

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบความต้องการน้ำของมอร์ตาร์เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่ากับค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเมื่อส่วนผสมมีปริมาณของตะกั่วเตาสูงเพิ่มขึ้น ความต้องการน้ำจะลดลง เพราะตะกั่วเตาสูงมีความละเอียดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ซึ่งตะกั่วเตาสูงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความละเอียด 3,200 และ 3,600 ซม²/กรัม ตามลำดับเมื่อวัดโดยวิธีเบลนแอร์เพอร์มิอะบิลิตี (Blaine Air Permeability) พื้นที่ผิวต่ำทำให้ความต้องการน้ำในการเคลือบผิวน้อย ทำให้ความต้องการน้ำลดลง ผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาของ Fulton (1974) และ Wood (1981)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วเตาสูง

OPC : GGBS	น้ำ/สารซีเมนต์	
	ทราย/สารซีเมนต์ =2.75	ทราย/สารซีเมนต์ =3.00
100:0	0.636	0.704
90:10	0.598	0.666
80:20	0.580	0.646
70:30	0.578	0.642
60:40	0.574	0.638
50:50	0.570	0.636
40:60	0.568	0.634
30:70	0.566	0.632

- หมายเหตุ
1. ทรายต่อสารซีเมนต์ เท่ากับ 3.00
 2. ค่าการไหลแม่ เท่ากับ 110 ± 5

4.2 การทดสอบคุณสมบัติของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง

4.2.1 สารประกอบทางเคมี

สารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ได้จากการวิเคราะห์โดยบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด และ สารประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงได้จากการวิเคราะห์โดยบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จากการทดลองนี้ เมื่อเปรียบเทียบสารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทดสอบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 พบว่าปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 15 และเมื่อเปรียบเทียบสารประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงกับ ASTM C 989-89a Standard Specification for Ground Iron Blast - Furnace Slag for use in Concrete and Mortar พบว่า ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และผลรวมของอัลคาไลออกไซด์ คือ $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ ของตะกรันเตาถลุงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์กับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะทำให้เกิดเอทริงไต์ (Ettringite) ซึ่งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น การขยายตัวนี้อาจนำไปสู่การแตกร้าวได้ ออกไซด์ของอัลคาไล มีบทบาทสำคัญ เมื่อมวลรวม (Aggregate) สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไล เกิดเป็นอัลคาไลซิลิกาเจล (Alkali Silica Gel) ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาแสดงถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นในอากาศ ที่ปูนขาวอิสระและแมกนีเซียมอิสระรับไว้ เมื่อปูนสัมผัสกับอากาศ แล้วจะทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น

4.2.2 ความถ่วงจำเพาะ

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ และตะกรันเตาถลุง แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และตะกรันเตาถลุงมีค่าเท่ากับ 3.15 และ 3.00 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะของสารซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบทางเคมีในส่วนผสม ออกไซด์ของธาตุที่มีความหนาแน่นสูง ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก อลูมิเนียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ส่วนออกไซด์ของธาตุที่มีความหนาแน่นต่ำ ได้แก่ ออกไซด์ของ ซิลิกอน ซัลเฟอร์ โซเดียมและโปแตสเซียม (Aylward and Finlay, 1966 อ้างถึงใน ปริญญาและอินทรชัย, 2530) ตะกรันเตาถลุงมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนประกอบมีปริมาณสูง และปริมาณแคลเซียมและเหล็กต่ำกว่าปูนซีเมนต์ จึงทำให้มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสารประกอบทางเคมี ของปูนซีเมนต์และตะกั่วเตาถลุง

สารประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		ตะกั่วเตาถลุง	
	ปูนซีเมนต์ (มอก. 15) ประเภท 1	ปูนซีเมนต์ (ที่ใช้ทดสอบ) ประเภท 1	ตะกั่วเตาถลุง ASTM C 989 -89a	ตะกั่วเตาถลุง จากโรงงานเหล็กสยาม
CaO	-	63.80	-	37.90
SiO ₂	-	20.20	-	43.80
Al ₂ O ₃	-	5.40	-	8.70
Fe ₂ O ₃	-	2.90	-	0.40
MgO	สูงสุดร้อยละ 5	1.50	-	6.20
SO ₃	สูงสุดร้อยละ 3	2.60	สูงสุดร้อยละ 4	0.30
Na ₂ O	-	0.26	-	0.50
K ₂ O	-	0.46	-	0.40
การสูญเสียเนื่องจากการเผา	สูงสุดร้อยละ 3	2.70	-	1.30
ผลรวมอัลคาไลออกไซด์ (Na ₂ O+0.658 K ₂ O)	-	-	ต่ำสุดร้อยละ 0.60 สูงสุดร้อยละ 0.90	0.75

4.2.3 ความละเอียด

ผลการทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ และตะกรันเตาถลุงแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ความละเอียดของปูนซีเมนต์และตะกรันเตาถลุงมีค่าเท่ากับ 3,600 และ 3,200 ซม.²/กรัม ตามลำดับ เมื่อวัดโดยวิธีแอร์เพอร์มิอิมิตี เมื่อเปรียบเทียบความละเอียดของปูนซีเมนต์ และตะกรันเตาถลุงที่ใช้ทดสอบกับความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน มอก.15 พบว่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกรันเตาถลุงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

4.2.4 ความชื้นเหลือปกติ

ผลการทดสอบความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการผสมตะกรันเตาถลุงจะทำให้ความชื้นเหลือปกติลดลง การลดลงของความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ เนื่องจากตะกรันเตาถลุง มีความละเอียดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้ต้องการน้ำเพื่อเคลือบผิวน้อยกว่า ผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาของ Wood (1981)

