589	4.60	565	4.56
63	549	4.52	613	4.72	617	4.68	593	4.64
77	549	4.56	617	4.76	617	4.70	594	4.67

ตารางที่ ข22 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w80r50

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-104		-124		-64		-97	
5	-112		-100		-52		-88	
7	-100	0.00	-92	0.00	-40	0.00	-77	0.00
8	-24	2.35	-4	2.43	40	2.47	4	2.42
10	36	3.06	24	3.19	116	3.22	59	3.16
12	92	3.34	96	3.49	172	3.52	120	3.45
14	120	3.49	144	3.64	208	3.67	158	3.60
21	196	3.83	204	4.00	288	4.03	230	3.95
28	220	3.99	276	4.16	329	4.19	275	4.11
35	268	4.13	325	4.32	373	4.35	322	4.27
49	333	4.32	381	4.52	433	4.54	382	4.46
63	349	4.41	405	4.62	457	4.64	403	4.56
77	353	4.47	413	4.68	461	4.70	409	4.62

ตารางที่ ข23 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r10LP (5micron)

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-20		-32		-24		-25	
5	-24		-32		-28		-28	
7	-4	0.00	-8	0.00	-4	0.00	-5	0.00
8	100	1.42	88	1.41	96	1.45	95	1.43
10	128	1.88	112	1.86	120	1.93	120	1.89
12	148	2.18	132	2.16	136	2.25	139	2.20
14	168	2.37	144	2.34	156	2.45	156	2.39
21	232	2.72	188	2.69	212	2.79	211	2.73
28	276	2.93	228	2.90	256	3.01	254	2.95
35	312	3.10	268	3.08	296	3.18	292	3.12

ตารางที่ ข24 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r20LP (5micron)

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %	μe	WL %
1	0		0		0		0	
3	-16		-12		-20		-16	
5	-8		-4		-12		-8	
7	8	0.00	12	0.00	8	0.00	9	0.00
8	80	1.84	84	1.87	80	1.87	81	1.86
10	96	2.44	104	2.52	100	2.52	100	2.49
12	112	2.81	124	2.90	116	2.90	118	2.87
14	136	3.05	144	3.11	132	3.11	138	3.09
21	192	3.41	204	3.48	184	3.47	194	3.45
28	236	3.62	248	3.69	224	3.68	236	3.66
35	264	3.77	272	3.84	252	3.87	263	3.83

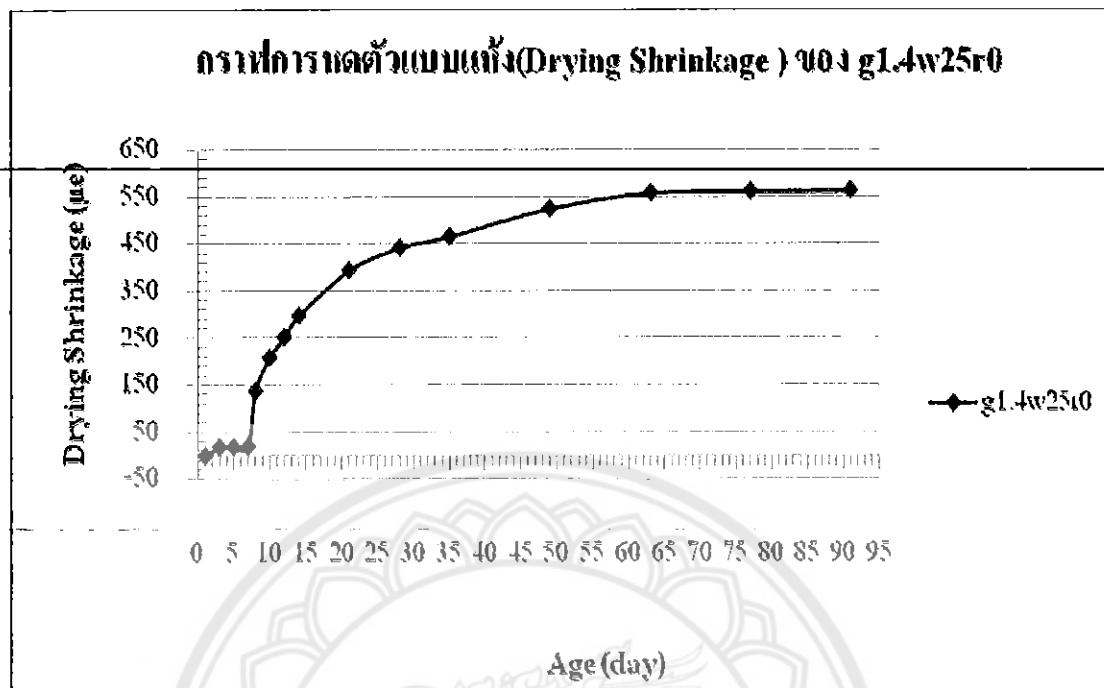
ตารางที่ ข25 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r10LP (8micron)

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	$\mu$ e	WL %	$\mu$ e	WL %	$\mu$ e	WL %	$\mu$ e	WL %
1	0		0		0		0	
3	-16		-20		-20		-19	
5	-16		-20		-24		-20	
7	4	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.00
8	96	1.33	88	1.35	92	1.30	92	1.33
10	120	1.74	112	1.79	116	1.80	116	1.78
12	140	2.02	132	2.07	128	2.10	134	2.07
14	152	2.21	144	2.24	148	2.28	148	2.24
21	216	2.50	204	2.55	212	2.60	211	2.55
28	268	2.71	256	2.76	268	2.81	264	2.76
35	312	2.87	300	2.93	316	2.98	310	2.93

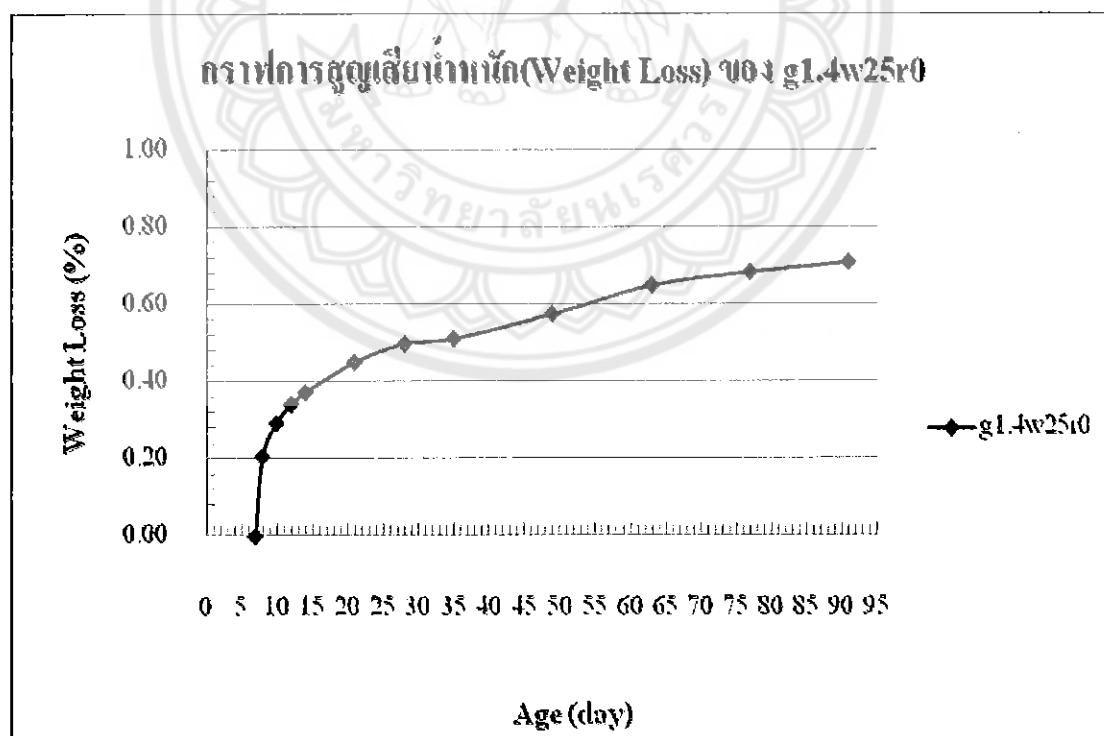
ตารางที่ ข26 ผลการทดสอบของส่วนผสม g1.4w55r20LP (8micron)

Age	Drying Shrinkage						Average	
	1		2		3		DS	WL %
	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>	<b>μe</b>	<b>WL %</b>
1	0		0		0		0	
3	-16		-24		-20		-20	
5	-12		-24		-20		-19	
7	8	0.00	4	0.00	-4	0.00	3	0.00
8	80	1.49	72	1.51	72	1.57	75	1.52
10	104	2.01	88	2.04	92	2.08	95	2.04
12	124	2.34	112	2.36	108	2.40	115	2.37
14	144	2.54	128	2.56	124	2.60	132	2.57
21	212	2.89	184	2.89	184	2.94	194	2.91
28	260	3.11	236	3.12	232	3.17	243	3.13
35	296	3.27	268	3.28	268	3.33	278	3.30

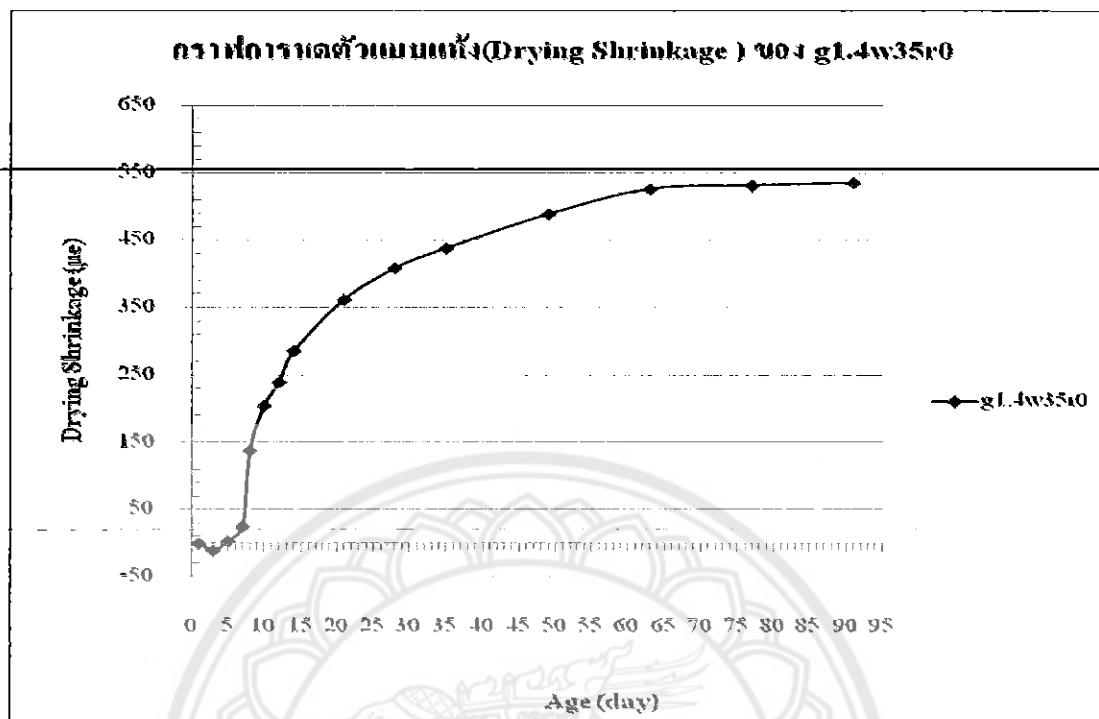
รูปที่ ข1 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w25r0



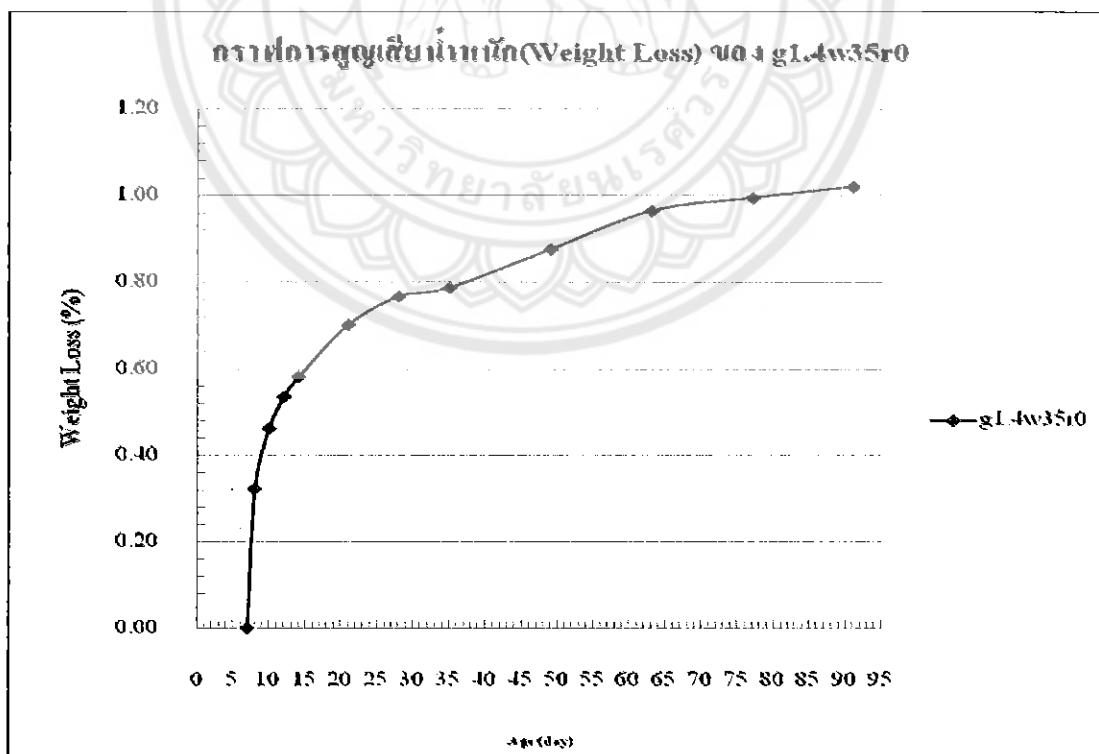
รูปที่ ข2 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w25r0



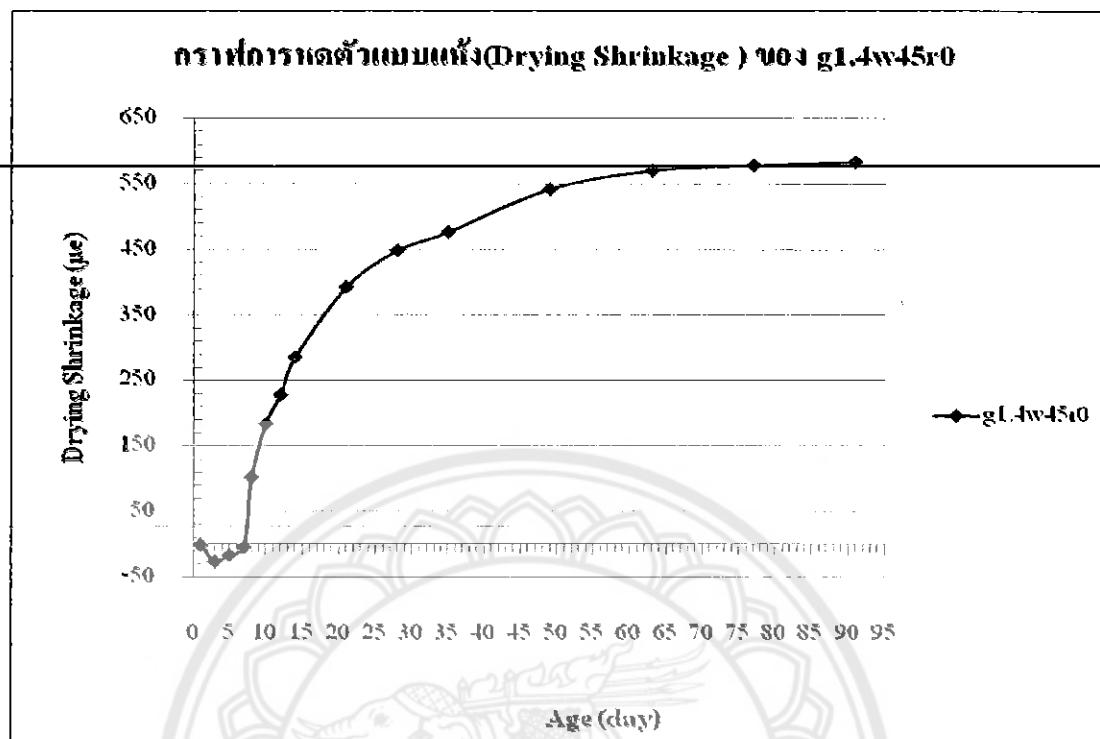
รูปที่ ข3 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w35r0



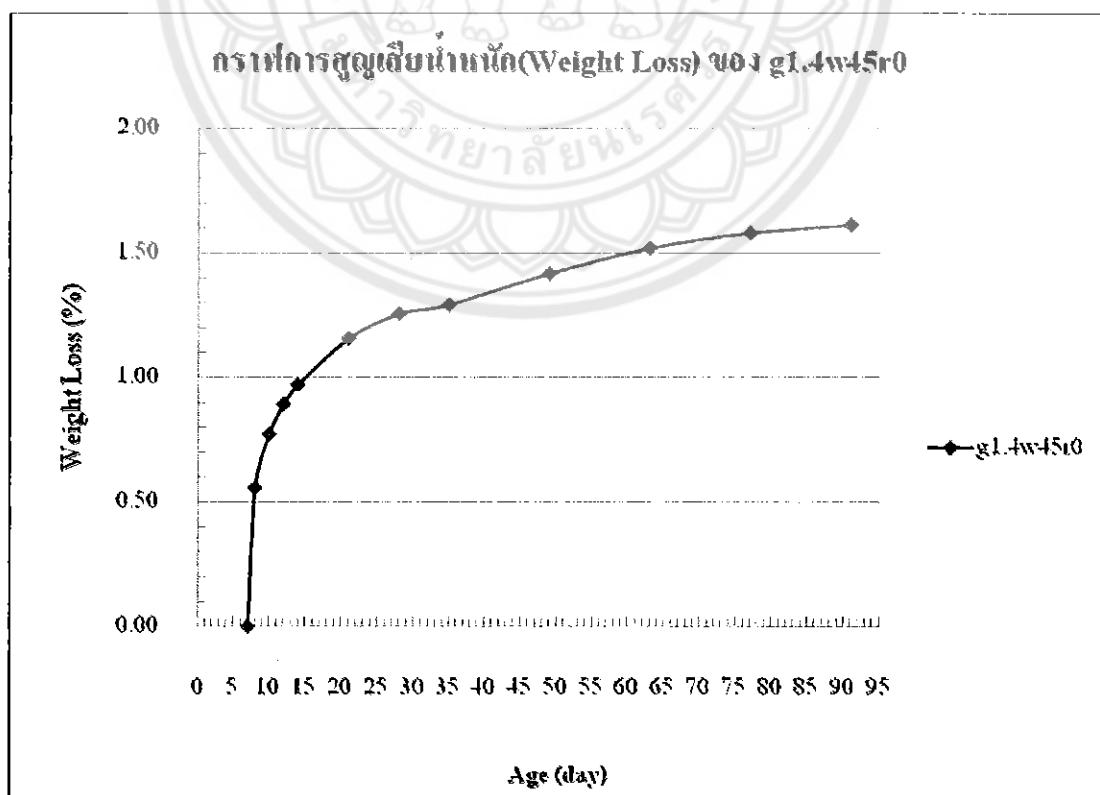
รูปที่ ข4 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w35r0



