บทที่ 4
ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์

บทนี้เป็นการกล่าวถึง ปริมาณ ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ ตลอดจนผลการทดสอบของคอนกรีตบล๊อคที่ได้ในอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ต่างๆ ได้แก่ ขนาด ความหนาแน่นเชิงปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว ความต้านแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้อง

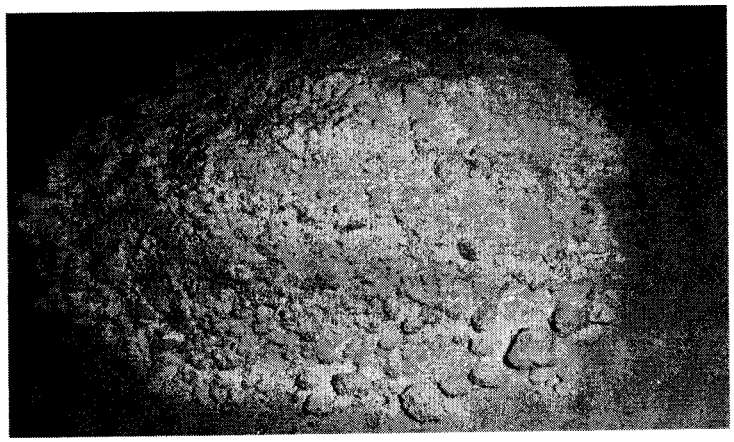
1. ปริมาณ ลักษณะทางกายภาพของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

1.1 ปริมาณของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

ปัจจุบันปริมาณของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ของบริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด มีปริมาณวันละ1,000-1,200 กิโลกรัม เนื่องจากมีการเพิ่มกำลังการผลิตและมีการผลิตตลอด 24 ชั่วโมง ส่งผลให้มีปริมาณของขี้เถ้าเพิ่มมากขึ้น

1.2 สีและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

ภาพที่ 4.14 แสดงสีและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้า พบว่ามีสีค่อนไปทางสีเทาเข้ม คล้ายสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็ง เป็นผงละเอียด



ภาพที่ 4.1 แสดงสีและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้า

1.3 ความถ่วงจำเพาะและการกระจายของขนาดอนุภาคขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

ความถ่วงจำเพาะของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ มีค่าความถ่วงจำเพาะค่อนข้างสูงโดยมีค่าเท่ากับ 5.0106 โดยความถ่วงจำเพาะที่สูงจะมีความละเอียดมากและมีความพรุนน้อย ดังนั้นเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตบล๊อคมวลเบาจะทำให้มีกำลังอัดสูง เนื่องจากทำให้คอนกรีตบล็อคมวลเบามีความต้องการน้ำลดลง และทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว ส่วนการกระจายของขนาดอนุภาคขี้เถ้ามีขนาดที่หลากหลายกันออกไป ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากกราฟ (ตามภาคผนวก ข)

2. องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ พบว่ามีปริมาณ ZnO สูงถึงร้อยละ 88.31 ส่วน CaO ของขี้เถ้ามีปริมาณขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 11.61 ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากผลการวิเคราะห์ (ตามภาคผนวก ข)