4.2.5 ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงได้แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ก ตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง จากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าการใส่ตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของเวลาในการก่อตัวจะมากที่สุดเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อตะกรันเตาถลุงเท่ากับ 60:40 และเมื่อใส่ตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้นอีกในอัตราส่วน 50:50 , 40:60 และ 30:70 ระยะเวลาในการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายจะเริ่มลดลงตามปริมาณตะกรันเตาถลุงที่เพิ่มขึ้นจนเกือบเท่าระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากตะกรันเตาถลุงจะดูดน้ำเพียงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นของการผสม จึงทำให้น้ำระเหยไปและทำให้ซีเมนต์เฟสแห้ง จึงทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น

และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน มอก. 15 พบว่าระยะเวลาในการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 15 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง ประเภทที่ 5

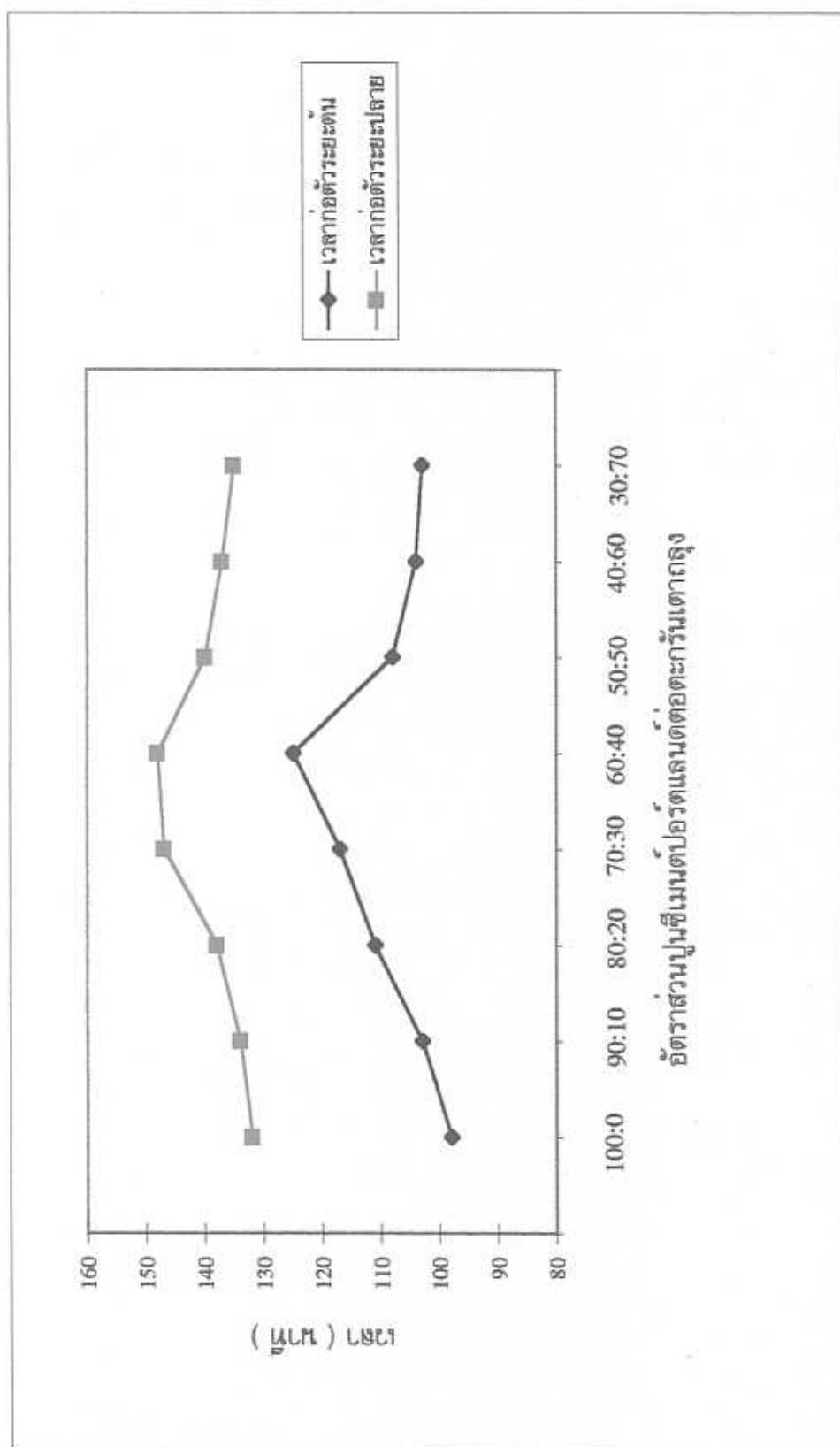
Troxell และคณะ (1968) ได้อธิบายว่า ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) แล้วเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตเจล (Calcium Silicate Gel) ทำให้เกิดการก่อตัว และปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียม

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความกว้างจำเพาะและความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกั่วแดงสูง

	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		ตะกั่วแดงสูง	
	ปูนซีเมนต์ประเภท 1 (มอก.15)	ปูนซีเมนต์ประเภท 1 (ที่ใช้ทดสอบ)	ตะกั่วแดงสูง ASTM C 989-89a	ตะกั่วแดงสูง จากโรงงานเหล็กสยาม
ความกว้างจำเพาะ	-	3.15	-	3.00
ความละเอียดทดสอบด้วยแอมเฟอร์มิอะบิลิตี้				
- ค่าเฉลี่ยต่ำสุด (ตร.ชม./ กรัม)	2,800	3,600	-	3,200
- ค่าเฉลี่ยต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง (ตร.ชม./ กรัม)	2,600	3,500	-	3,200

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมตะกั่วกันแดดสูง

	ระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์ , นาที					อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อตะกั่วกันแดดสูง									
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5	ตามมาตรฐาน มอก.15									
ความชื้นแห้งปกติ (%)	-	-	-	-	-	100:0	25.48	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70
ระยะเวลาในการก่อตัว (นาที)															
การก่อตัวระยะต้นไม่น้อยกว่า	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	98.00	103.00	111.00	117.00	125.00	132.00	140.00	148.00	156.00	164.00
การก่อตัวระยะปลายไม่น้อยกว่า	375.00	375.00	375.00	375.00	375.00	132.00	134.00	138.00	147.00	156.00	165.00	174.00	183.00	192.00	201.00



ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบระยะเวลาพักตัวของผู้เล่นบาสเกตบอลระดับมัธยมศึกษาตอนต้น

อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) จะทำให้ระยะเวลาก่อตัวเร็วขึ้น ASTM C150 กำหนดให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่มีส่วนผสมของไตรแคลเซียมอลูมิเนตสูงสุดร้อยละ 8 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้น สืบเนื่องจากปูนซีเมนต์ถูกตะกรันเตาถลุงแทนที่ ทำให้ปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนตลดลง ผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาของ Fulton (1974) , Hogan และ Meusel (1981)

4.2.6 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.2 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ ในช่วงอายุต้น (3 วันและ 7 วัน)กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง จะต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุกอัตราส่วนผสม กำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้น เมื่ออายุมากขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงจะเพิ่มขึ้น ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อตะกรันเตาถลุงเท่ากับ 90:10, 80:20 และ 70:30 สูงกว่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

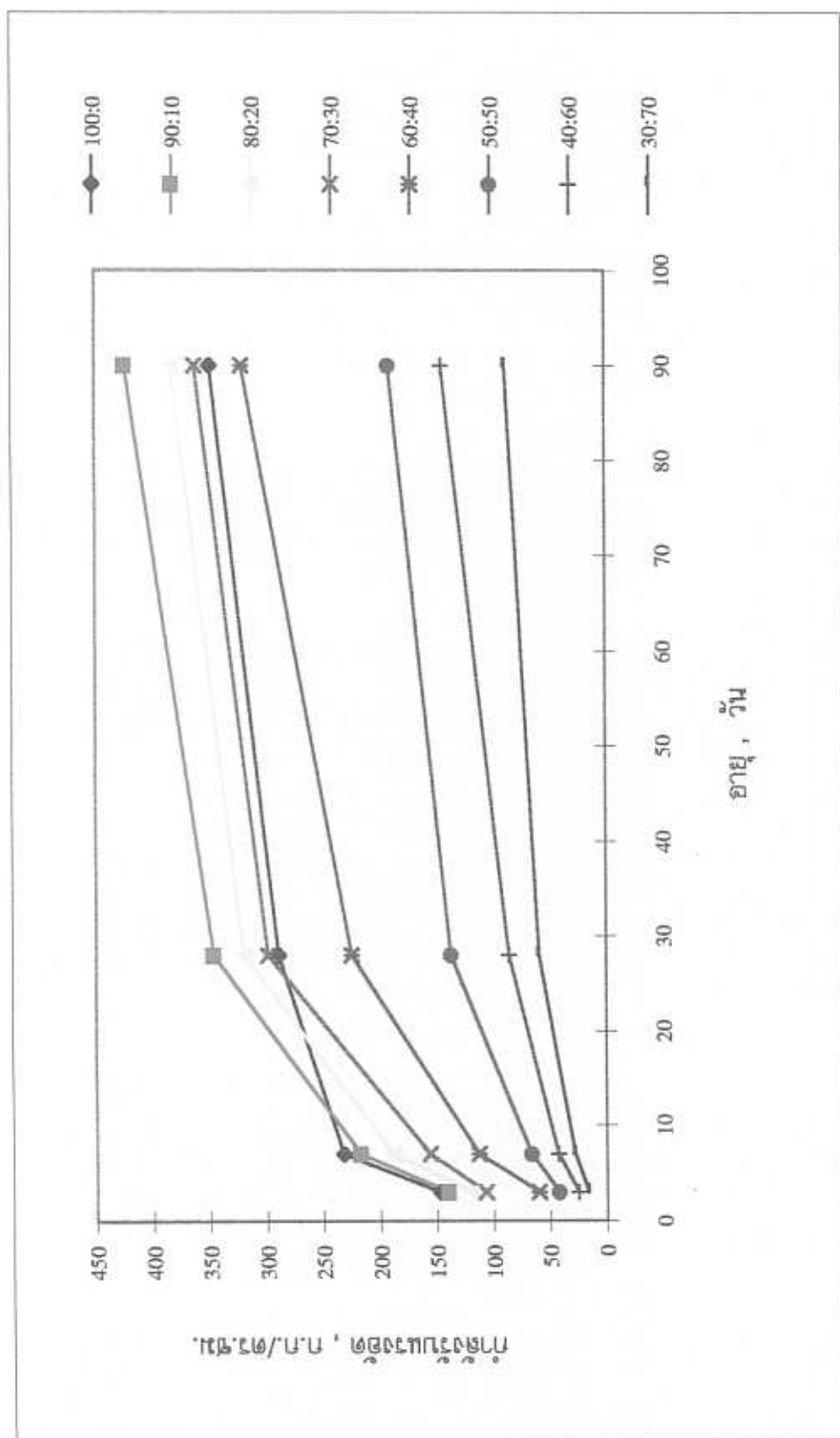
จากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า ตะกรันเตาถลุงจะทำปฏิกิริยาได้ช้า และทำให้กำลังรับแรงอัดในระยะปลายเพิ่มสูงขึ้น การที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงมีกำลังรับแรงอัดที่อายุเริ่มแรก คือ ที่ 3 วัน และ 7 วัน ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผสมตะกรันเตาถลุงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง กำลังรับแรงเริ่มแรกจะขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงยังไม่เกิดขึ้น ดังนั้นกำลังรับแรงอัดเริ่มแรกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงจะลดลง เมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้น เมื่อเวลานานขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงดีขึ้น เพราะปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และถ้าผสมตะกรันเตาถลุงในปริมาณที่เหมาะสม ปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงที่เกิดขึ้นสามารถชดเชยปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ได้ ผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาของ Fernandez และ Malhotra (1990)