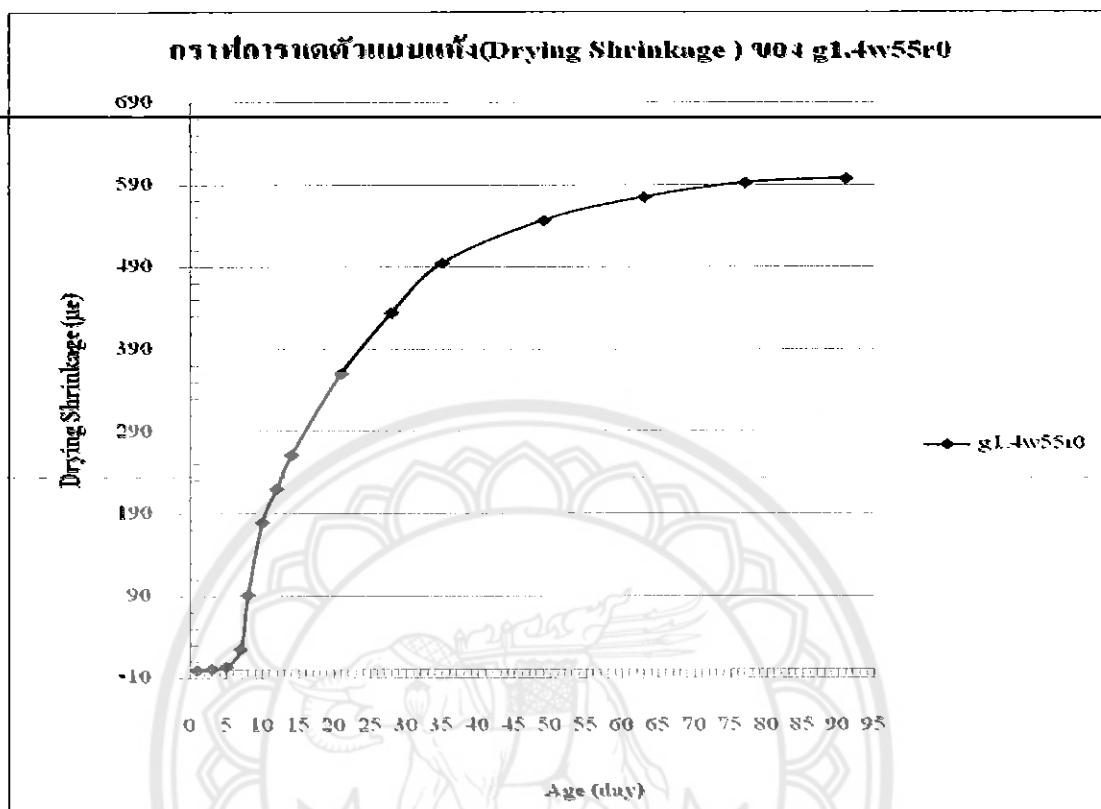
รูปที่ ข5 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w45r0



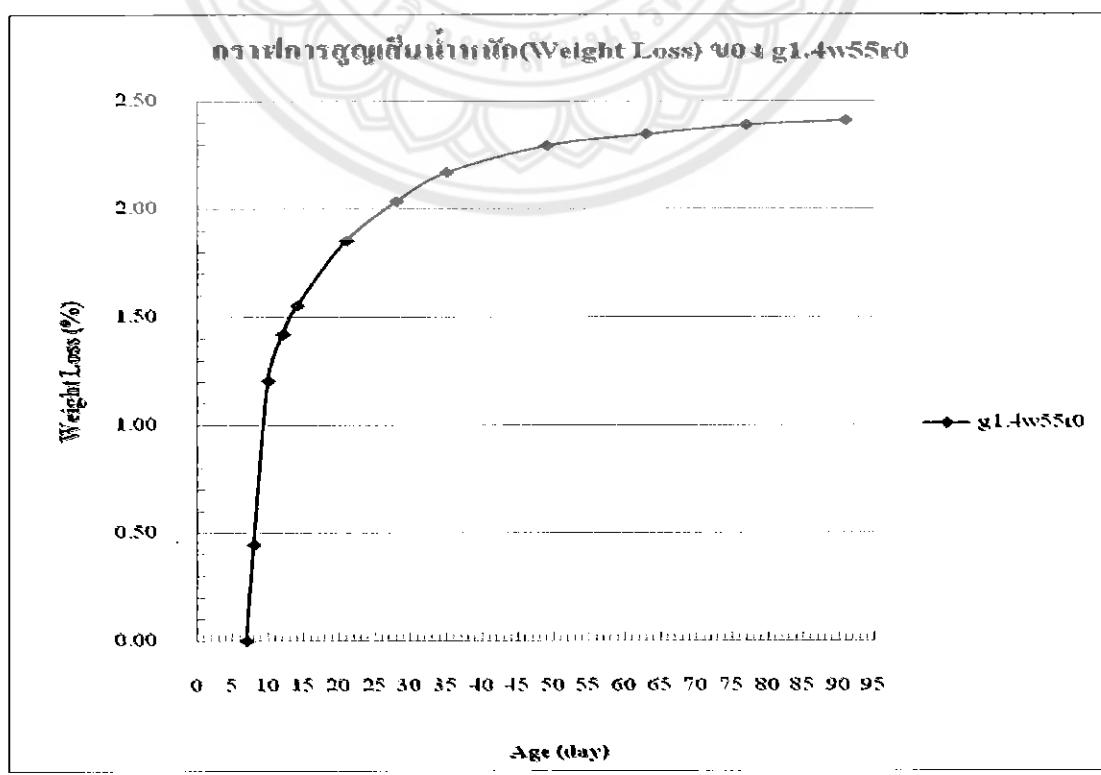
รูปที่ ข6 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w45r0



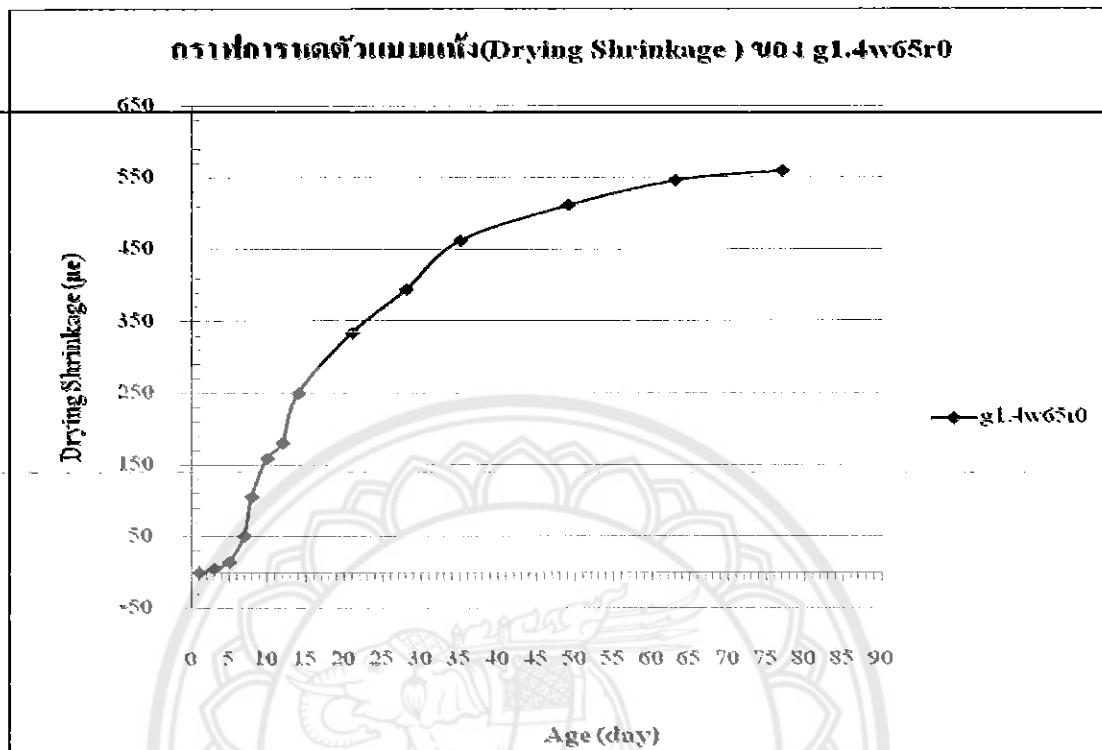
รูปที่ ข7 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r0



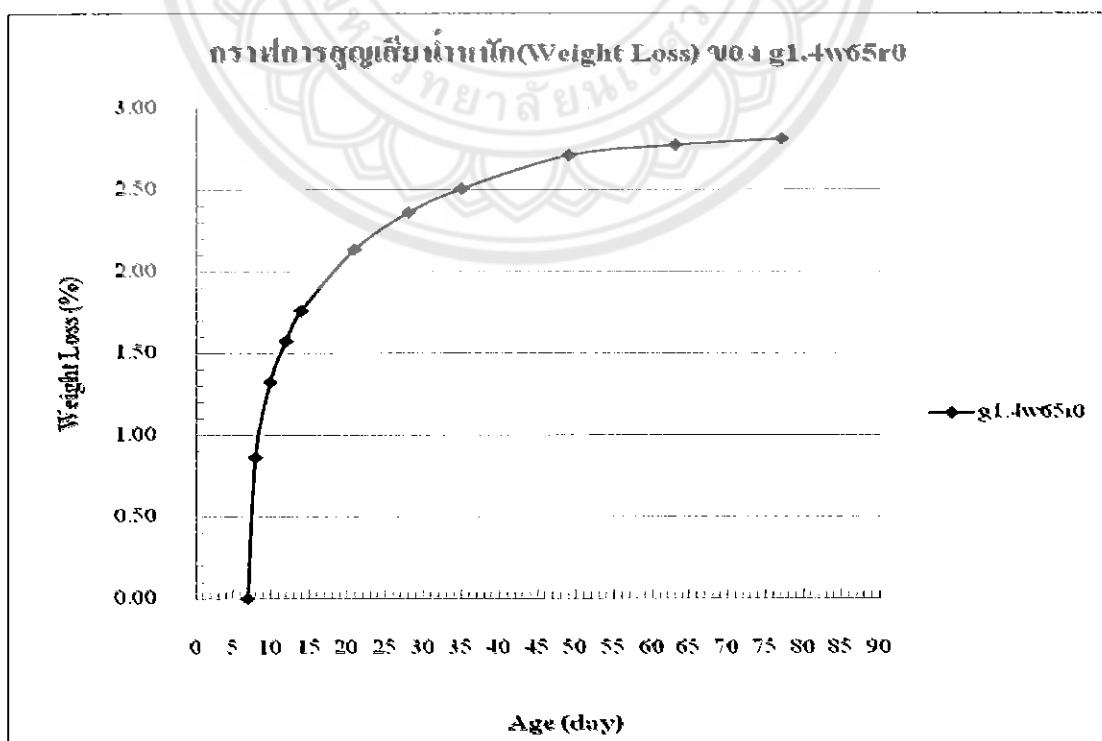
รูปที่ ข8 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r0



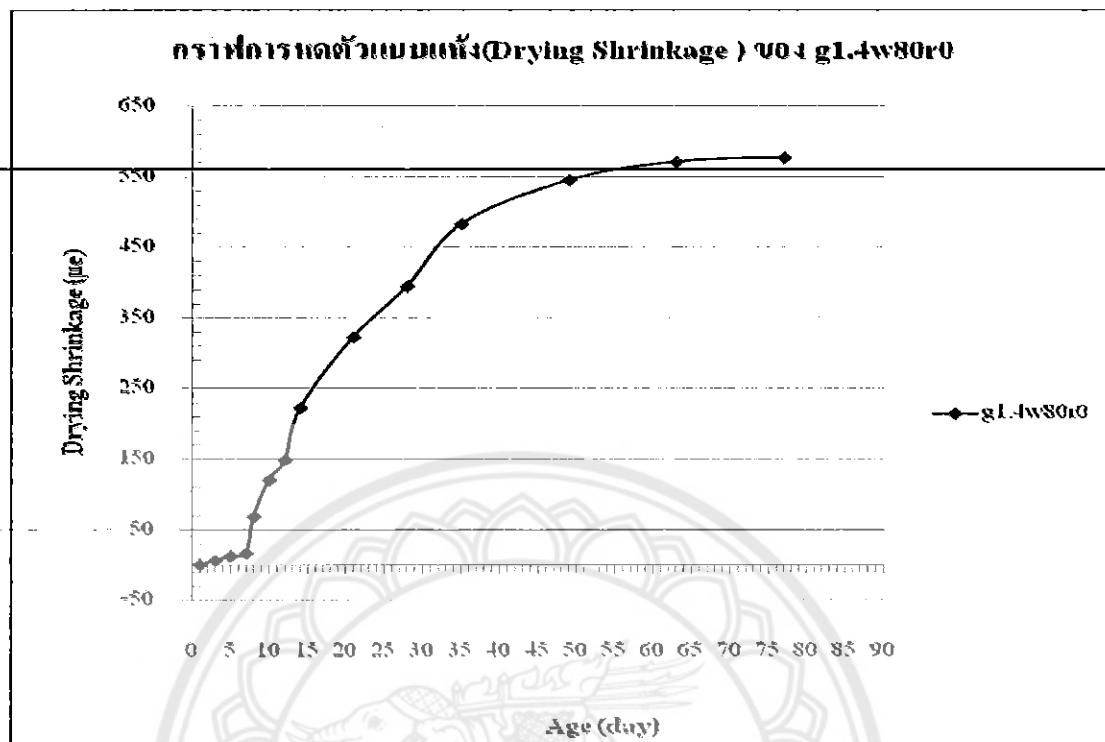
รูปที่ ข9 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w65r0



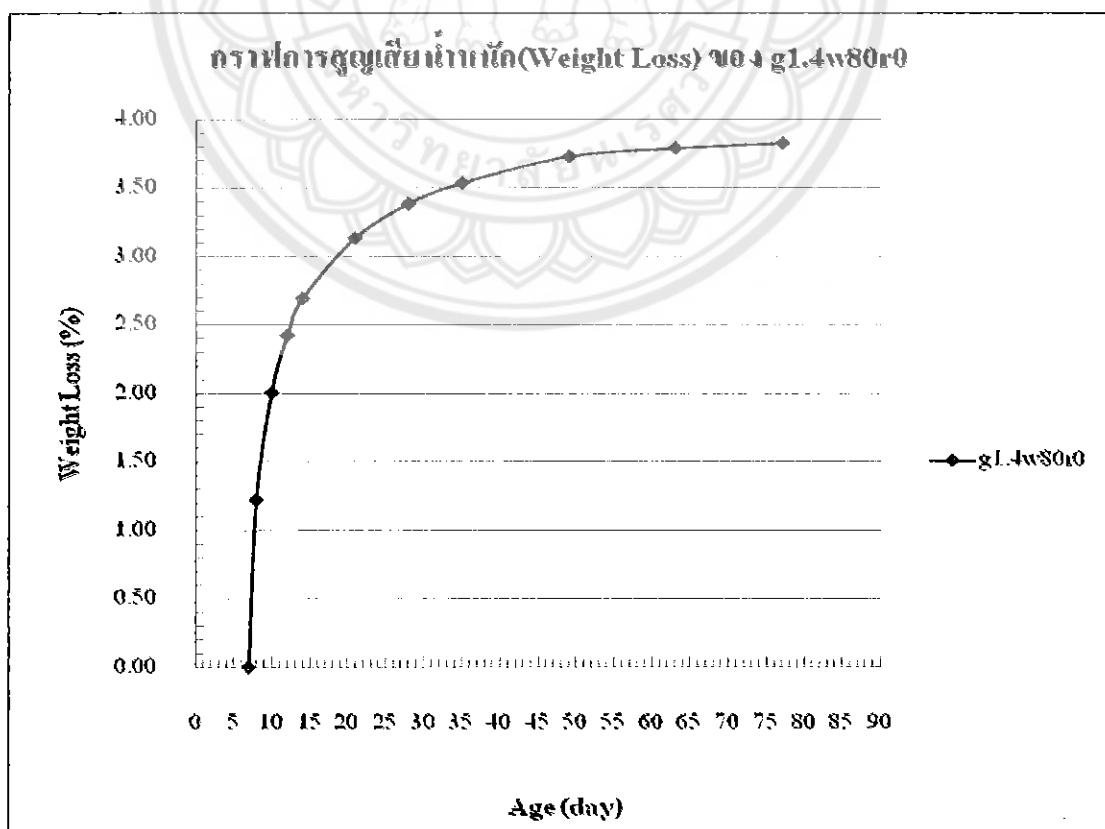
รูปที่ ข10 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w65r0