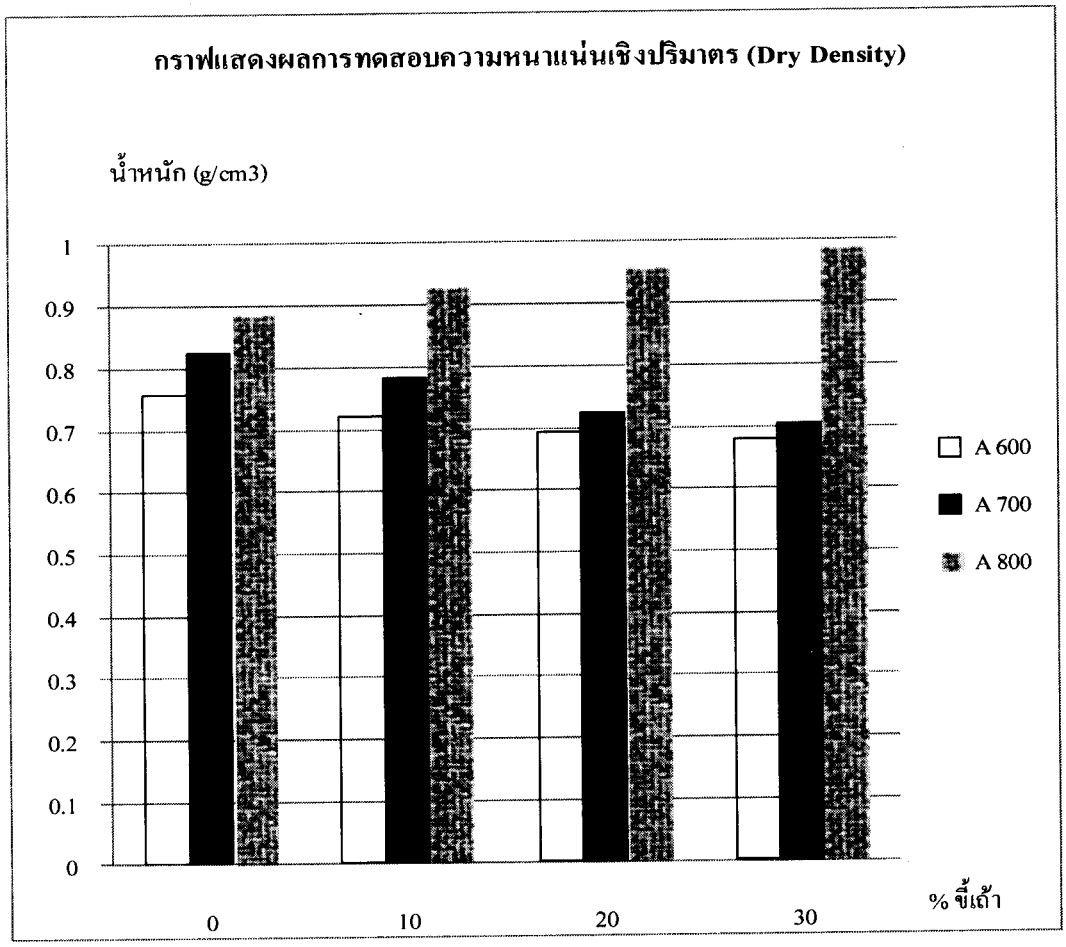
3. ผลการทดลองและการทดสอบของคอนกรีตบล๊อค

3.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร

จากการทดสอบหาความหนาแน่นเชิงปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 20 และภาพที่ 15 ของส่วนผสมใน 3 ระดับ คือ ความหนาแน่น 600 kg/m^3 ,700 kg/m^3 และ 800 kg/m^3 พบว่าเมื่อแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ ใน A600 และ A700 ปริมาณความหนาแน่นปรับตัวลดลงในระดับหนึ่ง เมื่อปริมาณการแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ประมาณ 10% และหลังจากการแทนที่ขี้เถ้าซีเมนต์ 20% และ 30% พบว่ามีระดับของความหนาแน่นปรับตัวสูงขึ้นเล็กน้อยและอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันทั้ง A600 และ A700 เป็นผลมาจากความหนาแน่นที่น้อยเมื่อใช้ขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ส่งผลให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง ซึ่งต่างจาก A800 พบว่าเมื่อแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ในปริมาณที่ 20% และ 30% กลับทำให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรปรับตัวสูงขึ้น เป็นผลมาจากส่วนผสมที่มีเนื้อของวัสดุที่มีอยู่ในปริมาณมาก เมื่อถูกแทนที่ขี้เถ้าที่มีอนุภาคเล็กและละเอียดกว่าสามารถเข้าไปแทนที่ในเนื้อของคอนกรีตมวลเบาได้ดีขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นเชิงปริมาตรที่ปรับตัวสูงขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Dry Density)

ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	Dry Density (g/cm^3)					
	A 600		A 700		A 800	
0	0.760	$\overline{X}$=0.759	0.826	$\overline{X}$=0.824	0.895	$\overline{X}$=0.889
	0.755	S.D.=0.0026	0.820	S.D.=0.0042	0.887	S.D.=0.0038
	0.762		0.824		0.885	
	0.758		0.820		0.890	
	0.758		0.830		0.888	
10	0.722	$\overline{X}$=0.722	0.780	$\overline{X}$=0.782	0.929	$\overline{X}$=0.930
	0.725	S.D.=0.0034	0.777	S.D.=0.0035	0.933	S.D.=0.0020
	0.725		0.784		0.931	
	0.720		0.786		0.928	
	0.717		0.783		0.929	
20	0.688	$\overline{X}$=0.693	0.718	$\overline{X}$=0.724	0.955	$\overline{X}$=0.958
	0.695	S.D.=0.0031	0.720	S.D.=0.0048	0.959	S.D.=0.0031
	0.692		0.728		0.963	
	0.696		0.727		0.956	
	0.694		0.728		0.959	
30	0.677	$\overline{X}$=0.680	0.702	$\overline{X}$=0.705	0.9991	$\overline{X}$=0.989
	0.682	S.D.=0.0036	0.708	S.D.=0.0021	0.988	S.D.=0.0015
	0.685		0.706		0.990	
	0.676		0.705		0.987	
	0.680		0.705		0.989	