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน มอก. 15 พบว่าการใส่ตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 90:10, 80:20 และ 70:30 กำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1,2,4 และ 5 เมื่อแทนที่ในอัตราส่วน 60:40 กำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมวลสารปูนซีเมนต์ผสมตะกั่วกันแดดสูง

อายุและการบ่ม	กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มวลสารปูนซีเมนต์ผสมตะกั่วกันแดดสูง 1.5						กำลังรับแรงอัดของมวลสารปูนซีเมนต์ผสมตะกั่วกันแดดสูง									
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5		100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70		
1 วันในอากาศขึ้น	-	-	120.00	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 วันในอากาศขึ้นและ 2 วันในน้ำ	85.00	70.00	210.00	-	-		147.91	140.24	119.14	107.11	60.36	42.85	25.37	16.93		
1 วันในอากาศขึ้นและ 6 วันในน้ำ	150.00	130.00	-	55.00	105.00		233.04	217.37	188.73	156.68	113.33	67.04	43.49	28.36		
1 วันในอากาศขึ้นและ 27 วันในน้ำ	245.00	245.00	-	140.00	210.00		289.59	346.76	319.80	298.73	224.77	137.36	86.34	59.47		
1 วันในอากาศขึ้นและ 89 วันในน้ำ	-	-	-	-	-		349.12	423.87	383.43	362.28	320.80	191.74	144.75	88.77		

หมายเหตุ 1.ทรายต่อสารซีเมนต์เท่ากับ 2.75
2.ค่าการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 110 ± 5



ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมวลตัวปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วกันแดด

4.2.7 กำลังรับแรงดึง

ผลการทดลองกำลังรับแรงดึง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงได้แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ค ส่วนตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.3 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบจากผลการทดลองนี้แสดงว่าเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อตะกรันเตาถลุงเท่ากับ 90:10 80:20, 70:30 และ 60:40 จะมีกำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วันและ 90 วัน สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

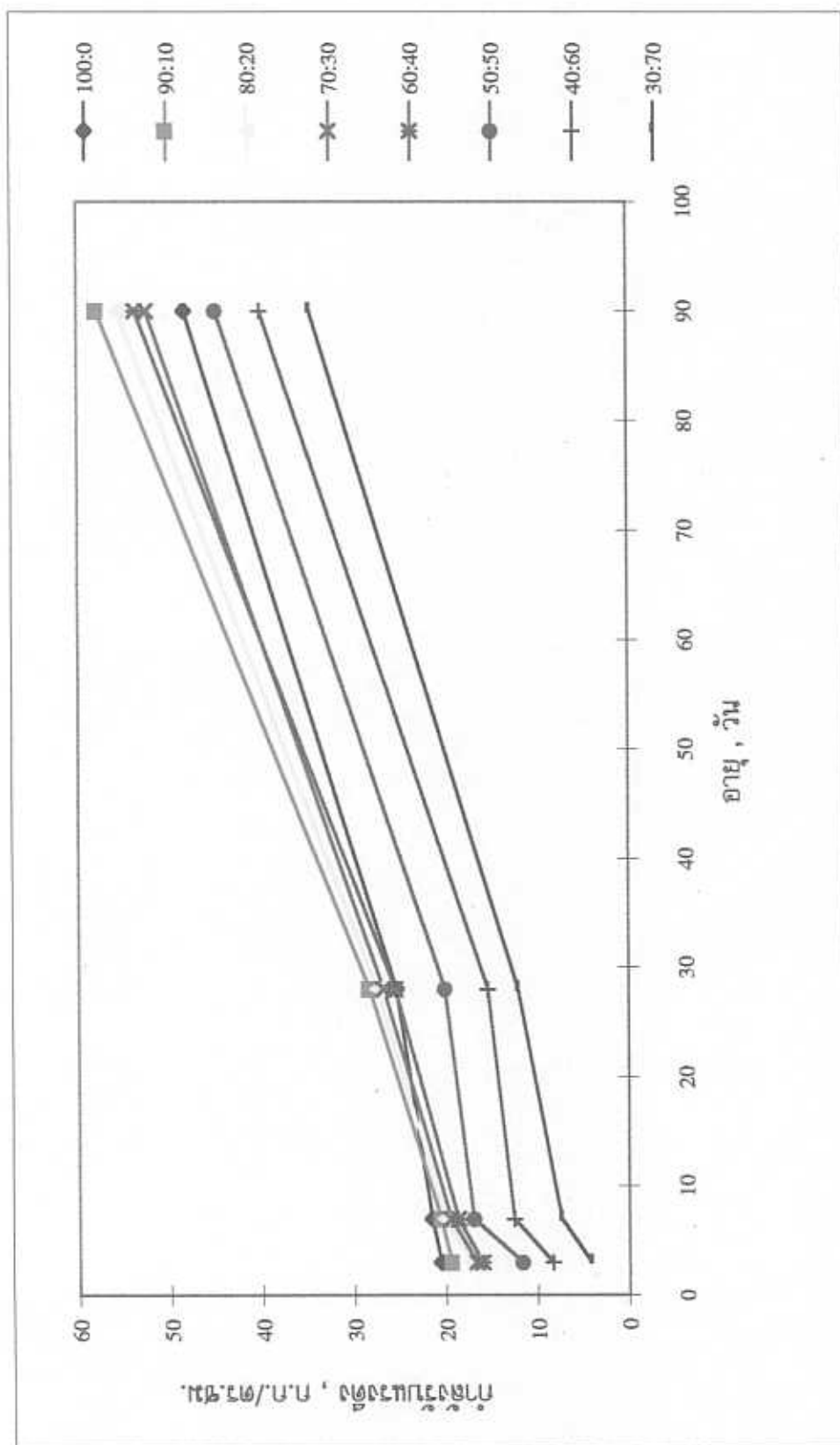
Alexander และคณะ (1965) และ Shan และ Slate (1965) พบว่ากำลังยึดเหนี่ยวแรงดึง (Tensile Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับซีเมนต์เพสต์จะสูงกว่า ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม และจะขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวม และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การผสมตะกรันเตาถลุงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้ปริมาณของซีเมนต์เพิ่มขึ้น และปริมาณมวลรวมลดลง ทำให้จุดอ่อนที่บริเวณผิวของมวลรวมมีปริมาณลดลง และทำให้กำลังยึดเหนี่ยวและการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน มอก. 15 พบว่าการใส่ตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 90:10, 80:20 และ 70:30 กำลังรับแรงดึงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1,2,4 และ 5 เมื่อแทนที่ในอัตราส่วน 60:40 กำลังรับแรงดึงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกั่วกันแดดสูง