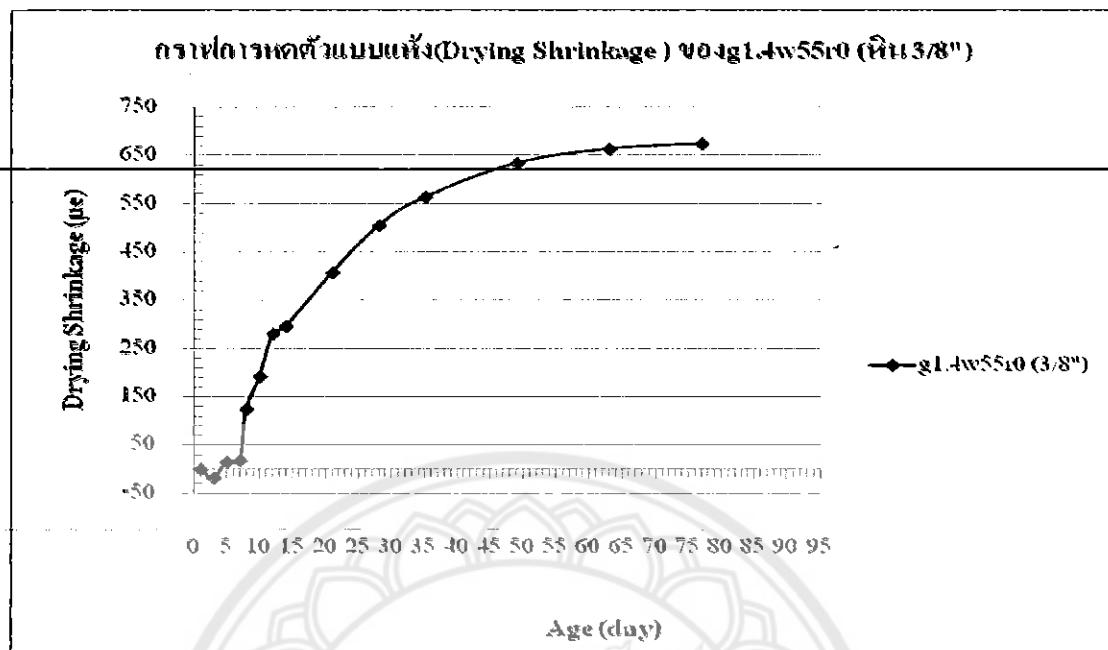
รูปที่ ข11 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w80r0



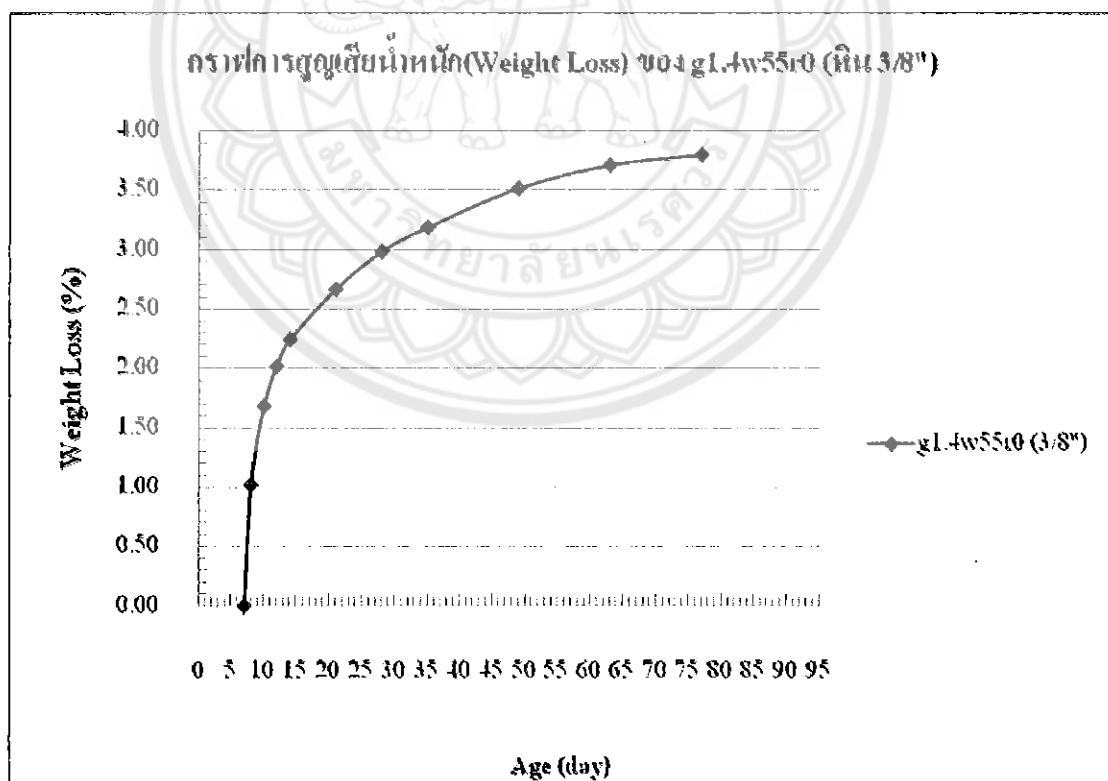
รูปที่ ข12 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w80r0



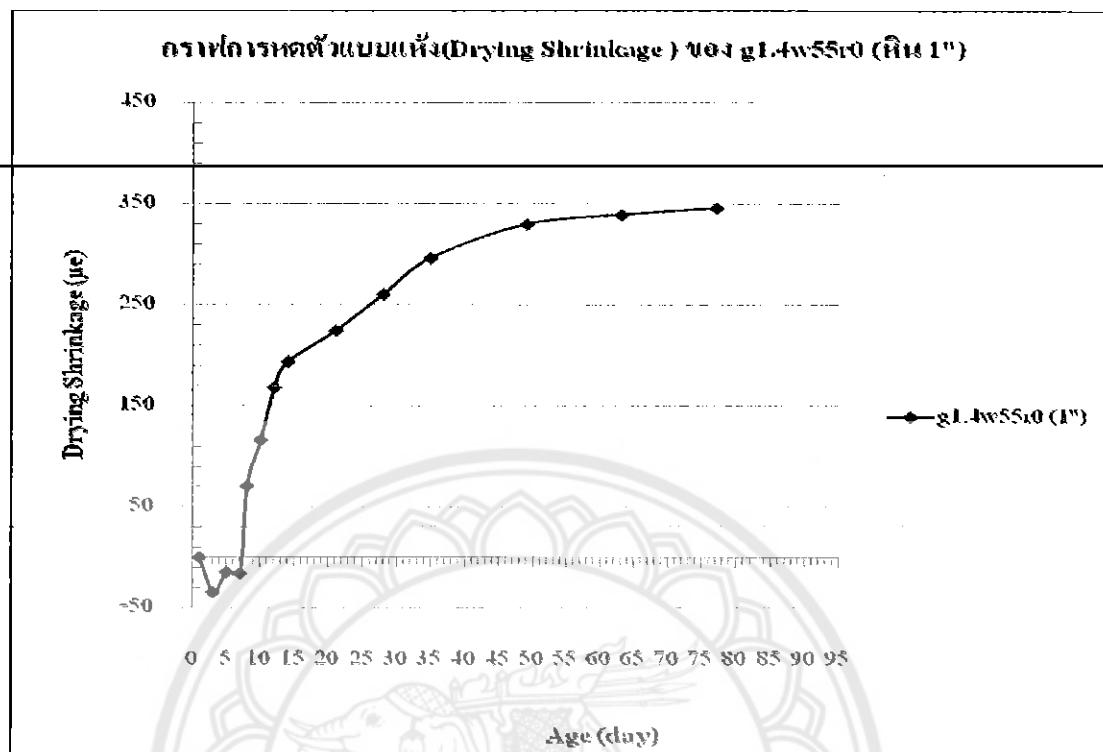
รูปที่ ข13 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r0 (หิน 3/8")



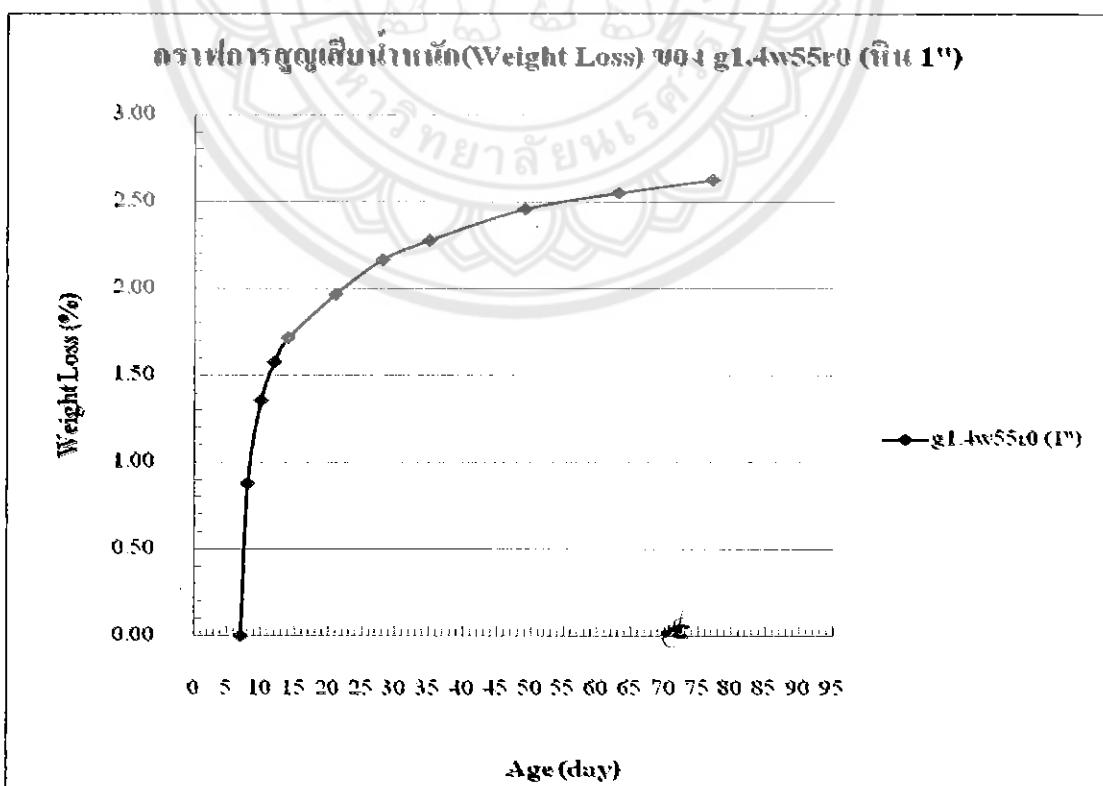
รูปที่ ข14 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r0 (หิน 3/8")



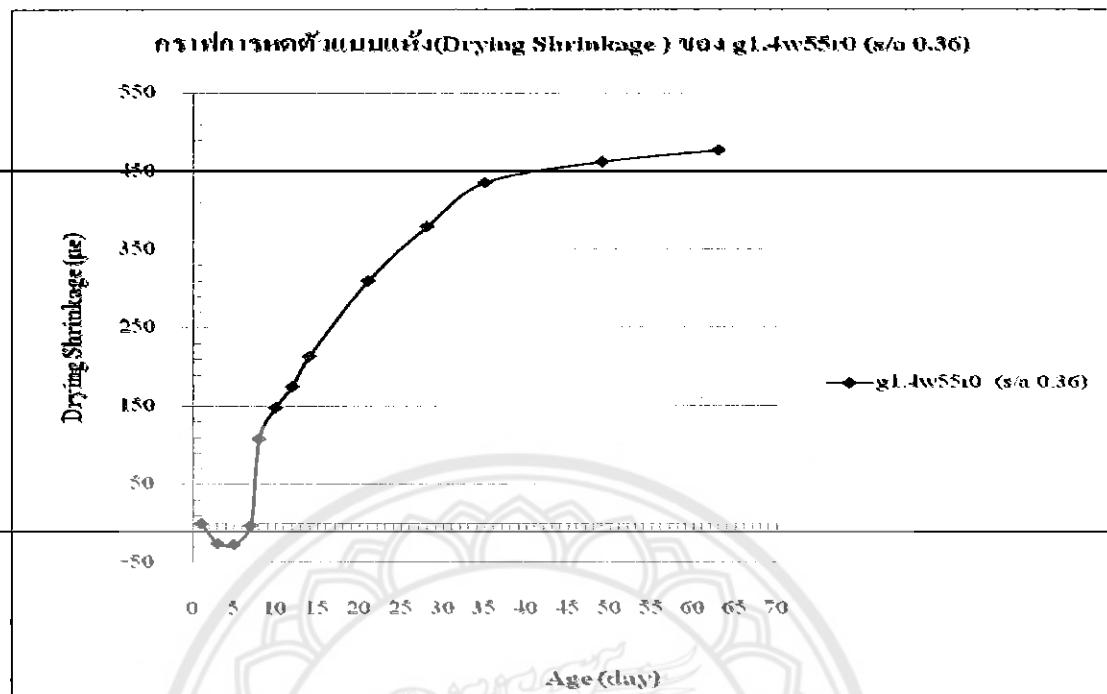
รูปที่ ข15 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r0 (หิน 1")



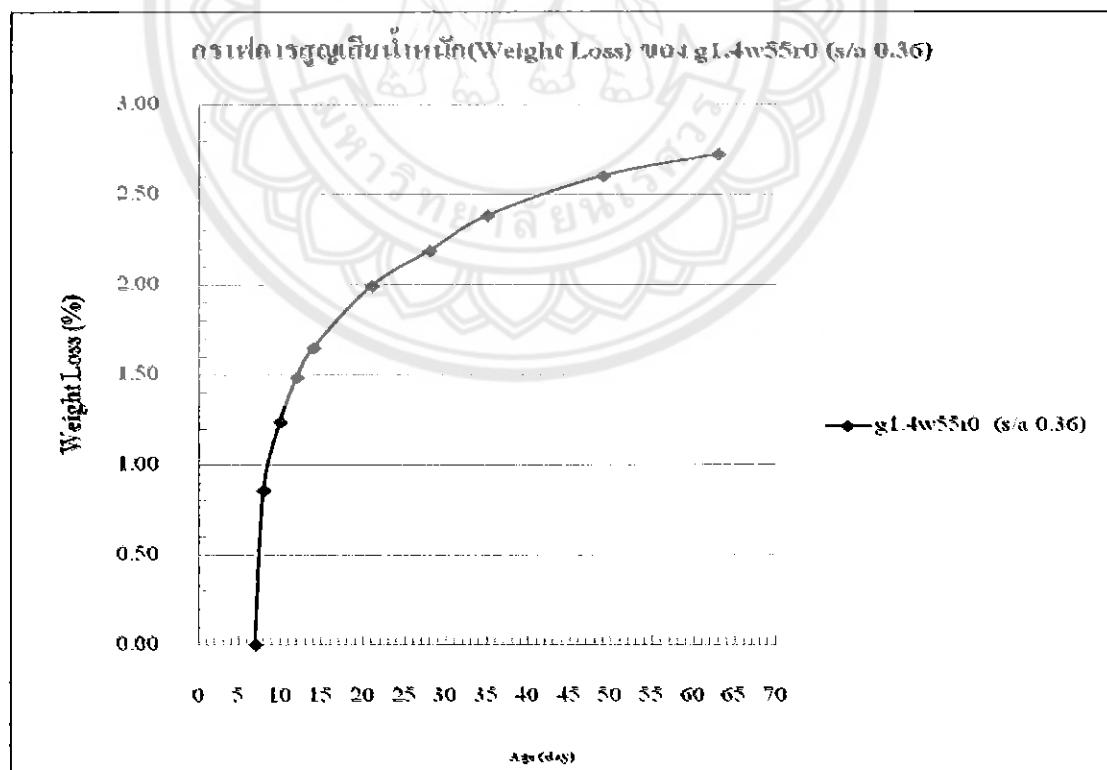
รูปที่ ข16 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r0 (หิน 1")



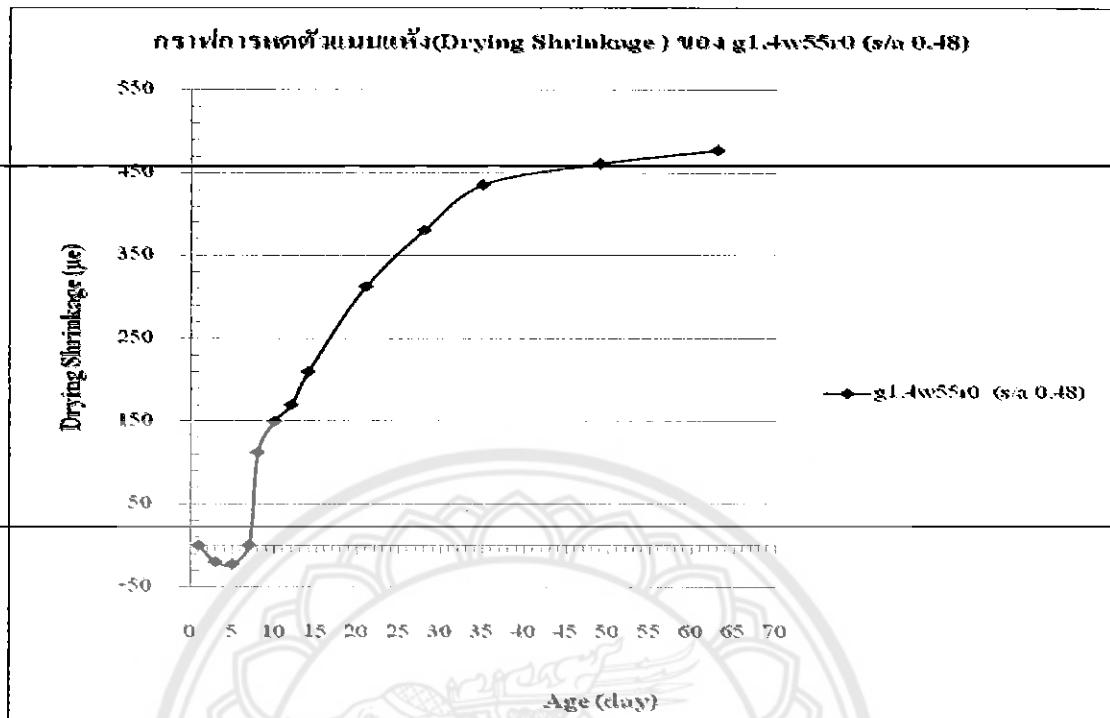
รูปที่ ข17 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r0 (s/a 0.36)