ภาพที่ 4.2 ผลทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร

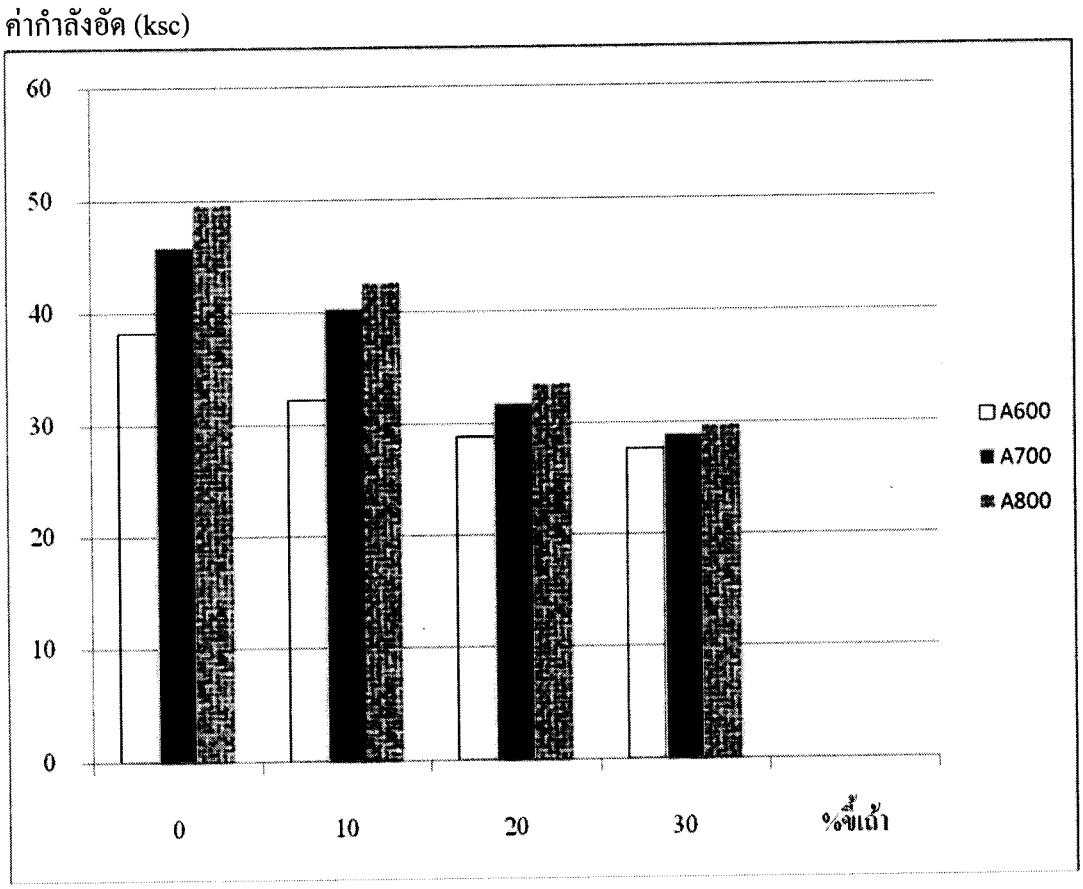
3.2 ผลการทดสอบการรับกำลังอัด

การทดสอบหาค่ากำลังอัดดังแสดงในตารางที่ 21 และภาพที่ 16 ของส่วนผสมใน 3 ระดับ ตามความหนาแน่น พบว่าในส่วนผสมที่ไม่ได้ถูกขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ CT จะได้ผลของกำลังอัดสูงตามระดับของความหนาแน่นที่คิดไว้คือ A800 รับกำลังอัดได้ 49.84 ksc, A700 รับกำลังอัดได้ 45.77 ksc และA600 รับกำลังอัดได้ 38.28 ksc ตามลำดับ หลังจากถูกแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ ผลของกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบปรับตัวลดลงมากตามปริมาณของขี้เถ้าที่มากขึ้น จนกระทั่งการแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ในปริมาณ 30% การเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดลดลงในระดับที่ใกล้เคียงกันของแต่ละระดับความหนาแน่น