อายุและการบ่ม	กำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน มอก. 15					กำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกั่วกันแดดสูง									
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70		
1 วันในอากาศชื้น	-	-	20.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1 วันในอากาศชื้นและ 2 วันในน้ำ	10.00	9.00	26.00	-	-	20.58	19.46	17.11	16.70	16.10	11.72	8.43	4.18		
1 วันในอากาศชื้นและ 6 วันในน้ำ	20.00	18.00	-	12.00	18.00	21.56	20.64	20.19	19.49	18.72	16.99	12.64	7.41		
1 วันในอากาศชื้นและ 27 วันในน้ำ	25.00	23.00	-	21.00	26.00	25.40	28.38	27.47	26.83	25.53	20.11	15.41	12.15		
1 วันในอากาศชื้นและ 89 วันในน้ำ	-	-	-	-	-	48.37	57.92	55.69	52.51	53.71	44.95	40.14	34.67		

หมายเหตุ 1.ทรายต่อสารซีเมนต์เท่ากับ 2.75
2.ค่าการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 110 ± 5



ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกวนเตาถลุง

4.3 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง

4.3.1 การต้านทานสารเคมี

ผลการทดสอบการต้านทานสารเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงได้แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ง1 ส่วนตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.4 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบจากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า การสูญเสียน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง เนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเข้มข้น 5 % จะลดลงเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้น

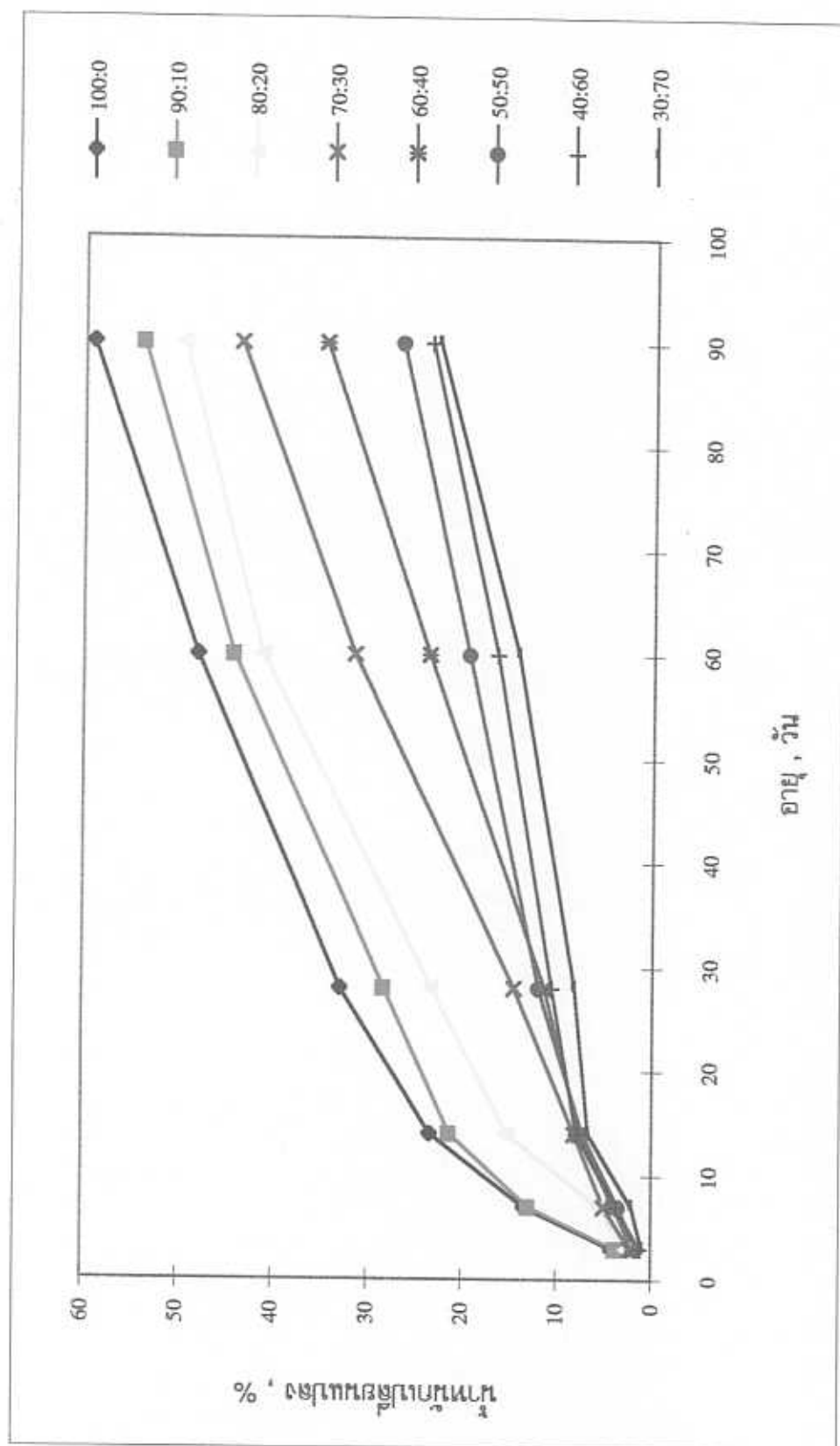
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงเมื่อแช่ในกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 5 แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ง2 ส่วนตารางที่ 4.8 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า การผสมตะกรันเตาถลุงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้อัตราการลดลงของกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา อัตราส่วนผสม 70 : 30 จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงต่ำที่สุด ผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาของ Hogan และ Meusel (1981)

เมื่อปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติไม่ดี เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด (Taylor, 1969) และไอออนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นี้จะเป็นสาเหตุทำให้โครงสร้างของคอนกรีตถูกทำลาย (Berry and Malhotra, 1980) การเพิ่มความสามารถในการต้านทานสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรด ของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตสามารถทำได้โดย การลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันให้มีค่าต่ำลง (Neville, 1981) การผสมตะกรันเตาถลุงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้สารประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมด จึงทำให้ความสามารถในการต้านทานสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Bakker (1980) ; Roy และ Idorn (1982) พบว่า ความสามารถในการซึมผ่านได้ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุง ถ้าปริมาณตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านได้จะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุง กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และการลดลงของอัลคาไลระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลทำให้ ปริมาณสารเคมีเข้าไปทำลายโครงสร้างของซีเมนต์เฟสลดลง จึงทำให้มีความคงทนต่อสารเคมีเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วกันแดดสูง ภายใต้แสงแก้วฟลูออโรคาร์บอนรวม 5

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อตะกั่วกันแดดสูง	น้ำ/สารซีเมนต์	การสูญเสียน้ำหนัก, %					
		3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
100:0	0.704	4.20	13.46	23.41	32.93	48.06	59.20
90:10	0.666	3.77	12.99	21.33	28.34	44.27	53.91
80:20	0.646	2.66	5.51	15.23	23.30	41.27	49.65
70:30	0.642	2.22	5.02	8.16	14.62	31.56	43.66
60:40	0.638	1.89	3.96	7.61	11.37	23.67	34.72
50:50	0.636	1.60	3.49	7.33	12.06	19.47	26.69
40:60	0.634	1.29	3.66	7.94	10.62	16.46	23.58
30:70	0.632	0.97	2.09	6.71	8.26	14.24	22.79

- หมายเหตุ
1. ทราบดีต่อสารซีเมนต์ เท่ากับ 3.00
 2. ค่าการไหลเฉลี่ย เท่ากับ 110 ± 5



ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมวลตัวปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วกันแดดสูง
ภายหลังการทดสอบการดูดน้ำ

ตารางที่ 4.8 การสูญเสียกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วกันแดดสูง ภายใต้การแช่ฟลูอิดซีเมนต์ 5 ที่อายุ 90 วัน

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อตะกั่วกันแดดสูง	น้ำ/สารซีเมนต์	กำลังรับแรงอัด , กก./ตร.ซม.		กำลังรับแรงอัดลดลง (%)
		90 วัน	แช่ในกรด 90 วัน	
100:0	0.704	292.23	156.25	46.36
90:10	0.666	257.70	148.79	42.22
80:20	0.646	192.49	133.17	30.39
70:30	0.642	194.39	135.10	30.29
60:40	0.638	157.54	105.24	32.44
50:50	0.636	126.58	80.71	36.20
40:60	0.634	82.57	55.21	33.06
30:70	0.632	65.94	43.26	34.37

- หมายเหตุ
1. พรายต่อสารซีเมนต์ เท่ากับ 3.00
 2. ค่าการไหลเผ เท่ากับ 110 ± 5

4.3.2 การหดตัวเมื่อแห้ง

ผลการทดสอบการหดตัวของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงแสดงไว้ในภาคผนวก จ1 ส่วนตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.5 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การผสมตะกรันเตาถลุงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้การหดตัวเมื่อแห้งเพิ่มขึ้น การหดตัวเมื่อแห้งจะสูงเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงผสมอยู่ในปริมาณมาก

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของแท่งทดสอบเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (Moisture Loss) แสดงไว้ในภาคผนวก จ2 ส่วนตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.6 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการสูญเสียความชื้นของแท่งทดสอบเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับการหดตัวเมื่อแห้งผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาของ Fullton (1974), Hogan และ Meusel (1981) ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน

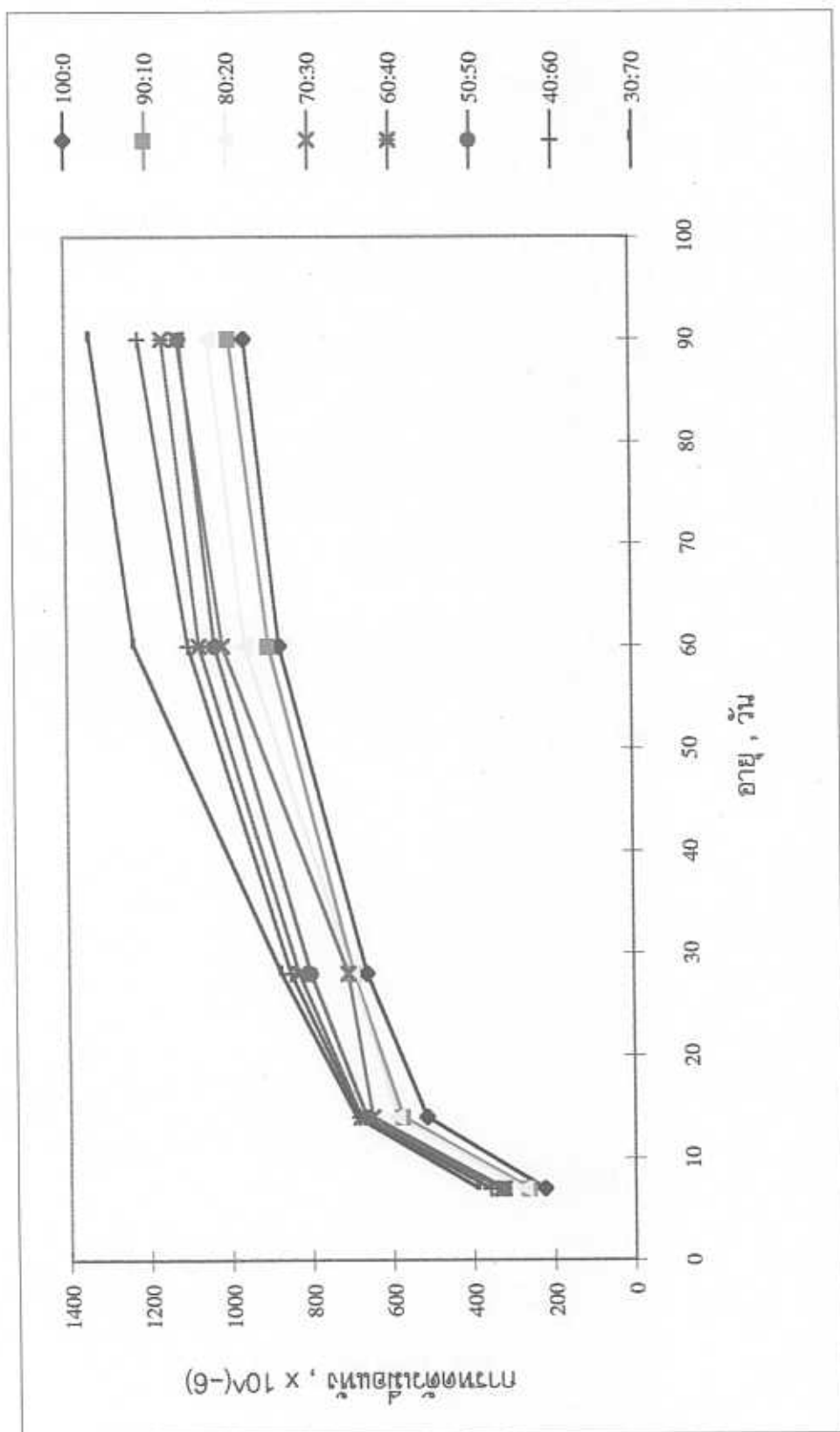
เมื่อแท่งทดสอบแห้งจะทำให้น้ำหนักลดลงเพราะน้ำในส่วนผสมจะระเหยออกจากแท่งทดสอบ ก่อให้เกิดการหดตัว การหดตัวในลักษณะนี้ Neville (1983) ได้อธิบายว่าจะเกิดจากลักษณะทางกายภาพ ของโครงสร้างซีเมนต์เจลงมากกว่าส่วนประกอบทางเคมี เมื่อแท่งทดสอบแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 น้ำในโพรงคาปิลารี (Capillary Pore) จะถูกขับออกมา (Power, 1965 และปริญา, 2528) ซีเมนต์เจลงที่อยู่ล้อมรอบโพรงนี้ จะเกิดแรงอัด 3 แกน (Triaxial Compression) ขึ้นและทำให้เกิดการหดตัวอีลาสติก (Elastic Shrinkage) ขึ้นทันทีทันใด (Ishai, 1965) การสูญเสียน้ำในโพรงคาปิลารีจะทำให้หน้าที่เหลือเป็นผิวโค้ง (Meniscus) และจะเกิดแรงตึงผิว (Surface Tension) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญทำให้เกิดการหดตัว (ปริญา และอินทรชัย, 2528) การสูญเสียน้ำมากทำให้เกิดแรงตึงผิวมากขึ้น และเป็นผลให้เกิดการหดตัวเมื่อแห้งมากขึ้นด้วย ดังนั้นแสดงว่าปริมาณโพรงคาปิลารีในซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคือ ปฏิกริยาในช่วงอายุเริ่มแรกของปูนซีเมนต์จะลดลงตามปริมาณตะกรันเตาถลุง ปฏิกริยาเกิดขึ้นน้อยทำให้ใช้น้ำน้อยในการทำปฏิกริยาเป็นซีเมนต์เจลง น้ำที่เหลืออยู่เป็นผลให้เกิดการสูญเสียน้ำและการหดตัวเมื่อแห้ง

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการหดตัวเมื่อแห้งของมวลอร์ตาร์ปูซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วกันแดดลง

อัตราส่วนปูซีเมนต์ต่อตะกั่วกันแดดลง	น้ำ/สารซีเมนต์	การหดตัวเมื่อตากแห้ง , $\mu\epsilon$				
		7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
100:0	0.704	226.00	517.00	664.00	876.00	956.00
90:10	0.666	264.00	577.00	697.00	902.00	994.00
80:20	0.646	275.00	590.00	701.00	960.00	1,046.00
70:30	0.642	328.00	653.00	711.00	1,016.00	1,121.00
60:40	0.638	335.00	681.00	831.00	1,074.00	1,160.00
50:50	0.636	327.00	668.00	802.00	1,035.00	1,117.00
40:60	0.634	361.00	686.00	852.00	1,102.00	1,220.00
30:70	0.632	390.00	692.00	875.00	1,234.00	1,340.00

หมายเหตุ

1. หายต่อสารซีเมนต์ เท่ากับ 3.00
2. ค่าการไหลแม่ เท่ากับ 110 ± 5



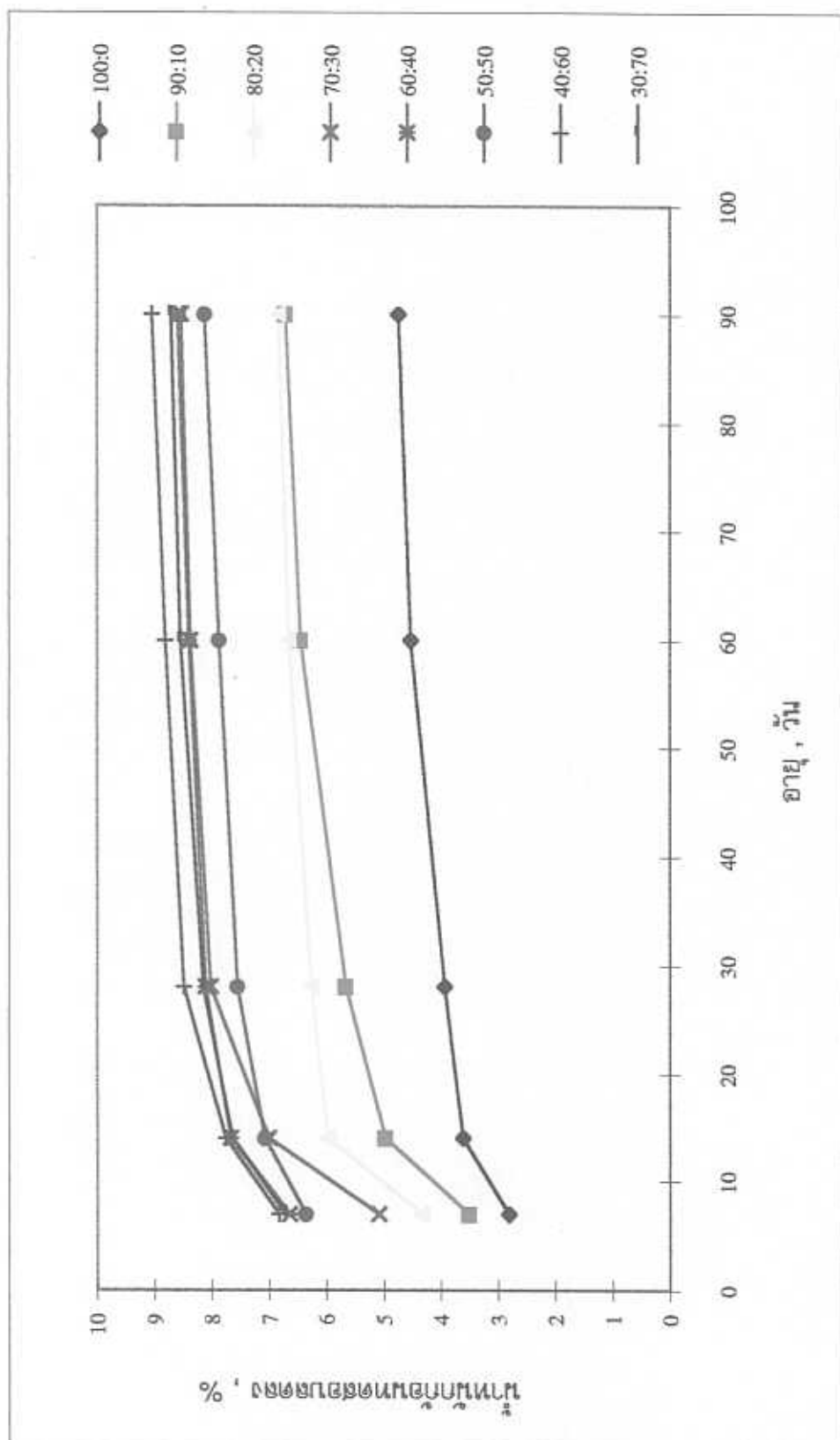
ภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบการหดตัวเมื่อแห้งของมอร์ตารูปูนีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วกันแดดสูง

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการหดตัวเมื่อแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วกันแดดสูง

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อตะกั่วกันแดดสูง	น้ำ/สารซีเมนต์	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก , %				
		7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
100:0	0.704	2.82	3.62	3.94	4.53	4.75
90:10	0.666	3.51	4.98	5.67	6.46	6.72
80:20	0.646	4.34	5.98	6.27	6.67	6.85
70:30	0.642	5.09	7.01	8.03	8.38	8.55
60:40	0.638	6.65	7.68	8.12	8.41	8.60
50:50	0.636	6.37	7.08	7.56	7.88	8.13
40:60	0.634	6.84	7.77	8.50	8.82	9.06
30:70	0.632	6.72	7.65	8.16	8.56	8.72

หมายเหตุ

1. หวายเป็นสารซีเมนต์ เท่ากับ 3.00
2. ค่าการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 110 ± 5



ภาพที่ 4.6 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมวลซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกอนต่าง

4.3.3 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เมื่อแห้ง

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงได้แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ส่วนตารางที่ 4.11 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ จากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันเตาถลุง ในอัตราส่วน 90:10, 80:20 และ 70:30 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาคัลเซียมไฮดรอกไซด์ กับตะกรันเตาถลุง จะทำให้เกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต มีปริมาณเพียงพอที่จะทดแทนปริมาณที่ลดลงของปูนซีเมนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและทำให้มอร์ตาร์ที่บ่ม

การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง ในอัตราส่วน 60:40 50:50, 40:60, 30:70 จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการผสมตะกรันเตาถลุง ในปริมาณมากเกินไป และจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบการดูดซึมน้ำในช่วงอายุต้น ๆ จะทำให้ปฏิกิริยาของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ กับตะกรันเตาถลุงที่จะทำให้เกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะทดแทนปริมาณที่ลดลงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกรันเตาถลุงจะทำปฏิกิริยาไฮเดชันช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง

OPC : GGBS	น้ำ/สารซีเมนต์	การดูดซึมน้ำ
100:0	0.704	11.01
90:10	0.666	10.03
80:20	0.646	10.10
70:30	0.642	10.24
60:40	0.638	11.43
50:50	0.636	11.93
40:60	0.634	12.36
30:70	0.632	12.50

- หมายเหตุ
1. ทรายต่อสารซีเมนต์ เท่ากับ 3.00
 2. ค่าการไหลแผ่ เท่ากับ 110 ± 5
 3. OPC : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
GGBS : ตะกรันเตาถลุง