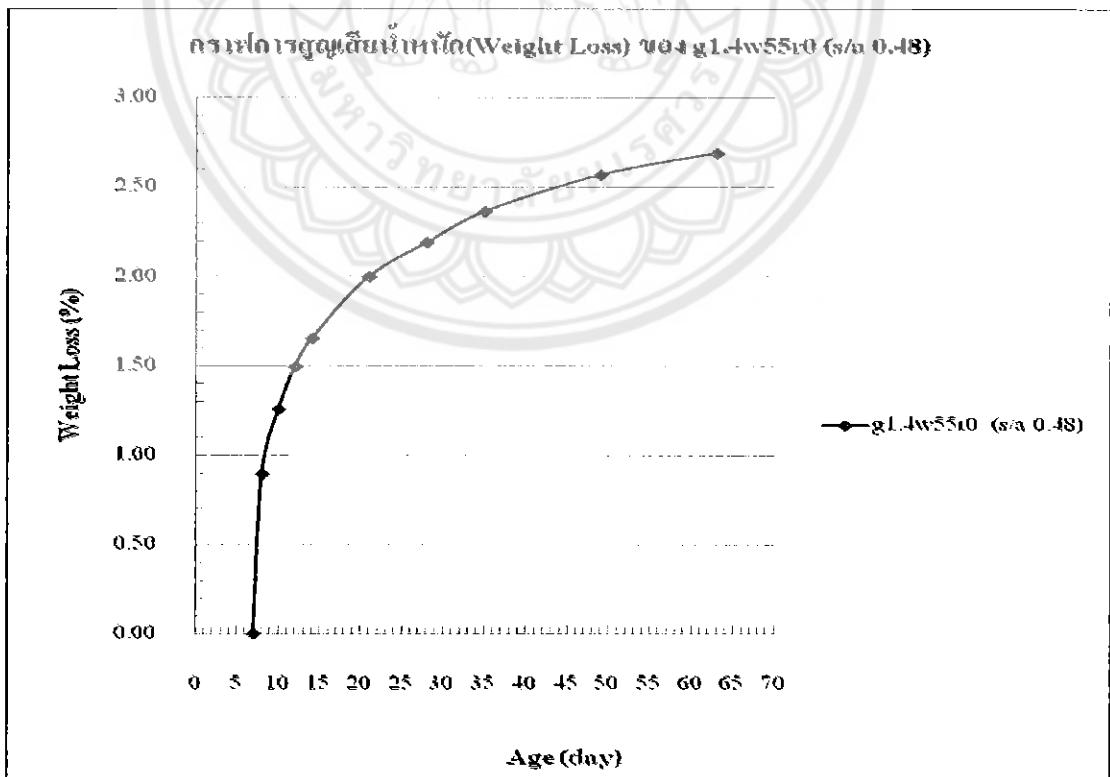
รูปที่ ข18 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r0 (s/a 0.36)



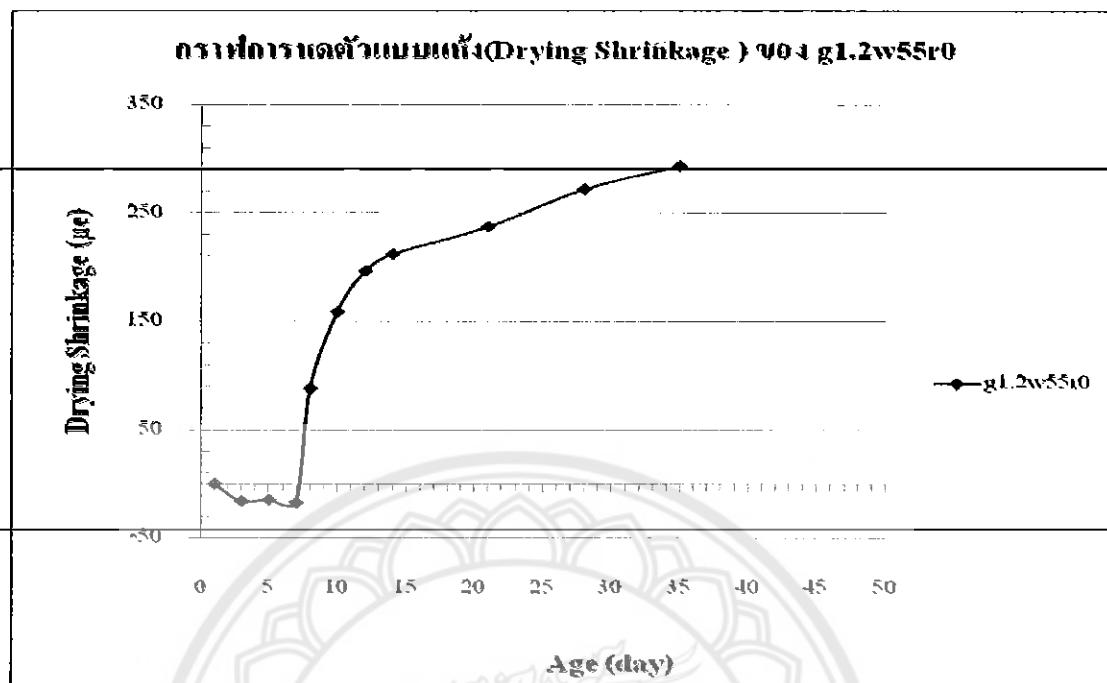
รูปที่ ข19 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r0 (S/A 0.48)



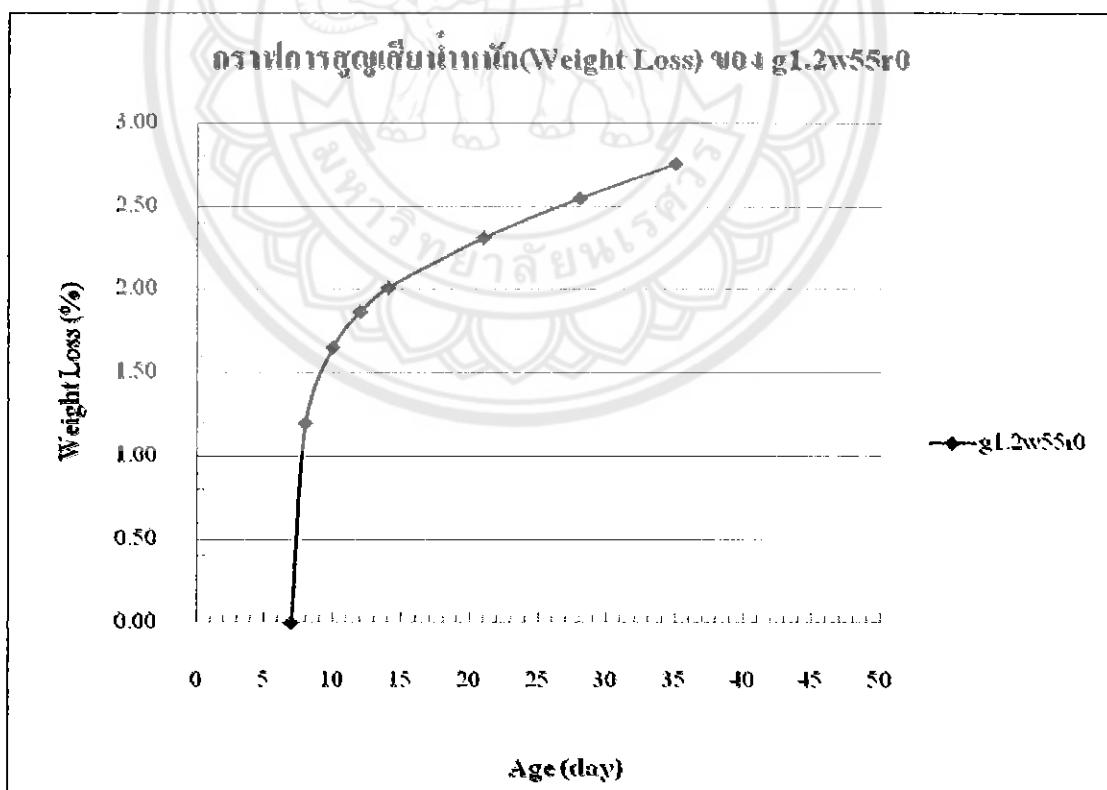
รูปที่ ข20 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r0 (S/A 0.48)



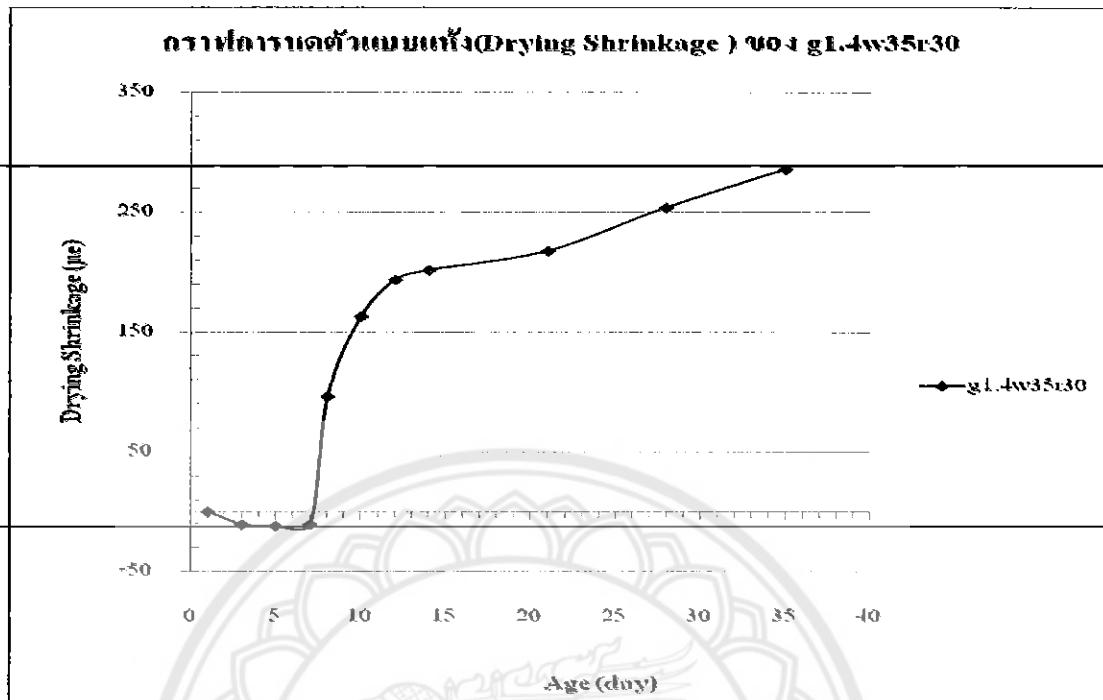
รูปที่ ข21 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.2w55r0



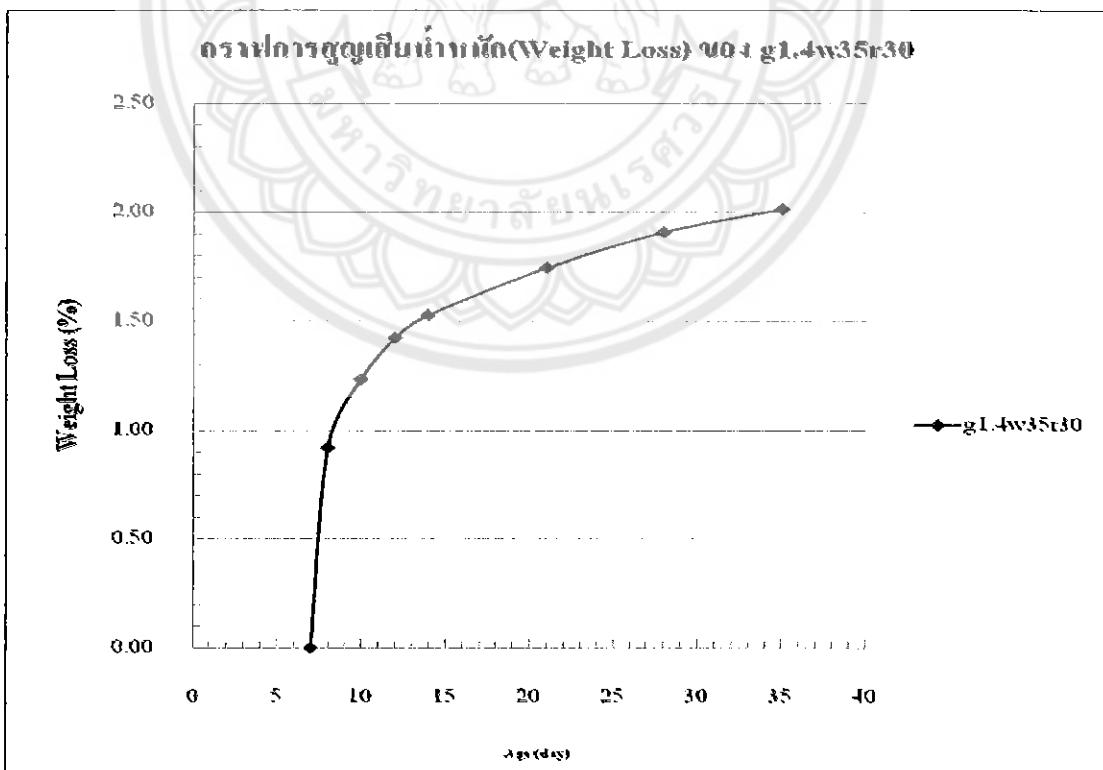
รูปที่ ข22 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.2w55r0



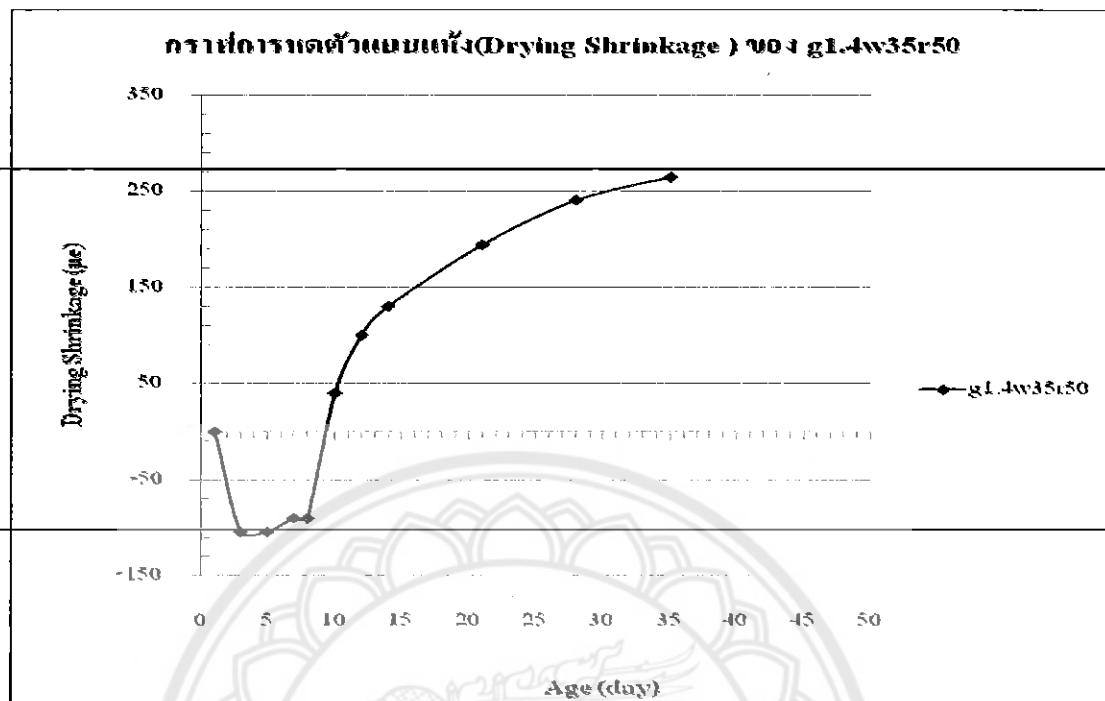
รูปที่ ข23 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w35r30



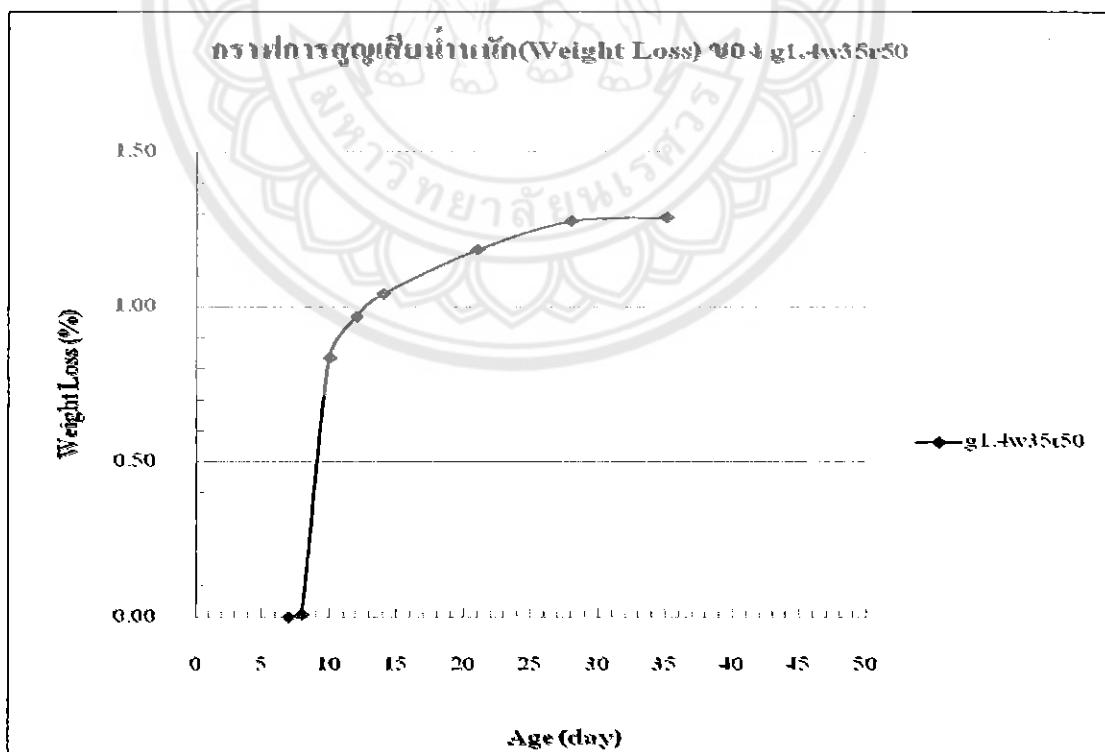
รูปที่ ข24 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w35r30