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	Compressive Strength (Kg/cm^3)					
	A 600		**A 700**		**A 800**	
0	38.15	$\overline{X}$=38.20	45.75	$\overline{X}$=45.77	49.66	$\overline{X}$=49.64
	38.18	S.D.=0.0339	45.80	S.D.=0.0251	49.65	S.D.=0.0291
	38.22		45.80		49.66	
	38.23		45.75		49.59	
	38.22		45.77		49.64	
10	32.13	$\overline{X}$=32.17	40.30	$\overline{X}$=40.29	42.62	$\overline{X}$=42.62
	32.21	S.D.=0.0380	40.26	S.D.=0.0244	42.65	S.D.=0.0187
	32.20		40.32		42.61	
	32.13		40.30		42.60	
	32.18		40.27		42.60	
20	28.78	$\overline{X}$=28.75	31.71	$\overline{X}$=31.74	33.50	$\overline{X}$=33.48
	28.72	S.D.=0.0223	31.75	S.D.=0.0277	33.45	S.D.=0.0212
	28.74		31.78		33.48	
	28.75		31.72		33.50	
	28.76		31.75		33.47	
30	27.63	$\overline{X}$=27.60	28.78	$\overline{X}$=28.81	29.62	$\overline{X}$=29.65
	27.60	S.D.=0.0255	28.82	S.D.=0.0300	29.65	S.D.=0.0187
	27.58		28.85		29.65	
	27.57		28.78		29.66	
	27.62		28.82		29.67	

กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)



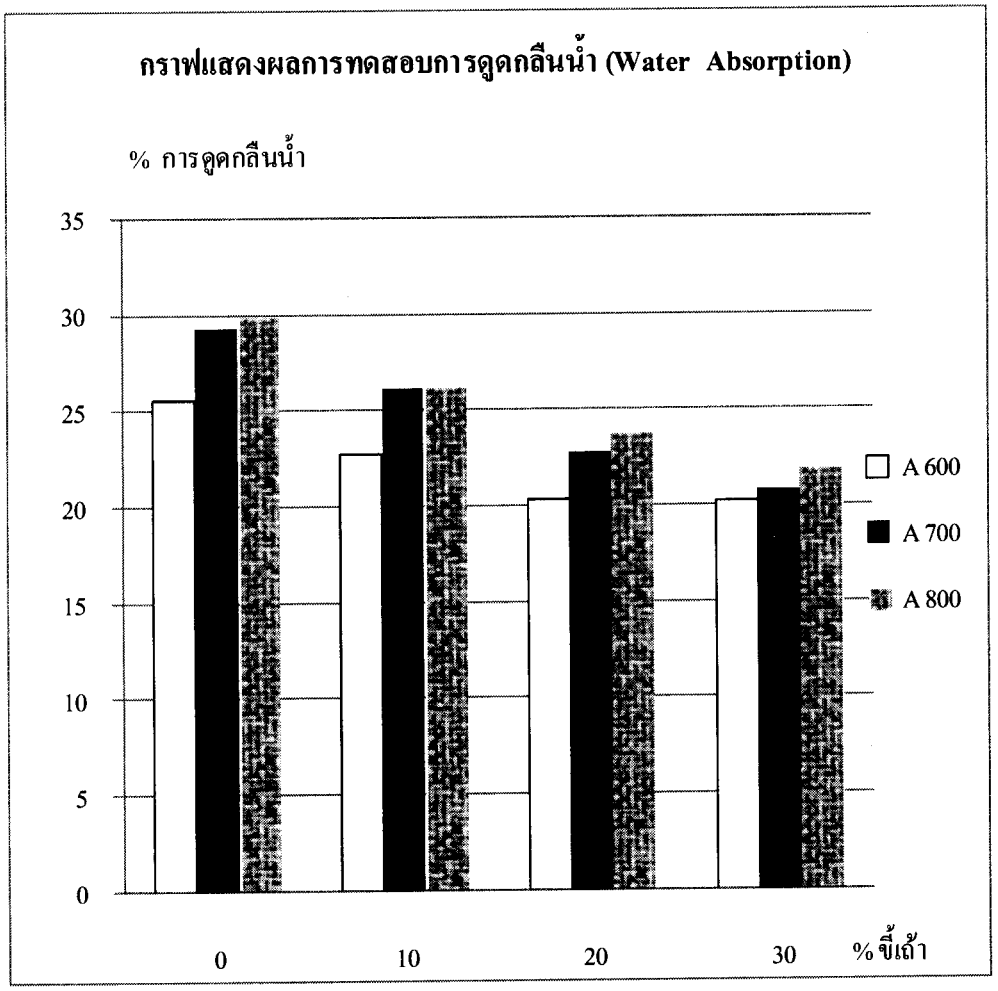
ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบการรับกำลังอัด

3.3 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ

การทดสอบหาค่าการดูดกลืนน้ำดังแสดงในตารางที่ 22 และภาพที่17 ซึ่งสังเกตุได้ว่าการแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การดูดกลืนน้ำ ของตัวอย่างทดสอบในแต่ละระดับลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีผลมาจากอนุภาคของขี้เถ้า เมื่อแทนที่ในซีเมนต์จะช่วยเพิ่มความทึบน้ำในช่องว่างขนาดเล็ก (Micro Porous) จึงส่งผลให้อัตราการดูดกลืนน้ำต่ำลง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Water Absorption)

ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	Water Absorption (%)					
	A 600		A 700		A 800	
0	25.52%	$\overline{X}$=25.52%	29.22%	$\overline{X}$=29.25%	29.98%	$\overline{X}$=29.96%
	25.50%	S.D.=0.0114	29.25%	S.D.=0.0223	30.00%	S.D.=0.0316
	25.53%		29.28%		29.94%	
	25.51%		29.24%		29.92%	
	25.52%		29.26%		29.96%	
10	22.80%	$\overline{X}$=22.78%	26.10%	$\overline{X}$=26.10%	26.20%	$\overline{X}$=26.22
	22.81%	S.D.=0.0255	26.10%	S.D.=0.0122	26.20%	S.D.=0.0187
	22.76%		26.11%		26.23%	
	22.78%		26.11%		26.24%	
	22.75%		26.08%		26.23%	
20	20.35%	$\overline{X}$=20.34	22.80%	$\overline{X}$=22.78%	23.81%	$\overline{X}$=23.80%
	20.33%	S.D.=0.0295	22.81%	S.D.=0.0255	23.82%	S.D.=0.0234
	20.38%		22.76%		23.77%	
	20.35%		22.78%		23.82%	
	20.30%		22.75%		23.78%	
30	20.23%	$\overline{X}$=20.25%	20.85%	$\overline{X}$=20.83%	21.98%	$\overline{X}$=21.98%
	20.22%	S.D.=0.0311	20.82%	S.D.=0.0244	22.00%	S.D.=0.0122
	20.27%		20.80%		21.98%	
	20.26%		20.86%		21.97%	
	20.27%		20.82%		21.97%	



ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ

3.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว

การทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงความยาวดังแสดงในตารางที่ 23 และภาพที่18 ของส่วนผสมใน 3 ระดับ ตามความหนาแน่น A600 kg/m^3, A700 kg/m^3 และ A800 kg/m^3 พบว่าเกิดการหดตัวที่ตัวอย่างทดสอบ ในทุกระดับความหนาแน่น อันมีผลมาจากปฏิกิริยาไฮร์เดรชั่นที่เหลืออยู่ เมื่ออยู่ในอุณหภูมิ 25 °C มีความชื้น 40% ความแตกต่างที่เกิดขึ้นของการทดสอบ ในระดับความหนาแน่นระดับต่างๆมีดังนี้

1) ระดับความหนาแน่น A600 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 10% เกิดการหดตัวลดลง และหดตัวลงต่ำสุด เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ 30%

2) ระดับความหนาแน่น A700 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 10% เกิดการหดตัวลดลง และหดตัวลงต่ำสุด เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ 30%

4) ระดับความหนาแน่น A800 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 10% เกิดการหดตัวลดลง และหดตัวลงต่ำสุด เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ 30%

ตารางที่ 4.4 ตารางสรุปผลการเปลี่ยนแปลงความยาว (Length Change)