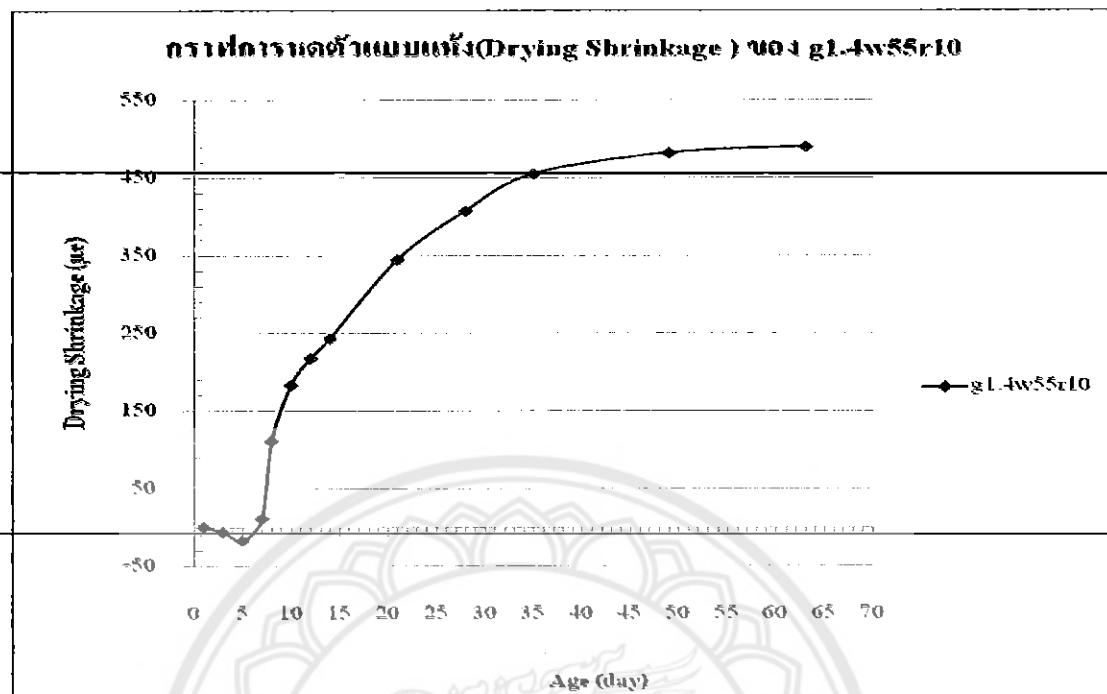
รูปที่ ข25 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w35r50



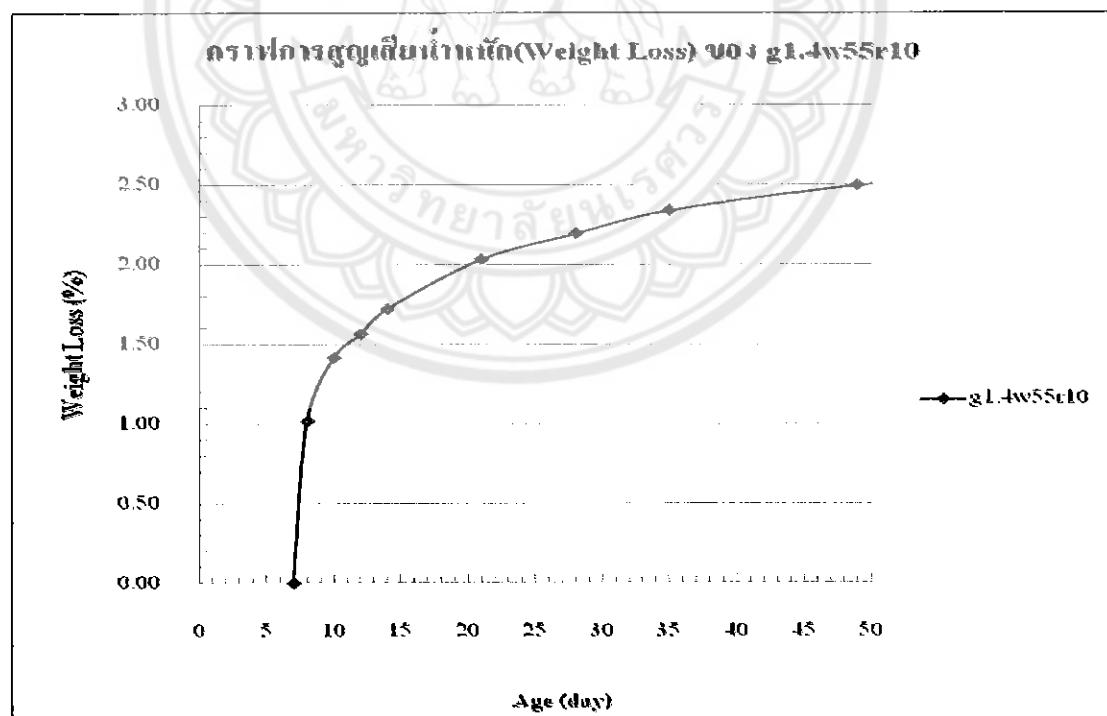
รูปที่ ข26 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w35r50



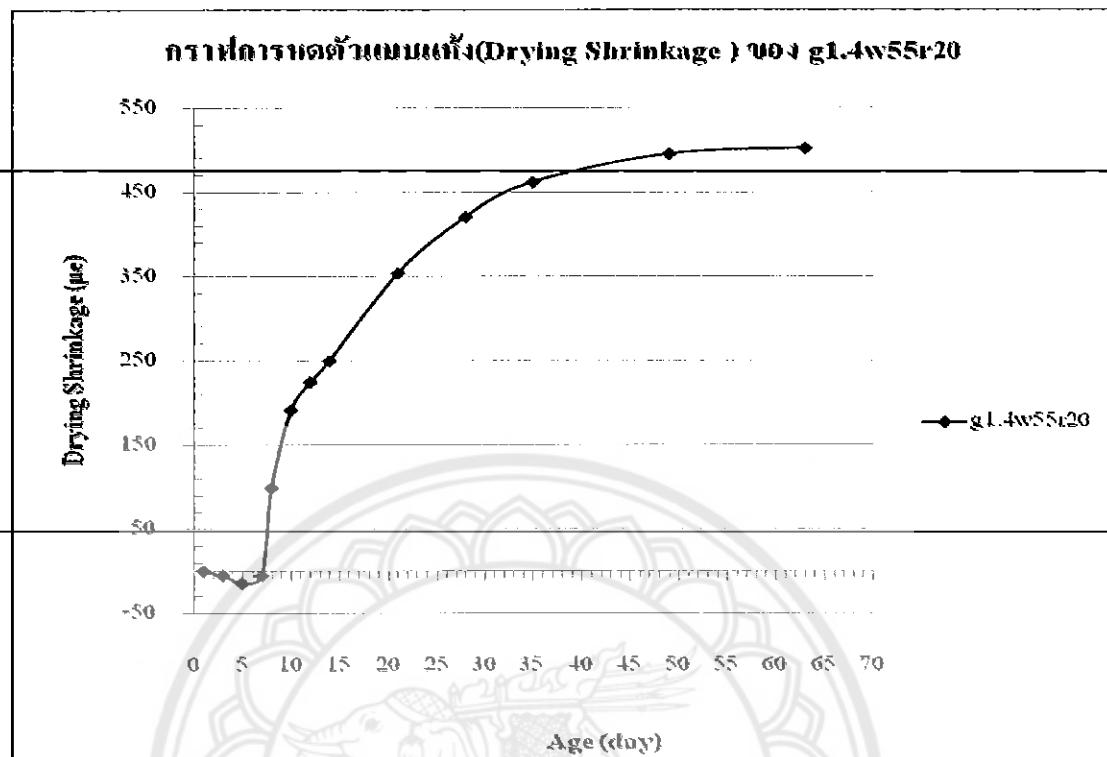
รูปที่ ข27 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r10



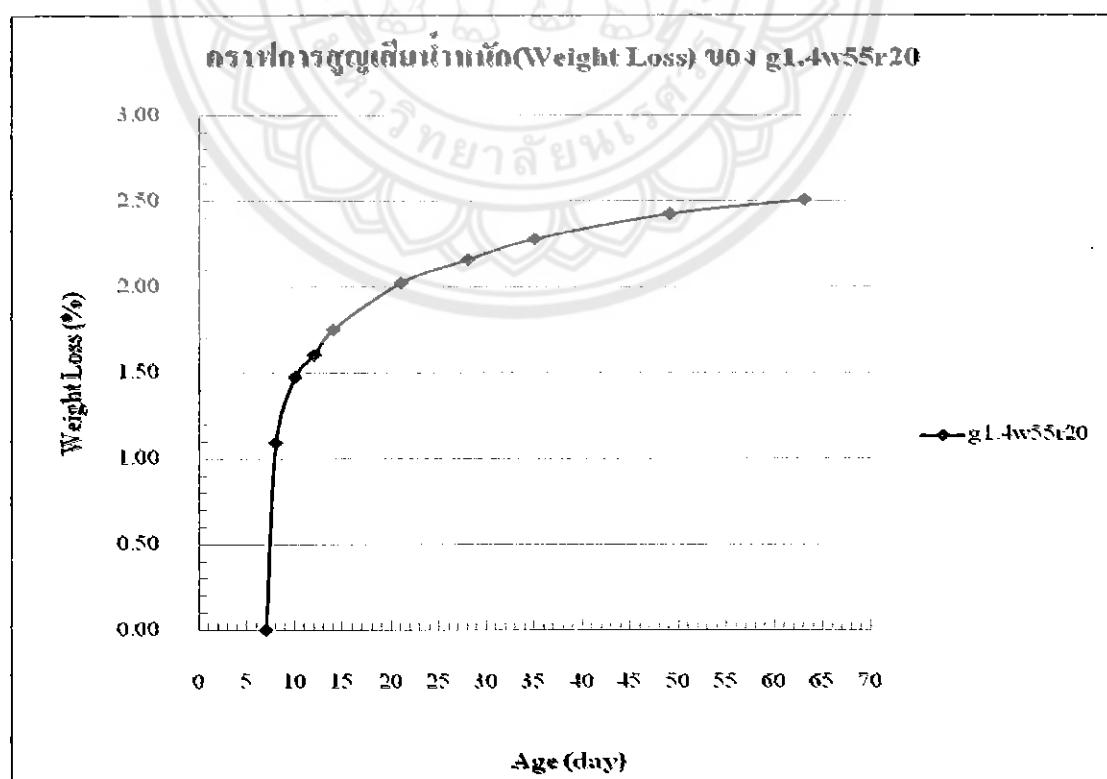
รูปที่ ข28 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r10



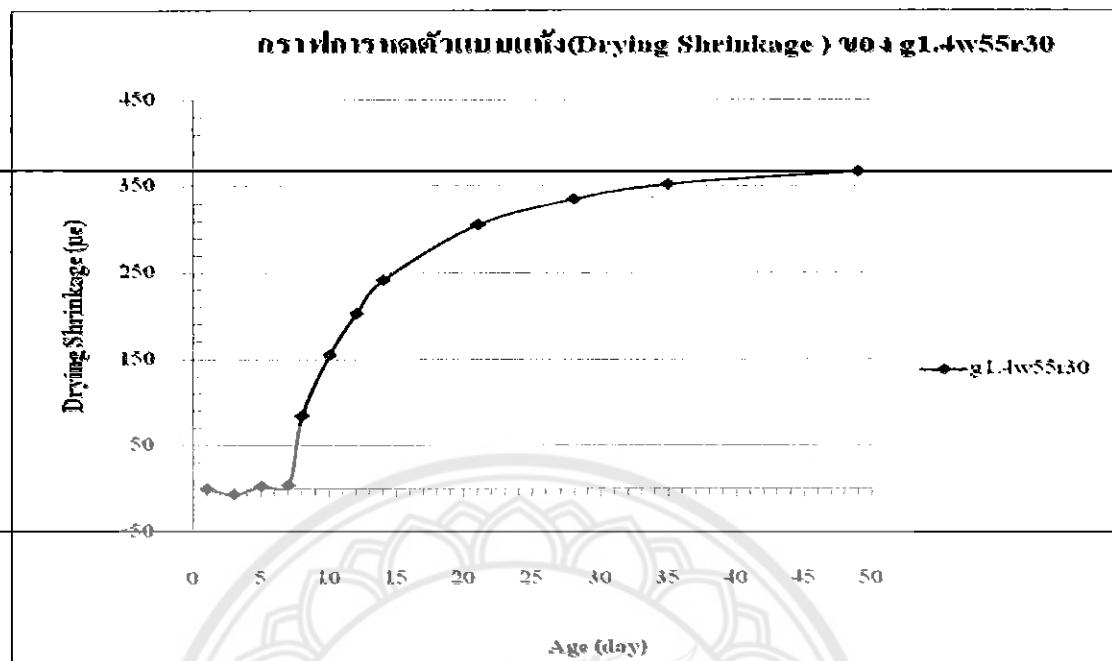
รูปที่ ข29 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r20



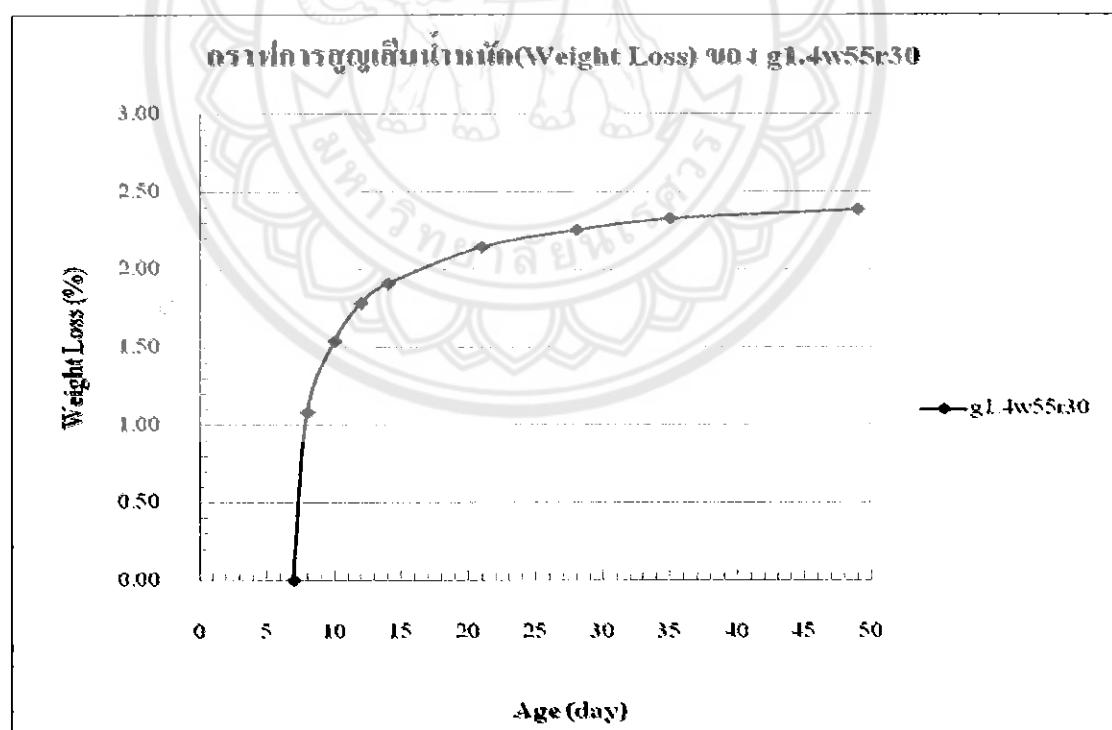
รูปที่ ข30 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r20



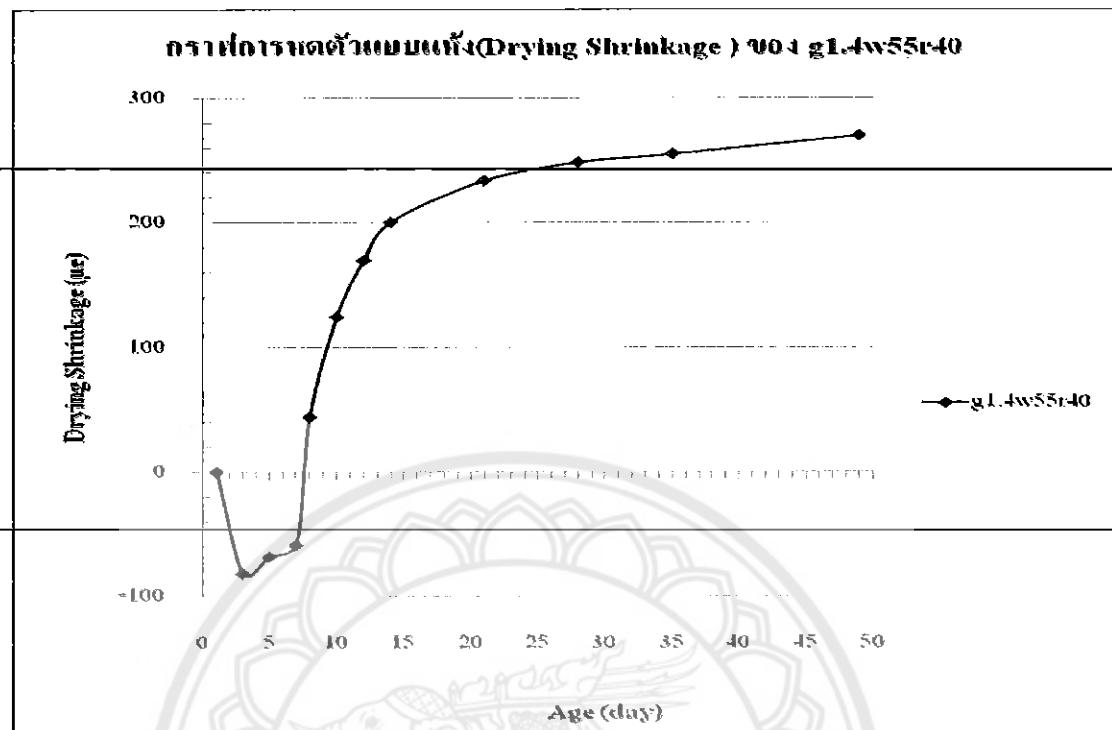
รูปที่ ข31 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r30



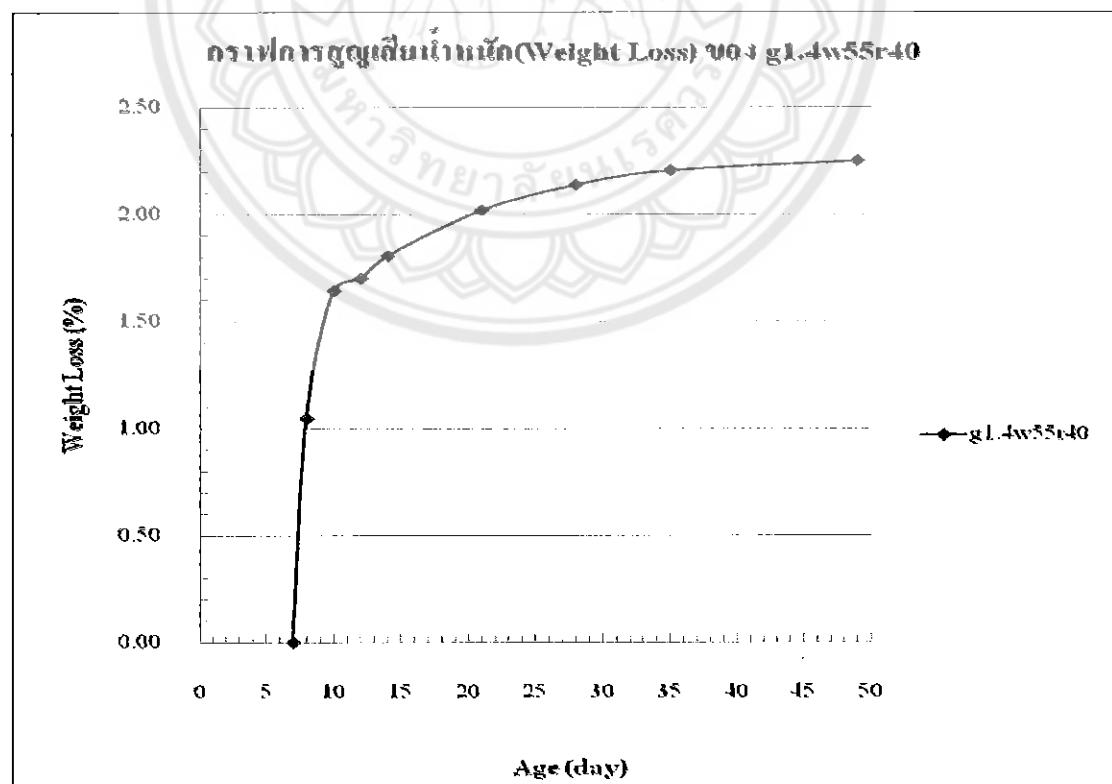
รูปที่ ข32 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r30



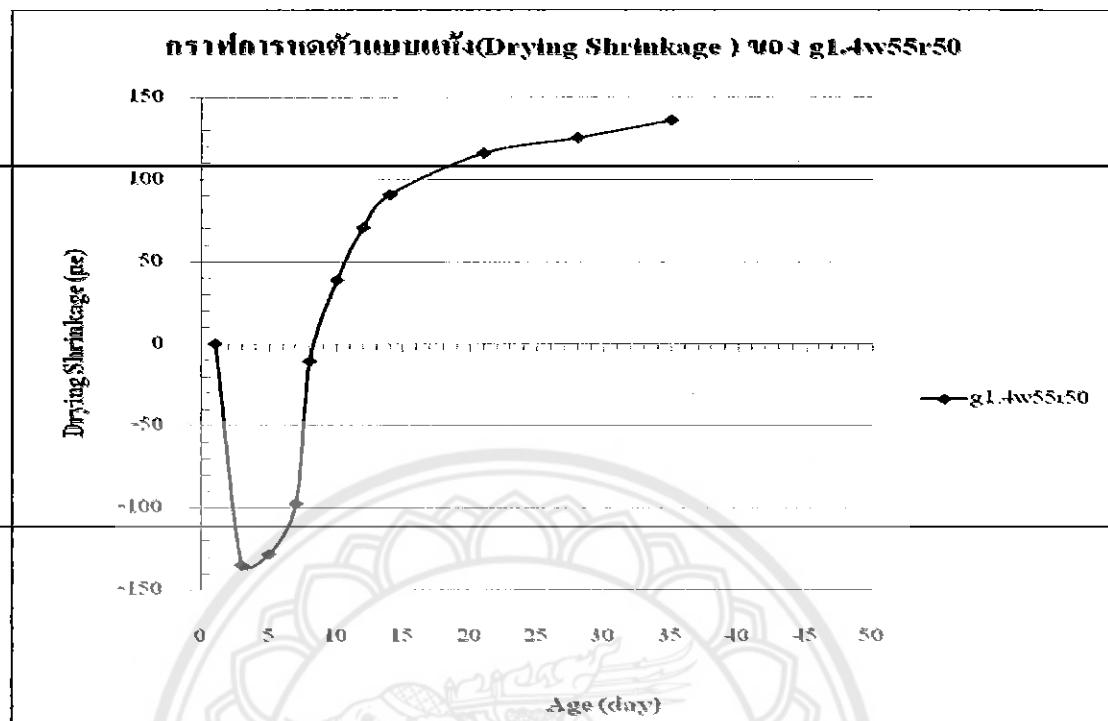
รูปที่ ข33 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r40



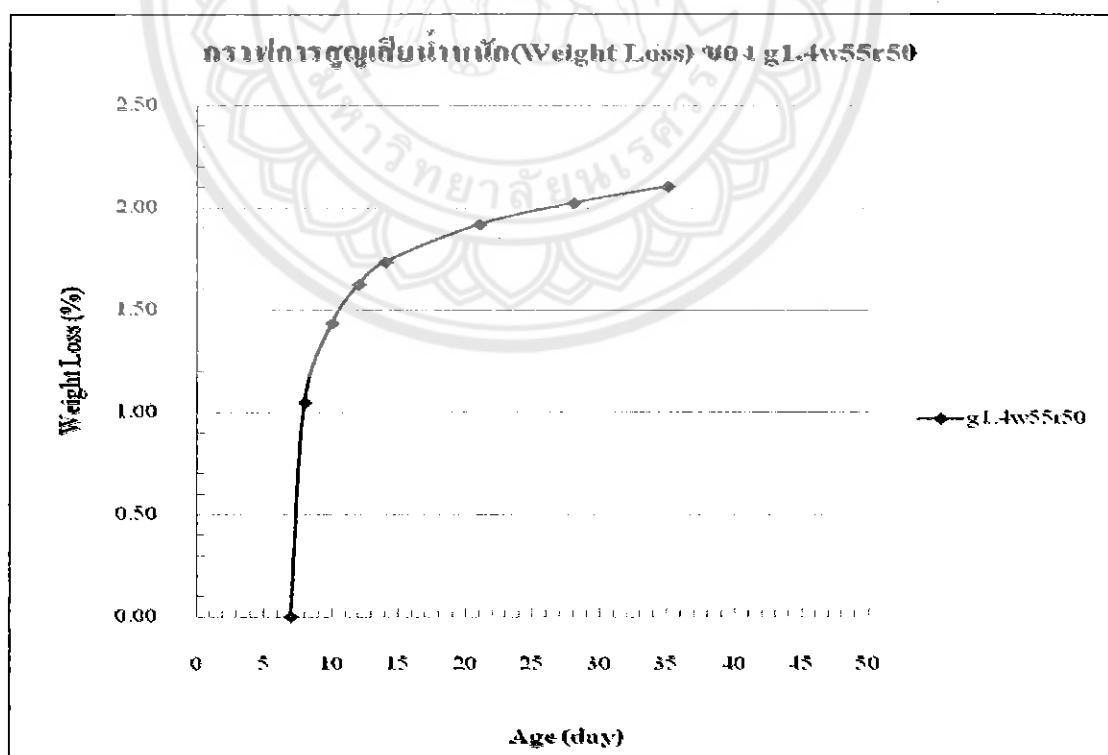
รูปที่ ข34 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r40



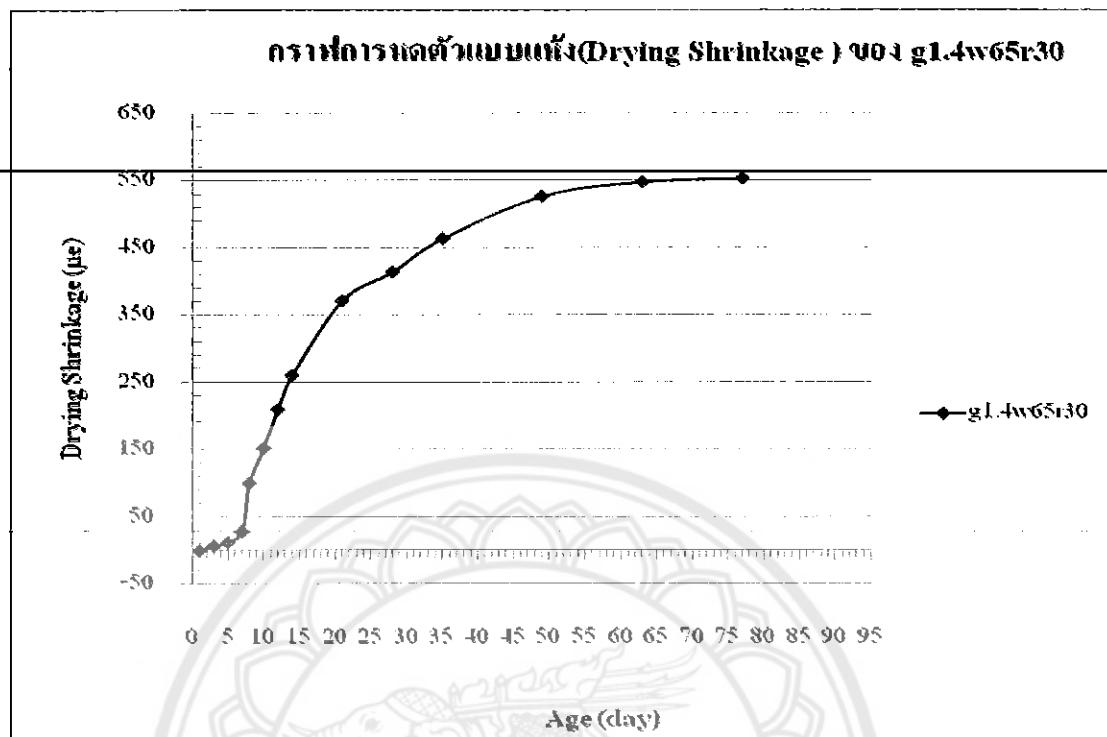
รูปที่ ข35 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r50



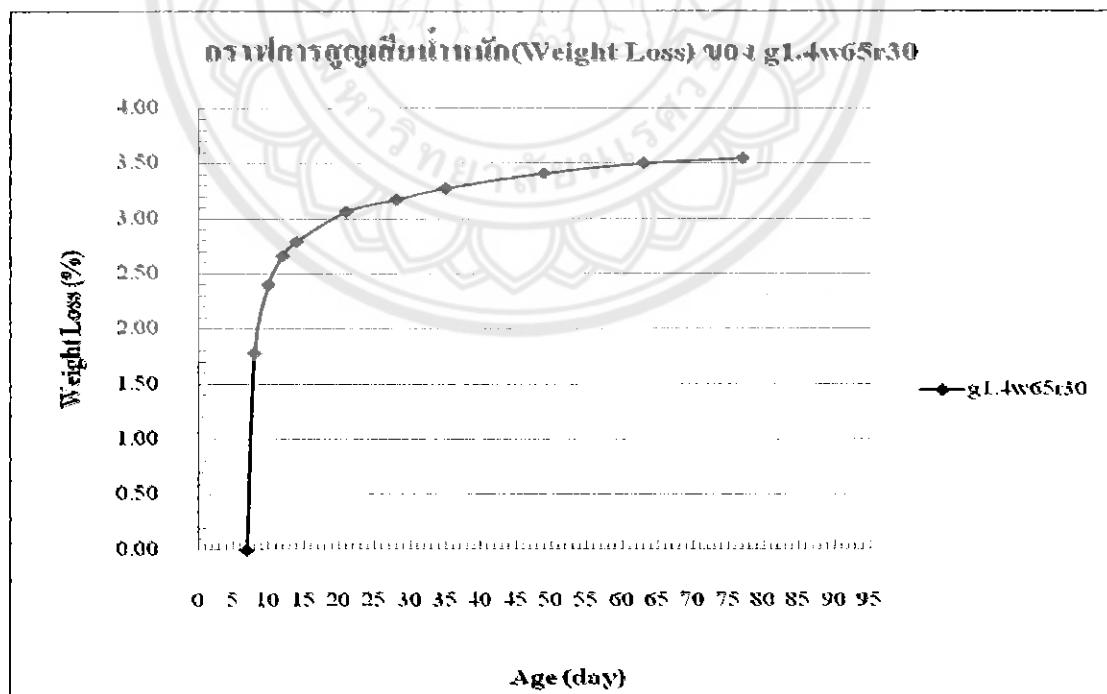
รูปที่ ข36 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r50



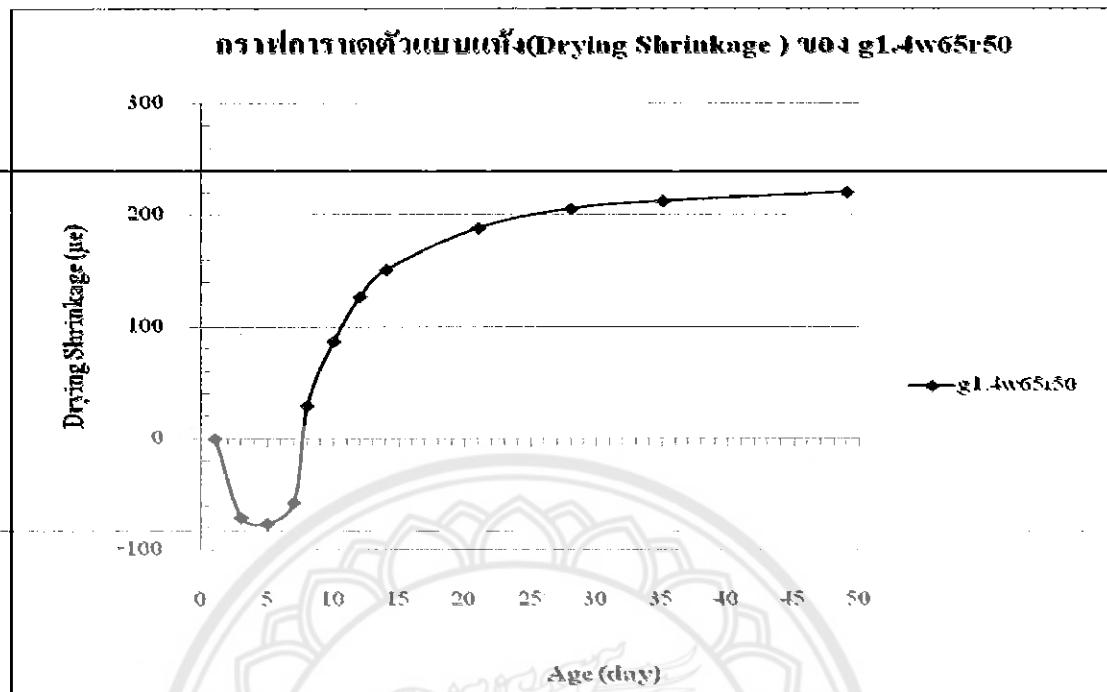
รูปที่ ข37 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w65r30



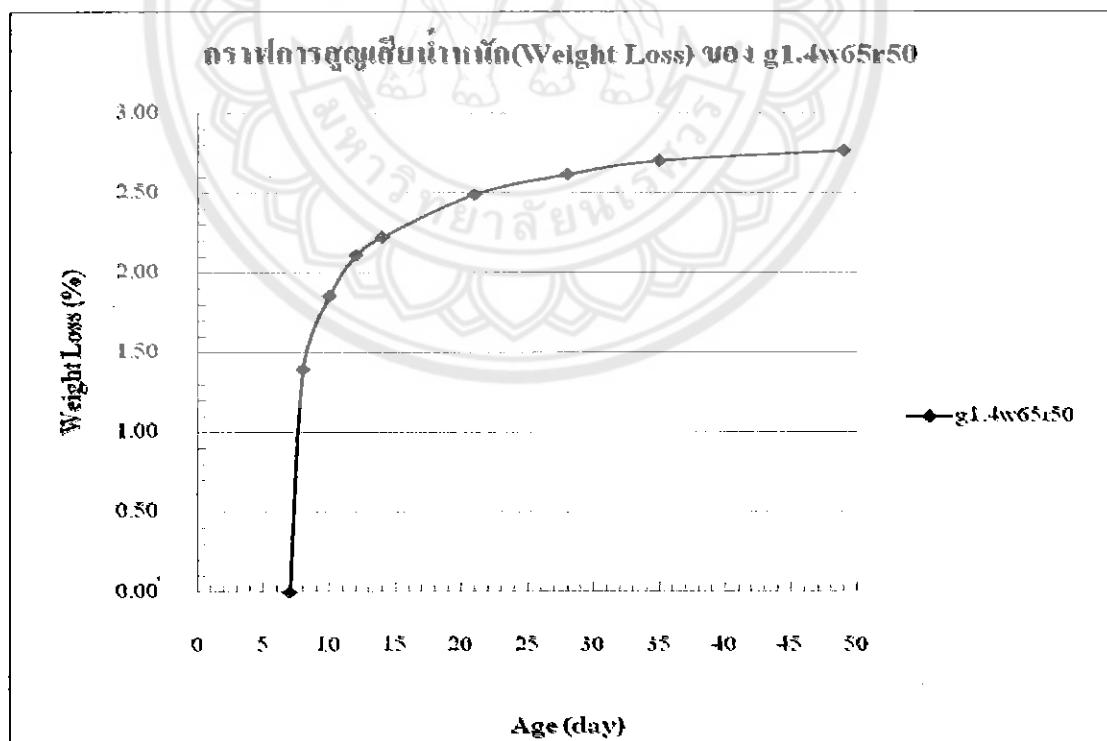
รูปที่ ข38 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w65r30