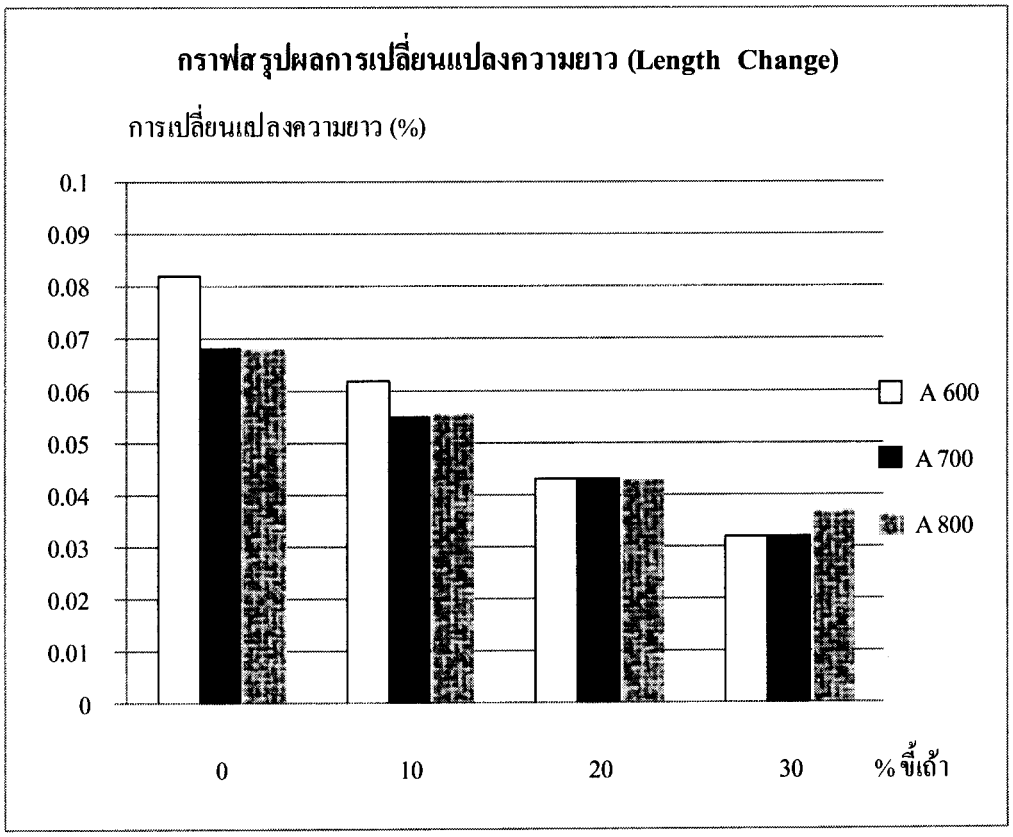
ความหนาแน่น	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	ความยาวของตัวอย่างทดสอบ (cm)				อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
		ความยาวปกติ	หลังจากผ่านตู้อบแห้งอุณหภูมิ 105 °C	หลังจากควบคุมอุณหภูมิ 25 °C	ความยาวที่เปลี่ยนแปลง (cm)		
A 600	0	60 cm	59.474	59.500	0.026	0.078	$\overline{X}$=0.082
						0.085	S.D.=0.0030
						0.085	
						0.080	
						0.082	
	10	60 cm	59.481	59.530	0.049	0.061	$\overline{X}$=0.062
						0.060	S.D.=0.0018
						0.064	
						0.064	
						0.061	
	20	60 cm	59.462	59.488	0.26	0.043	$\overline{X}$=0.043
						0.042	S.D.=0.0012
						0.043	
						0.045	
						0.042	
	30	60 cm	59.461	59.480	0.019	0.033	$\overline{X}$=0.032
						0.033	S.D.=0.0012
						0.032	
						0.030	
						0.032	

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ความหนาแน่น	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	ความยาวของตัวอย่างทดสอบ (cm)				อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
		ความยาวปกติ	หลังจากผ่านตู้อบแห้งอุณหภูมิ 105 °C	หลังจากควบคุมอุณหภูมิ 25 °C	ความยาวที่เปลี่ยนแปลง (cm)		
A 700	0	60 cm	59.455	59.496	0.41	0.070	$\overline{X}$=0.068
						0.068	S.D.=0.0025
						0.071	
						0.066	
						0.070	
	10	60 cm	59.451	59.484	0.33	0.054	$\overline{X}$=0.055
						0.055	S.D.=0.0018
						0.058	
						0.053	
						0.055	
	20	60 cm	59.484	59.510	0.26	0.045	$\overline{X}$=0.043
						0.045	S.D.=0.0023
						0.040	
						0.044	
						0.041	
	30	60 cm	59.476	59.495	0.019	0.030	$\overline{X}$=0.032
						0.033	S.D.=0.0014
						0.033	
						0.031	
						0.033	