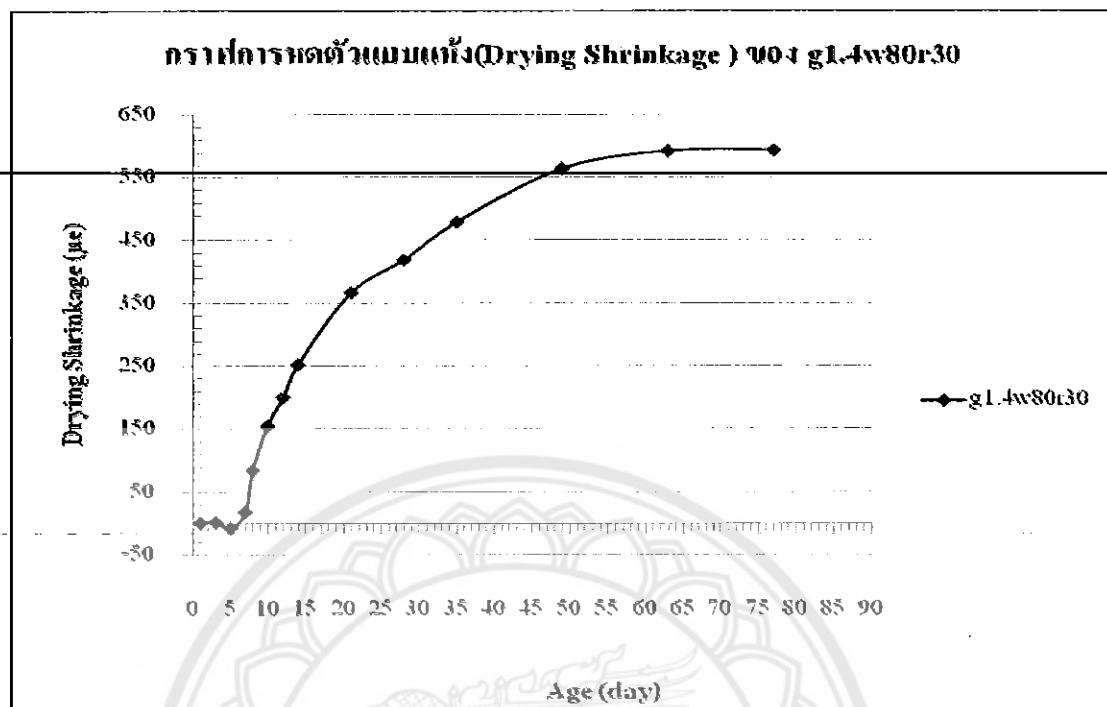
รูปที่ ข39 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w65r50



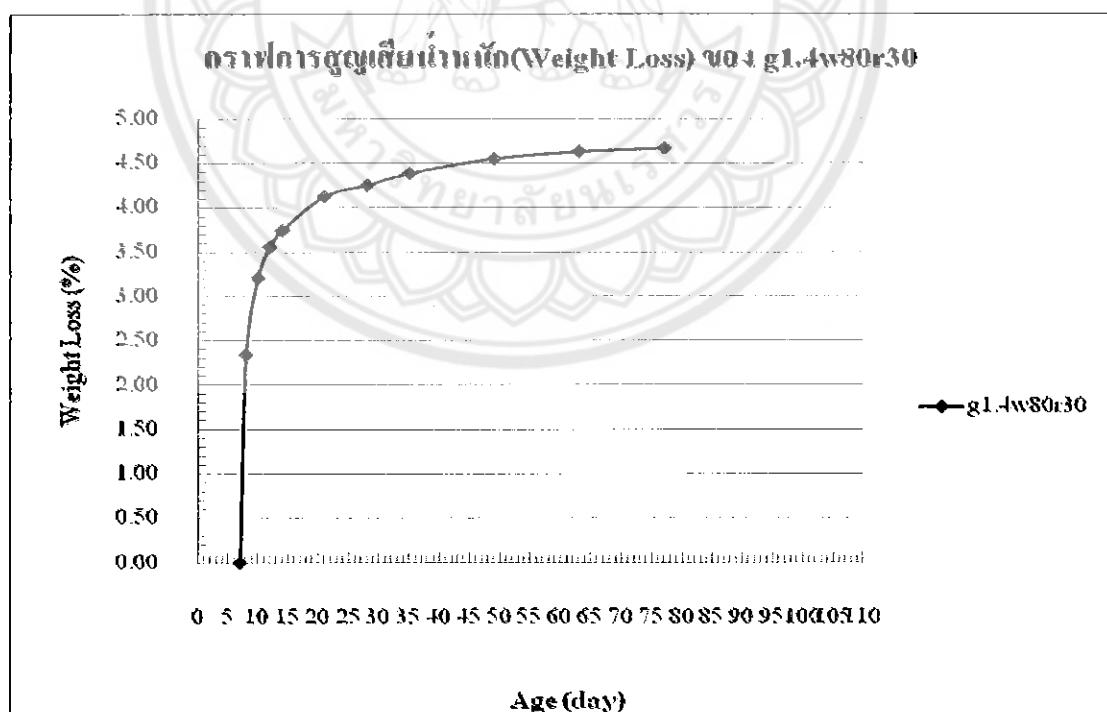
รูปที่ ข40 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w65r50



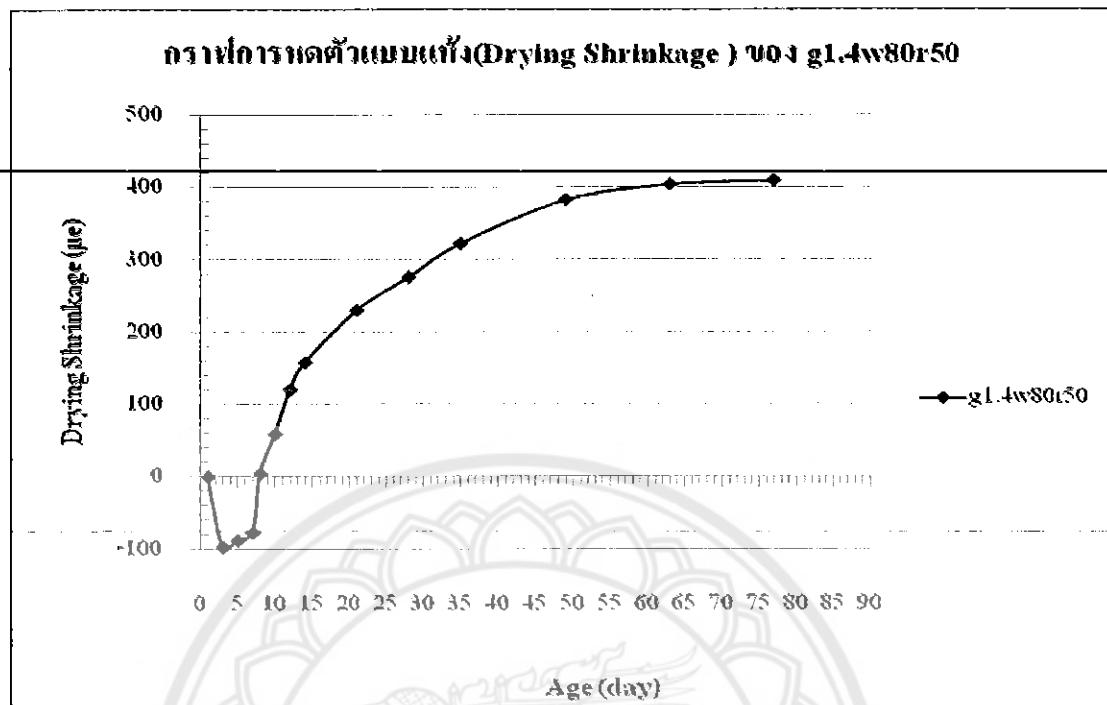
รูปที่ ข41 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w80r30



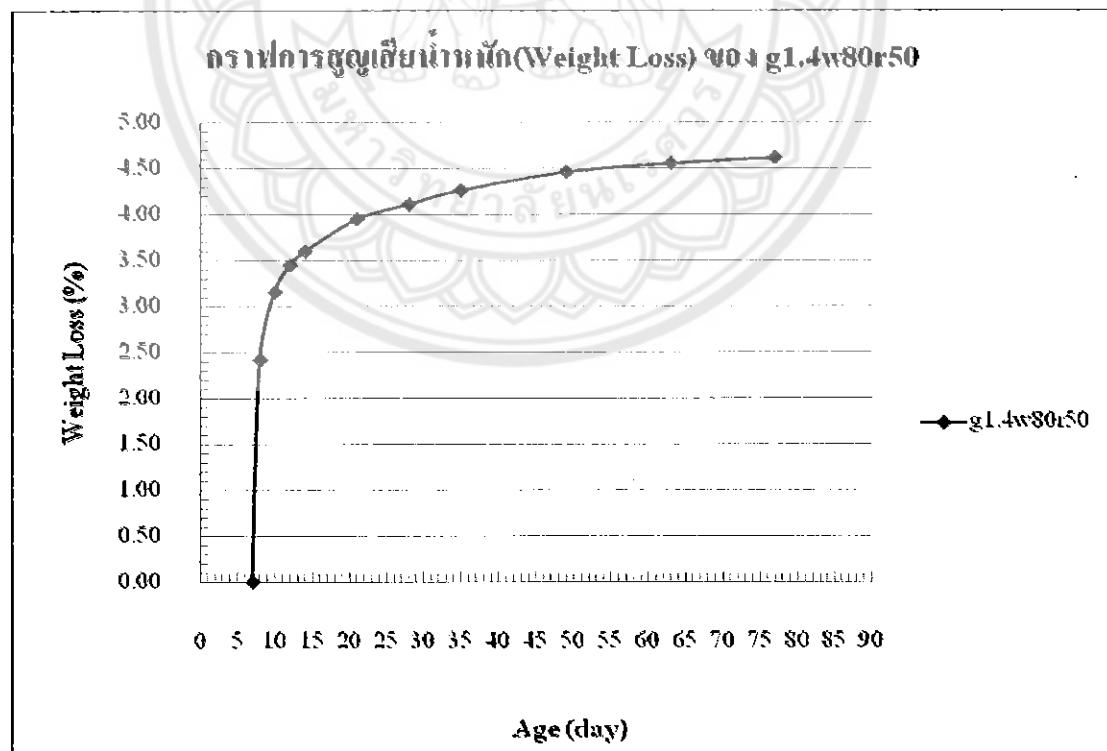
รูปที่ ข42 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w80r30



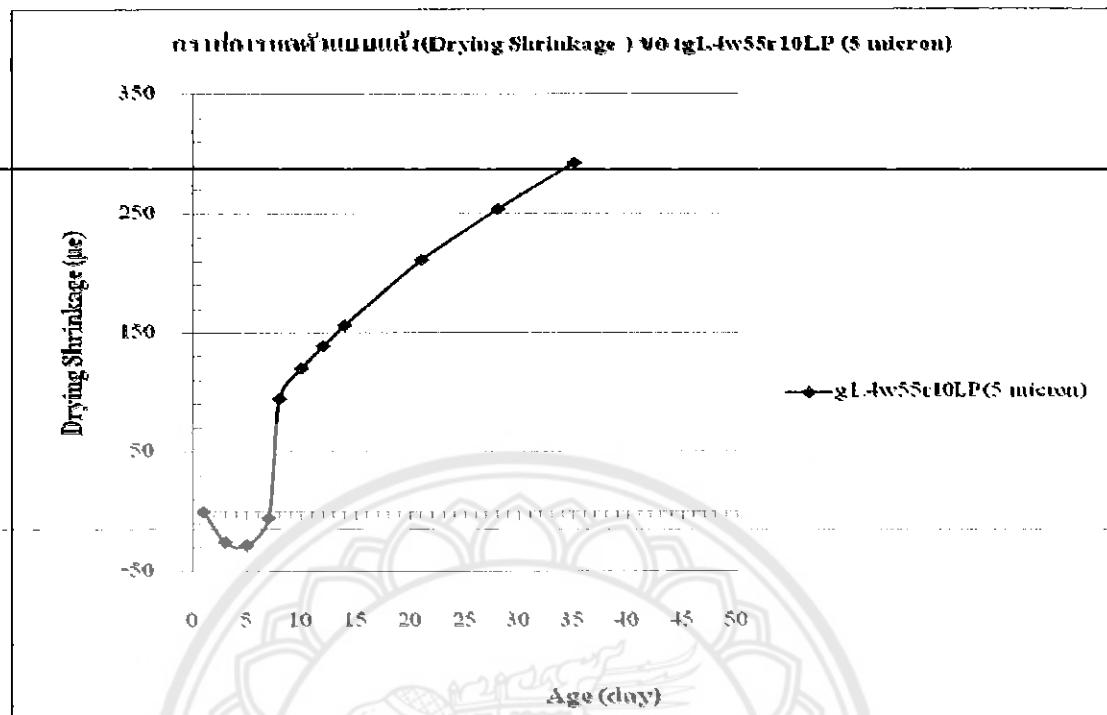
รูปที่ ข43 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w80r50



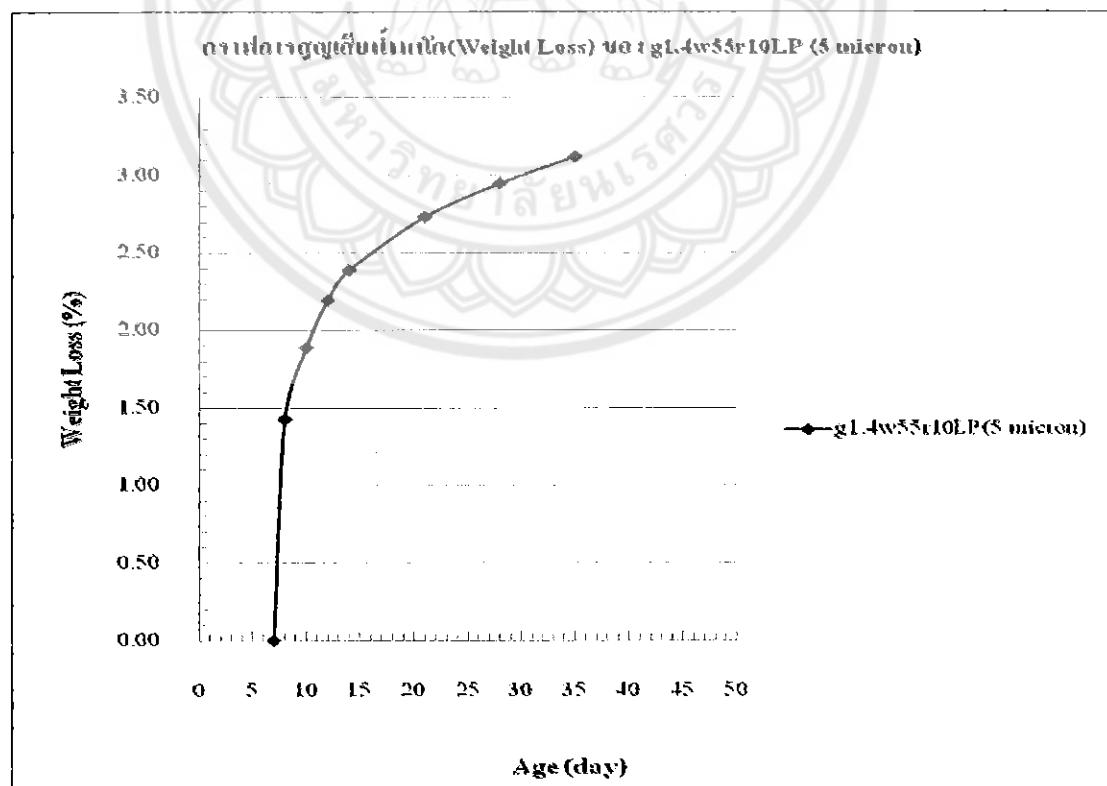
รูปที่ ข44 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w80r50



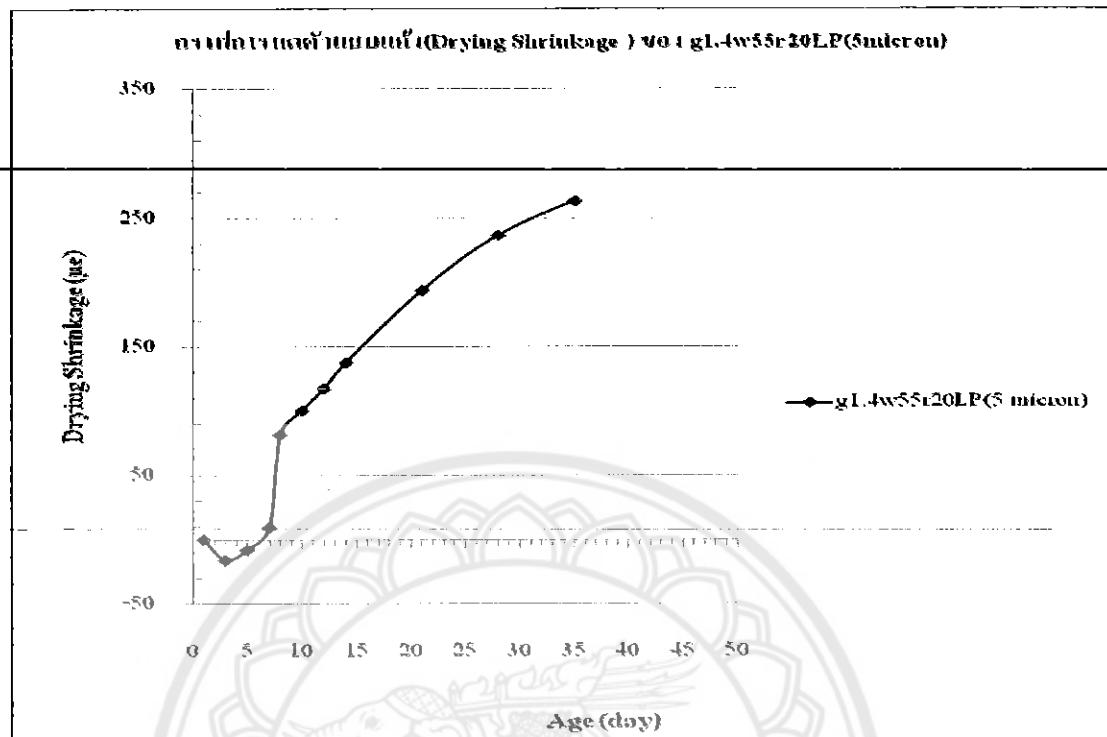
รูปที่ ข45 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r10LP (5 micron)



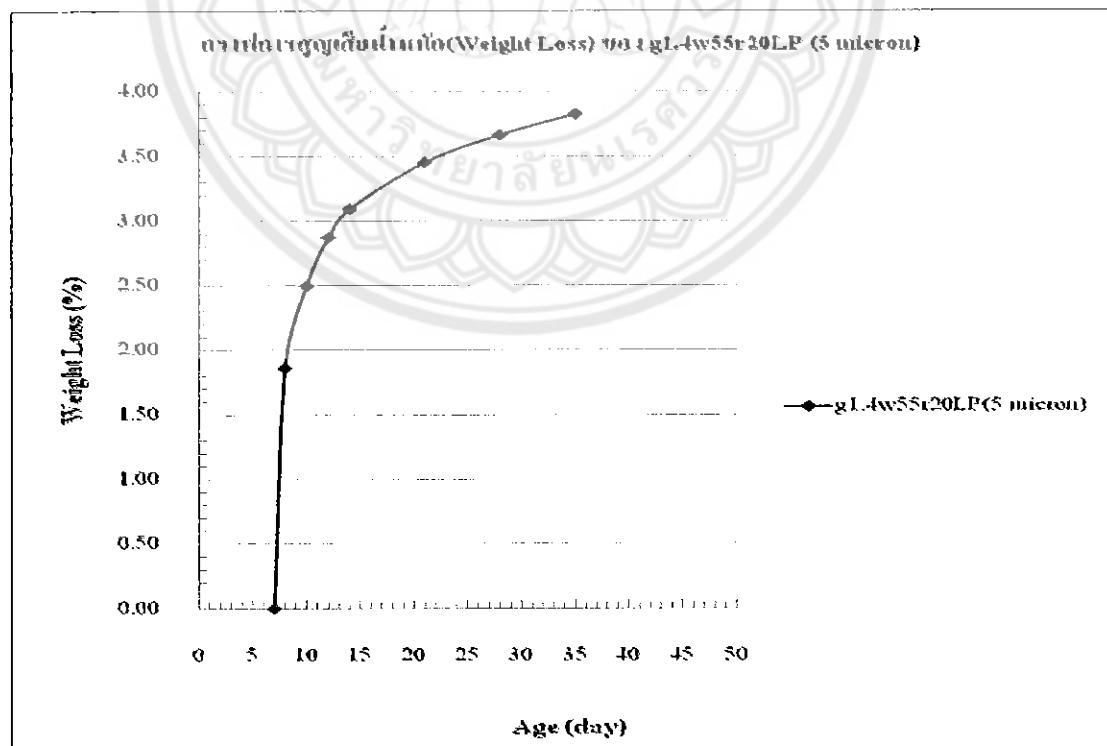
รูปที่ ข46 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r10LP (5 micron)



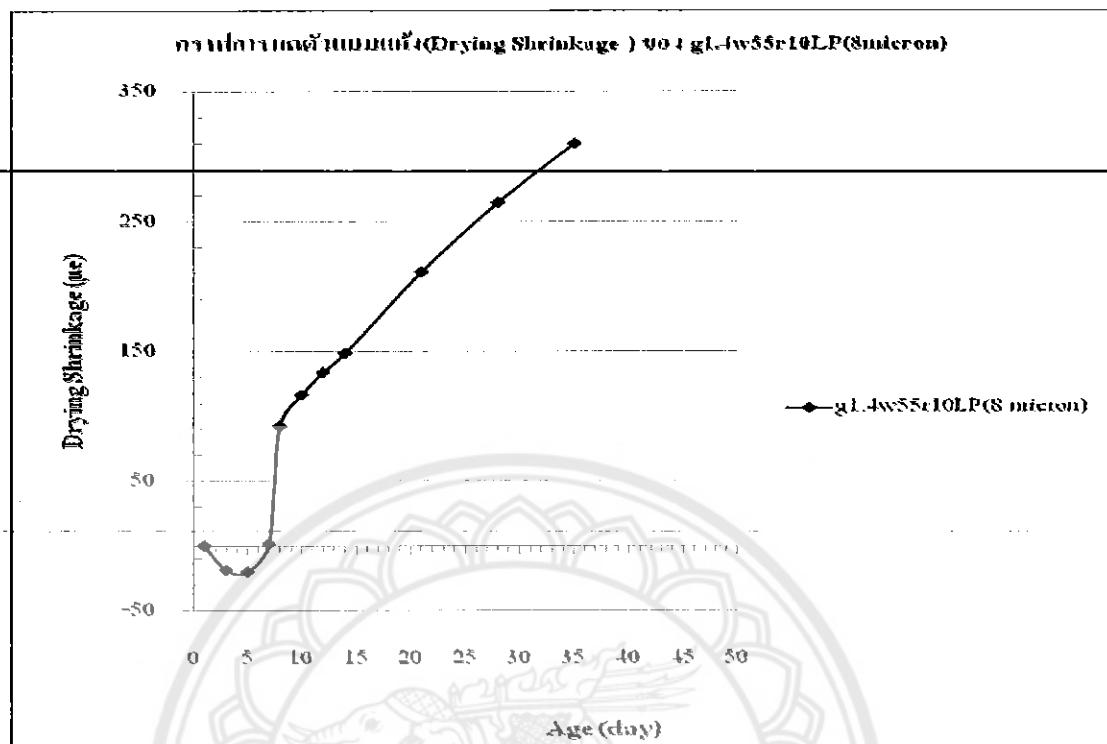
รูปที่ ข47 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r20LP (5 micron)



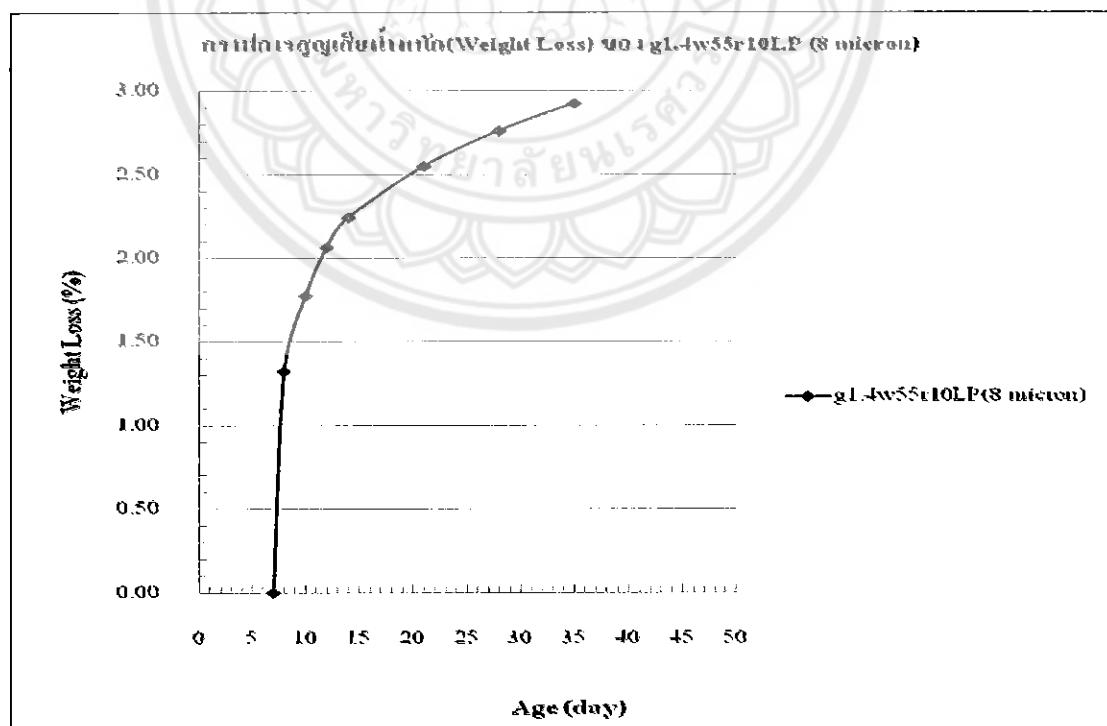
รูปที่ ข48 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r20LP (5 micron)



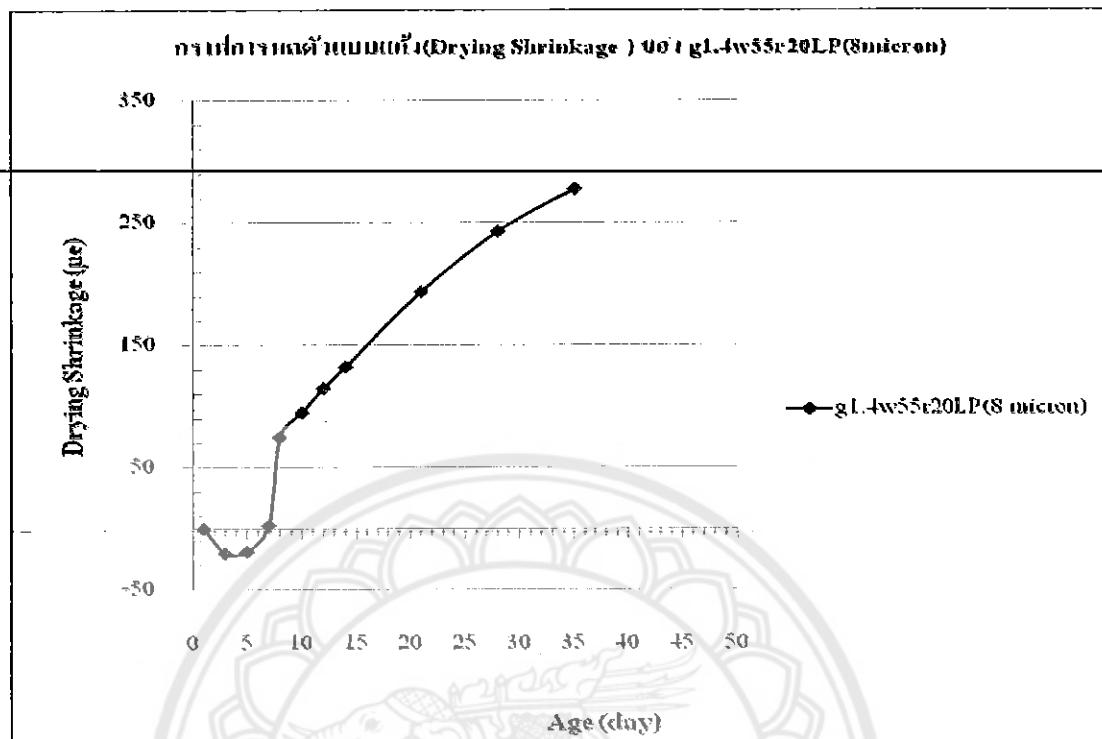
รูปที่ ข49 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r10LP (8 micron)



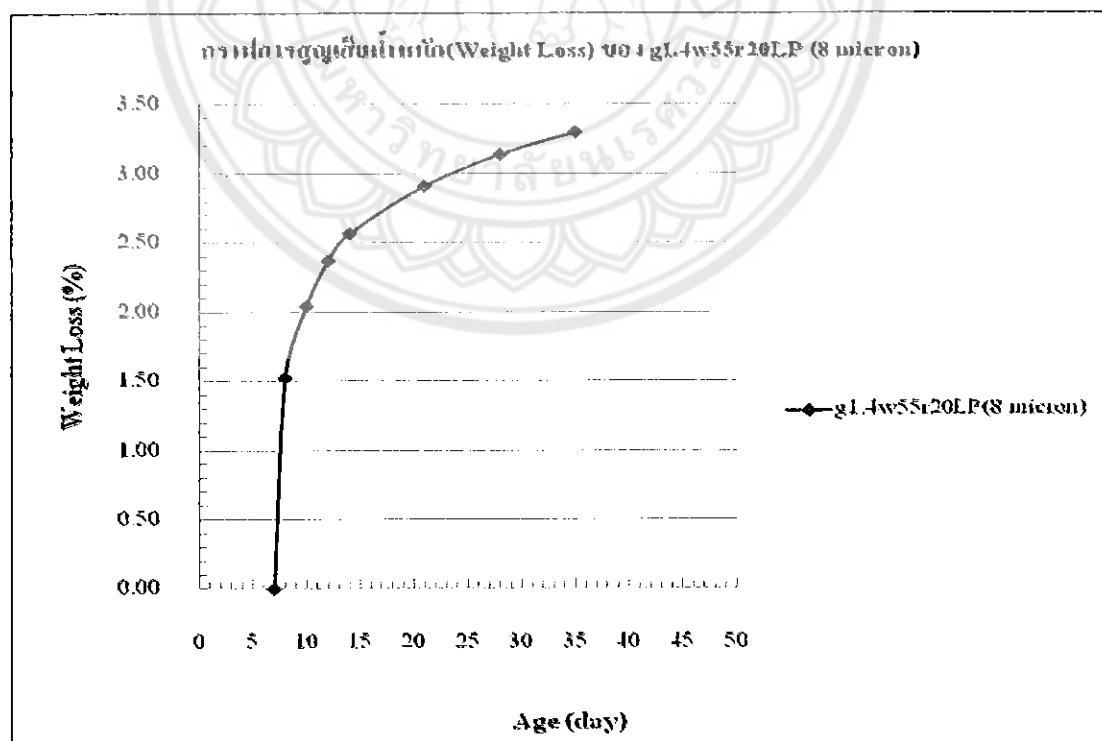
รูปที่ ข50 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r10LP (8 micron)



รูปที่ ข51 กราฟแสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสม g1.4w55r20LP (8 micron)



รูปที่ ข52 กราฟแสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสม g1.4w55r20LP (8 micron)



**ภาคผนวก ค**  
**ตารางผลกำลังอัดของเต็กละส่วนผสม**

ตารางที่ ค1 และค่ากำลังอัดของเต็กละส่วนผสม

<b>ส่วนผสม</b>	<b>Sample</b>	<b>Unit Weight (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ave.Unit Weight (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>F'c (ksc, kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Ave.F'c (ksc, kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>g1.2w55r0</b>	1	2419.16	2403.24	308.90	307.60
	2	2387.32		306.30	
<b>g1.4w25r0</b>	1	2474.57	2507.34	814.29	811.44
	2	2540.11		808.59	
<b>g1.4w35r0</b>	1	2486.30	2489.47	638.57	649.60
	2	2492.64		660.63	
<b>g1.4w35r30</b>	1	2412.79	2400.06	533.44	535.38
	2	2387.32		537.33	
<b>g1.4w35r50</b>	1	2431.89	2441.44	346.54	351.73
	2	2450.99		356.92	
<b>g1.4w45r0</b>	1	2514.81	2497.39	439.99	461.40
	2	2479.97		482.82	
<b>g1.4w55r0</b>	1	2393.69	2402.90	439.99	425.06
	2	2412.12		410.14	
<b>g1.4w55r0</b> (หนัน 3/8")	1	2330.03	2329.07	364.71	365.36
	2	2328.12		366.01	
<b>g1.4w55r0</b> (หนัน 1")	1	2378.94	2388.86	375.34	377.81
	2	2398.78		380.28	

ស៊ីវិនអក្សរា	Sample	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	Ave.Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (ksc, kg/cm <sup>2</sup> )	Ave.F'c (ksc, kg/cm <sup>2</sup> )
g1.4w55r0 (s/a=0.36)	1	2463.72	2460.76	427.01	430.90
	2	2457.80		434.80	
g1.4w55r0 (s/a=0.48)	1	2451.46	2454.63	395.86	391.32
	2	2457.80		386.77	
g1.4w55r10	1	2425.52	2423.61	407.54	406.68
	2	2419.79		423.12	
	3	2425.52		389.37	
g1.4w55r20	1	2419.16	2434.01	404.94	400.19
	2	2412.79		412.73	
	3	2470.09		382.88	
g1.4w55r30	1	2419.16	2428.70	376.39	374.44
	2	2438.25		372.50	
g1.4w55r40	1	2438.25	2435.07	356.92	353.68
	2	2431.89		350.43	
g1.4w55r50	1	2457.35	2444.62	337.45	335.51
	2	2431.89		333.56	
g1.4w55r60	1	2450.99	2457.35	317.99	321.23
	2	2463.72		324.47	
g1.4w55r10LP ( 5 micron)	1	2380.96	2373.00	293.33	317.34
	2	2365.04		341.35	
g1.4w55r20LP ( 5 micron)	1	2374.59	2374.59	276.45	273.86
	2	2374.59		271.26	
g1.4w55r10LP ( 8 micron)	1	2365.04	2368.23	372.50	374.44
	2	2371.41		376.39	

ส่วนผสม	Sample	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	Ave.Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (ksc, kg/cm <sup>2</sup> )	Ave.F'c (ksc, kg/cm <sup>2</sup> )
g1.4w55r20LP ( 8 micron)	1	2365.04	2385.73	334.86	336.81
	2	2406.42		338.75	
g1.4w65r0	1	2470.09	2433.27	315.39	313.55
	2	2396.45		311.72	
g1.4w65r30	1	2396.69	2400.67	281.64	310.20
	2	2404.66		338.75	
g1.4w65r50	1	2457.35	2450.99	250.49	249.85
	2	2444.62		249.20	
g1.4w80r0	1	2412.79	2422.34	115.51	118.76
	2	2431.89		122.00	
g1.4w80r30	1	2331.11	2370.70	189.49	198.58
	2	2410.29		207.66	
g1.4w80r50	1	2398.36	2378.52	166.13	158.99
	2	2358.68		151.85	

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายชินพงศ์ เลิคิวไอลรัตน์  
ภูมิลำเนา 267 หมู่ 7 ต. ห้างฉัตร อ. ห้างฉัตร จ. ลำปาง

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวิทยาลัย
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: valentine\_james@hotmail.com



ชื่อ นายนิกร กวังปalaะ  
ภูมิลำเนา 122 หมู่ 8 ต. นาสัก อ. แม่เมะ จ. ลำปาง

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนแม่มาวิทยา
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: skyline\_0099@hotmail.com



ชื่อ นายสุพัฒน์ชัย ใจช่วย  
ภูมิลำเนา 25 หมู่ 7 ต. ทุ่งกวาง อ. เมืองปาน จ. ลำปาง

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนทุ่งกวัววิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Supatchai\_J@hotmail.com