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ความหนาแน่น	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	ความยาวของตัวอย่างทดสอบ (cm)				อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
		ความยาวปกติ	หลังจากผ่านตู้อบแห้งอุณหภูมิ 105 °C	หลังจากควบคุมอุณหภูมิ 25 °C	ความยาวที่เปลี่ยนแปลง(cm)		
A 800	0	60 cm	59.459	59.500	0.041	0.065	$\overline{X}$=0.068
						0.068	S.D.=0.002
						0.071	5
						0.066	
						0.070	
	10	60 cm	59.463	59.500	0.037	0.059	$\overline{X}$=0.056
						0.056	S.D.=0.002
						0.057	2
						0.053	
						0.055	
	20	60 cm	59.464	59.498	0.034	0.042	$\overline{X}$=0.043
						0.045	S.D.=0.002
						0.043	1
						0.040	
						0.045	
	30	60 cm	59.467	59.489	0.022	0.037	$\overline{X}$=0.037
						0.036	S.D.=0.001
						0.038	0
						0.038	
						0.036	



ภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว

จากการทดสอบในหัวข้อนี้ สรุปได้ว่าการแทนที่ขี้เถ้าที่มีผลกระทบน้อยสุดมีดังนี้

1. ในระดับความหนาแน่น A600 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 30%
2. ในระดับความหนาแน่น A700 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 30%
3. ในระดับความหนาแน่น A800 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 30%

ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอนุภาคเล็กและเป็นเม็ดกลม เข้าไปแทรกตัวที่เนื้อของคอนกรีตมวลเบาได้ดี เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงส่งผลให้การหดตัวน้อยในช่วงแรกของการทดสอบ ซึ่งเป็นผลดีต่อคอนกรีตมวลเบา

3.4 การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

จากตารางที่ 24 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการทดลองและผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1504-2541 ที่ความหนาแน่น 700 kg/m^3 และ 800kg/m^3 ซึ่งมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 10 และนำมาเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตดังตารางที่ 25 การคิดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบาในงานวิจัยนี้จะไม่รวมค่าอุปกรณ์ ค่าแรงงาน และค่าใช้จ่ายในการขนส่งขี้เถ้า พบว่าต้นทุนการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปที่วางขายตามท้องตลาดมีราคาอยู่ที่ 18 บาท/ก้อน

และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการทดลองและผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1504-2541 คือการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์อ๊อกไซด์ ร้อยละ 10 มีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 10.24 บาท/ก้อนและ11.67 บาท/ก้อน

จากผลการทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าคอนกรีตบล๊อคมวลเบาที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตบล๊อคมวลเบาเพื่อใช้ในการก่อสร้างที่มีราคาถูกและมีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลเบา

คุณสมบัติทางกายภาพ	เกณฑ์มาตรฐาน	สถาบันที่รองรับ
ความหนาแน่น	600 - 700 กก./ลบ.ม.	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
กำลังอัด	ไม่น้อยกว่า 40 กก./ตร.ซม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อัตราการดูดกลืนน้ำ	ไม่เกิน 32 % โดยปริมาณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ค่าการยืดหดตัว	0.03 มิลลิเมตร	กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ที่มา : บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

วัตถุดิบ	ปริมาณที่ใช้ (กก.)		ราคา(บาท)	คิดเป็นเงิน (บาท)	
	A700	A800		A700	A800
ทราย	5.80	6.60	0.25	1.45	1.65
ซีเมนต์	1.60	1.80	2.1	3.36	3.78
ปูนขาว	0.77	0.90	3.1	2.38	2.79
ขี้เถ้า	0.20	0.20	-	-	-
ผงอลูมิเนียม	0.010	0.012	200	2	2.4
น้ำมันทาแบบ	0.03	0.03	35	1.05	1.05
			รวม	10.24	11.67

ที่มา : บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด