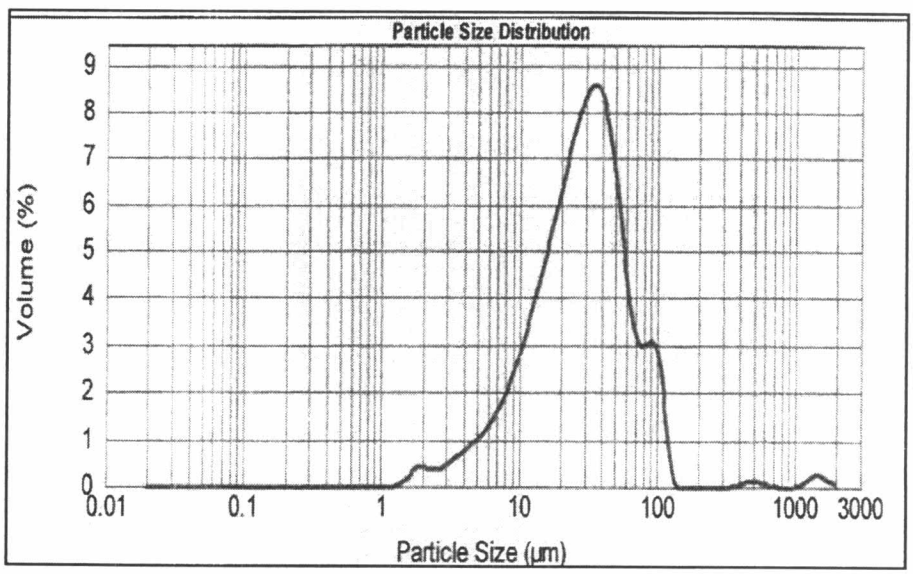
บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

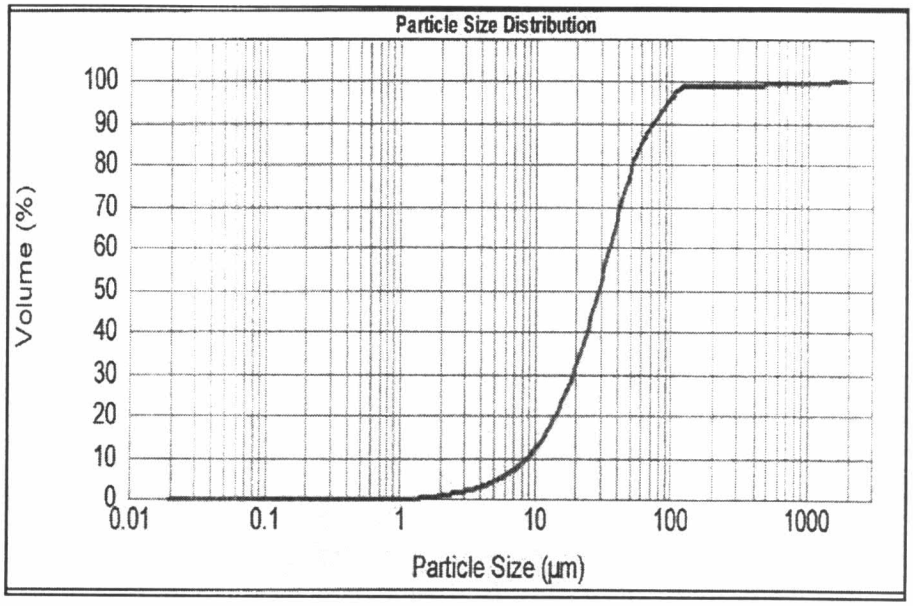
4.1.1 การหาขนาดของเถ้าลอยชานอ้อย

จากการทดลองหาขนาดของเถ้าลอยชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลของบริษัทน้ำตาลสระบุรี จำกัด ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) พบว่าขนาดเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ในการทดลองนี้ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 100 ไมโครเมตร ดังแสดงผลในรูปที่ 4.1 ส่วนรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบของเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

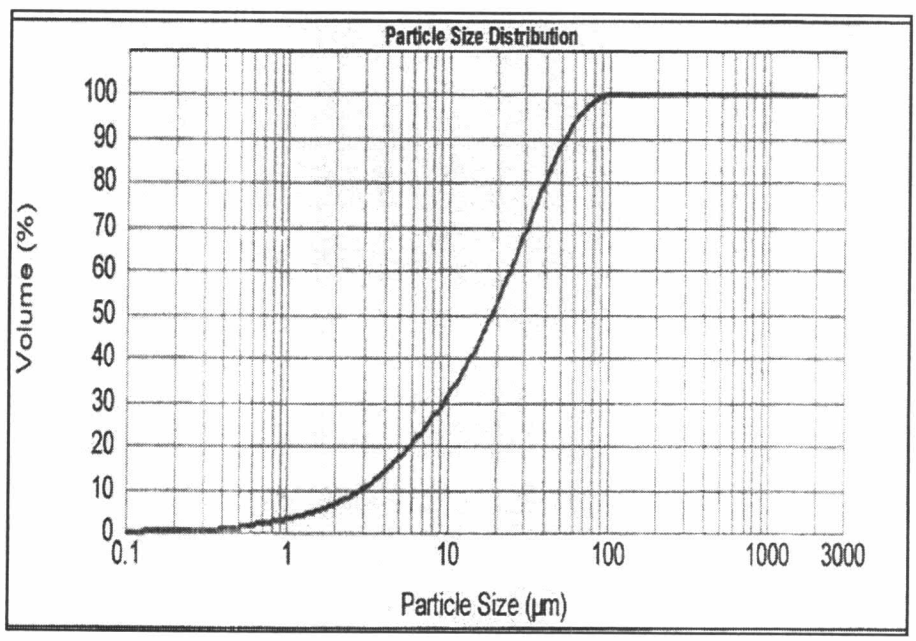


รูปที่ 4.1 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อย

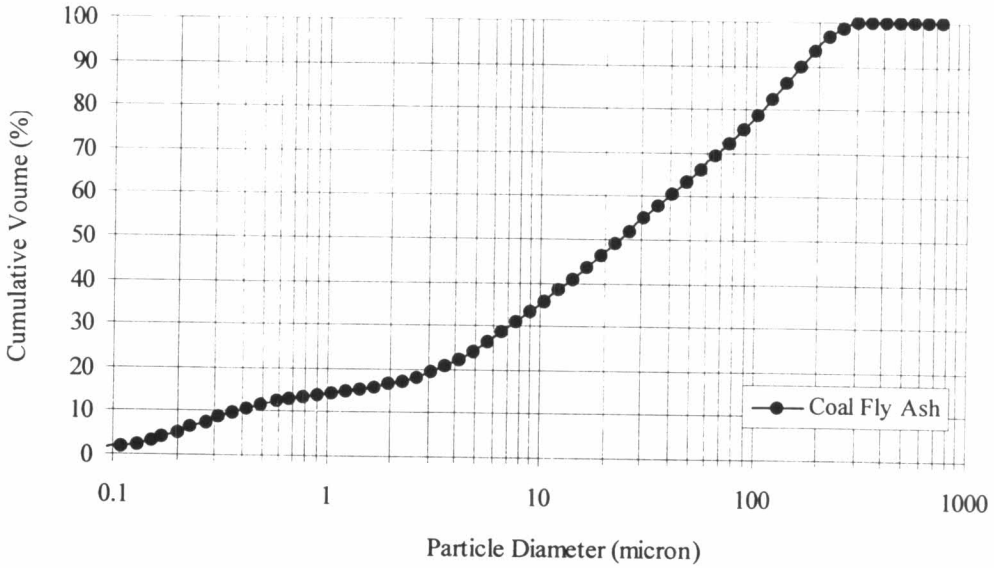
จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงจะเห็นว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดละเอียดกว่าเถ้าลอยชานอ้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยลิกไนต์ ที่แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002) จะเห็นว่า เถ้าลอยลิกไนต์มีการกระจายอนุภาคที่กว้างกว่าเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด สำหรับขนาดอนุภาคที่ร้อยละโดยปริมาตรสะสมเท่ากับ 10 50 และ 90 แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยชานอ้อย



รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.4 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยลิกไนต์ (ที่มา : Inthasaro, 2002)

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนิดตัวอย่าง	$d_{10\%}$ (ไมโครเมตร)	$d_{50\%}$ (ไมโครเมตร)	$d_{90\%}$ (ไมโครเมตร)
เถ้าลอยชานอ้อย	9.037	29.528	74.265
เถ้าลอยลิกไนต์	5.330	60.290	307.770
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.941	18.238	52.476

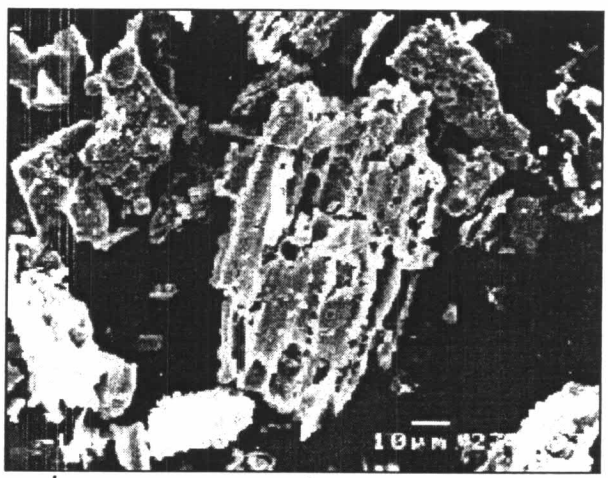
หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002)

ในงานศึกษาของ Vinod และคณะ(2002) ได้ใช้เถ้าลอยชานอ้อยกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดคือ ทองแดงและสังกะสี พบว่าขนาดของอนุภาคยิ่งมีขนาดเล็กลงจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มขึ้น โดยที่ขนาด 100-150 ไมโครเมตรมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99.9 ขนาด 200-250 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 95.0 ไมโครเมตร และขนาด 300-350 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 88.0 และเมื่อพิจารณาค่า $d_{90\%}$ จากตารางที่ 4.1 พบว่าขนาดของเถ้าลอยชานอ้อยที่ร้อยละโดยปริมาตรสะสมเท่ากับ 90 อยู่ภายใต้ขนาด 74.265 ไมโครเมตร จึงอาจกล่าวได้ว่าเถ้าลอยชานอ้อยมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพใน

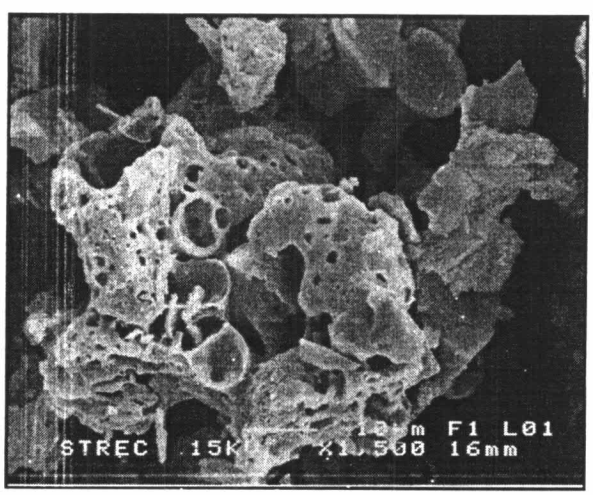
การกำจัดโลหะหนักสูงสุด สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านตะแกรงร่อน mesh 100 มาดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

4.1.2 ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยชานอ้อย

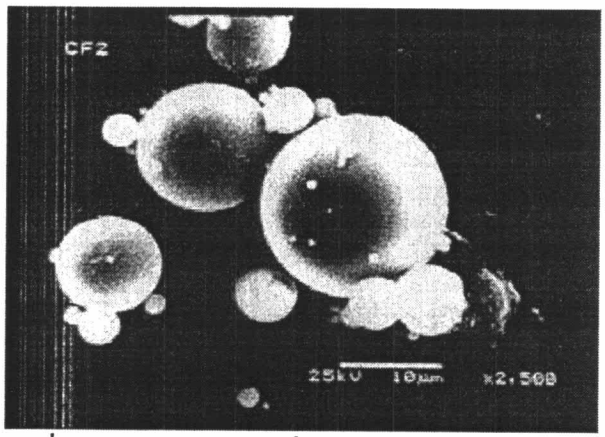
จากภาพถ่ายกำลังขยาย 750 เท่า ในรูปที่ 4.5 และภาพถ่ายกำลังขยาย 1,500 เท่า ในรูปที่ 4.6 ที่ได้จากการถ่ายภาพจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่ารูปร่างลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อยมีลักษณะอนุภาคเป็นชิ้นเป็นเหลี่ยม มีรูปร่างไม่แน่นอน คือ มีลักษณะเป็นเศษเล็กๆ จนถึงเป็นก้อนอนุภาค และมีรูเล็กๆและโพรงที่ผิวอนุภาคเป็นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อย กับลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ ในรูปที่ 4.7 พบว่ามีความแตกต่างกันมากพอสมควร โดยลักษณะทั่วๆไปของเถ้าลอยลิกไนต์ จะเป็นทรงกลมและมีผิวเรียบ



รูปที่ 4.5 เถ้าลอยชานอ้อยที่กำลังขยาย 750 เท่า



รูปที่ 4.6 เถ้าลอยชานอ้อยที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.7 เถ้าลอยลิกไนต์ที่กำลังขยาย 750 เท่า

(ที่มา : กรมทางหลวง, 2545)

ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดที่แตกต่างกันนั้น อาจเป็นผลจากลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาเผาและสภาพการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น สำหรับลักษณะอนุภาคที่กลมและผิวเรียบของเถ้าลอยลิกไนต์นั้น จะเกิดเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นถึง 1,500 องศาเซลเซียส แต่เถ้าลอยชานอ้อยมีรูพรุนมากและลักษณะอนุภาคก็จะไม่กลมอย่างสม่ำเสมอ อาจเกิดจากการเผาด้วยอุณหภูมิที่การเผาไหม้ต่ำลงมามาก (Wesche, 1991)

รูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะเป็นทรงกลมทำให้มีพื้นที่ผิวสูงเหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิว สำหรับค่าพื้นที่ผิวเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าเท่ากับ 1,490 ม.^{2}/ก.ในส่วนของผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเถ้าลอยชานอ้อยพบว่ามีค่าเท่ากับ 112.4 ม.^{2}/ก. นอกจากนี้ค่าพื้นที่ผิวจะบ่งบอกถึงคุณภาพหรือลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยหรือวัสดุละเอียดอื่นๆ ที่จะใช้ในงานซีเมนต์ รวมทั้งบอกลักษณะทางกายภาพของซีเมนต์เพสท์เมื่อผสมวัสดุนั้น เช่น ความต้องการน้ำและความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย เนื่องจากเถ้าลอยจะทำหน้าที่เสมือนตัวหล่อลื่นระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุผสม ดังนั้นหากเถ้าลอยยิ่งมีรูปร่างกลมเป็นจำนวนมากและมีขนาดพอเหมาะก็จะทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยนั้นมีคุณบัติในการใช้งานที่ดี

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุวิเคราะห์จากการคำนวณสัดส่วนมวลต่อปริมาตร มวลได้จากการชั่งน้ำหนักและปริมาตรหาโดยการแทนที่น้ำ โดยที่ความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และความพรุนของอนุภาค

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์

ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.12
เถ้าลอยชานอ้อย	1.65
เถ้าลอยลิกไนต์	2.56

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

จากตารางที่ 4.2 ค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันนั้น เนื่องมาจากส่วนประกอบทางเคมีในแต่ละวัสดุ ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีแต่ละตัวนั้น จะมีความถ่วงจำเพาะต่างกัน พวกที่มีความถ่วงจำเพาะสูง ได้แก่ คัลเซียม (CaO) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่มากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์ ส่วนพวกที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในเถ้าลอยชานอ้อย ทำให้มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ นอกจากนี้ ความถ่วงจำเพาะยังขึ้นอยู่กับความพรุนและปริมาณคาร์บอนของอนุภาค ซึ่งหากอนุภาคมีความพรุนและปริมาณคาร์บอนสูง จะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีหาโดยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) โดยตารางที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อยในรูปออกไซด์ รวมทั้งนำส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาแสดงด้วยเพื่อเปรียบเทียบกัน

ส่วนประกอบหลักของเถ้าลอยโดยทั่วไปที่สำคัญมีอยู่ 3 ชนิด คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (ประมาณร้อยละ 25-60) ,อะลูมิเนียมออกไซด์ (ประมาณร้อยละ 10-30) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ประมาณร้อยละ 5-25) หากผลรวมขององค์ประกอบทั้ง 3 นี้ มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 70 ASTM C 618-96 จัดเถ้าลอยดังกล่าวเป็นเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F สำหรับเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C ส่วนใหญ่จะมีสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณสูง ดังนั้น ASTM C 618 จึงกำหนดผลรวมขององค์ประกอบหลักทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวให้มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 50 เท่านั้น

เถ้าลอยชานอ้อยมีส่วนประกอบหลักคือ ซิลิกา (SiO_2) โดยมีอยู่ร้อยละ 51.96 โดยน้ำหนัก และมีผลรวมของซิลิกา อลูมินาและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) เท่ากับร้อยละ 54.15 โดยน้ำหนัก สารประกอบส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ซึ่งคือปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เมื่อเปรียบเทียบผลรวมของซิลิกา อลูมินาและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) นี้ กับของเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่ง

มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 78.27 และ 28.54 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อยมาก

โดยปกติมักไม่นิยมทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในวัสดุประเภทเถ้าลอยโดยตรง แต่จะสมมุติว่าปริมาณคาร์บอนมีค่าเท่ากับค่าน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (Loss on ignition, LOI) อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาจะรวมถึงปริมาณน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูญเสียไปจากการสลายตัวของสารประกอบประเภทไฮเดรตหรือคาร์บอเนตในกระบวนการเผาด้วย สำหรับเถ้าลอยชานอ้อย มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 33.17 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าค่าตามมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96) ที่กำหนดชั้นคุณภาพ F และ C ให้มี LOI มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดย LOI หรือคาร์บอนในเถ้าลอยชานอ้อยนี้จะดูดน้ำเมื่อทำการผสมเพื่อทำมอร์ตา ทำให้น้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงจะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อย กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96) จะเห็นว่าเถ้าลอยชานอ้อยไม่อาจจัดอยู่ในชั้นคุณภาพใดๆได้ เนื่องจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) และซิลิกา (SiO_2) ของเถ้าลอยชานอ้อยไม่ตรงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อยกับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96)

คุณสมบัติ	ชั้นคุณภาพ N	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C	เถ้าลอยชานอ้อย
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ %ต่ำสุด	70.0	70.0	50.0	54.15
SO_3 %สูงสุด	4.0	5.0	5.0	0.11
ปริมาณความชื้น %สูงสุด	3.0	3.0	3.0	2.15
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ %สูงสุด	10.0	6.0	6.0	33.17

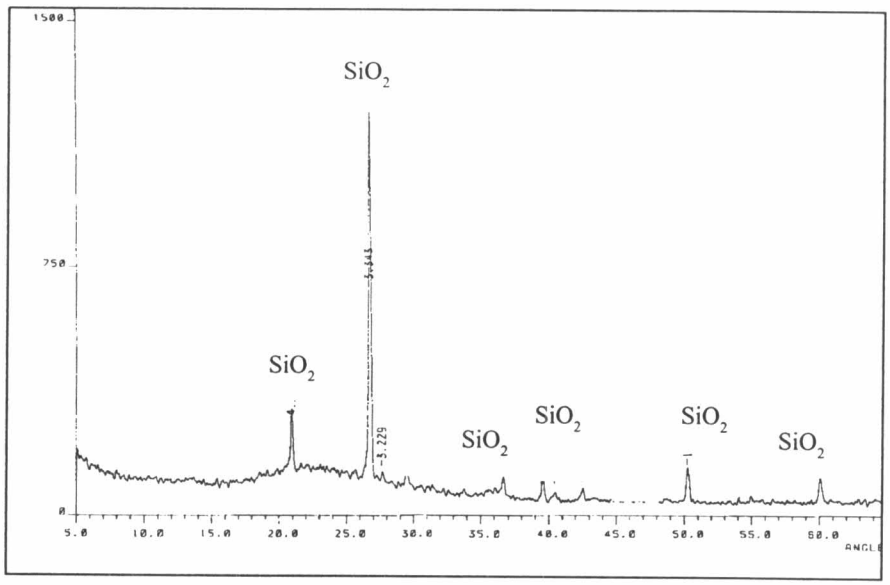
ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดของเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งได้จากวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณโลหะหนักทุกชนิดในน้ำสกัดจากเถ้าลอยชานอ้อยอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้น เถ้าลอยชานอ้อย จึงสามารถนำมาใช้แทนที่ซีเมนต์ได้ โดยไม่ผิดกฎหมาย

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของน้ำสกัด ของเถ้าลอยชานอ้อย

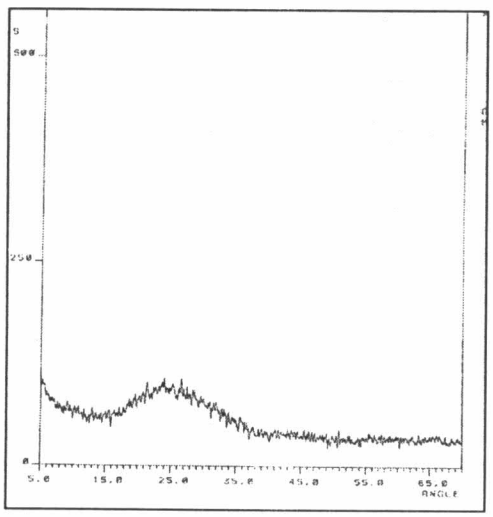
ชนิดโลหะหนัก	เกณฑ์กำหนด (มก./ล.)	ความเข้มข้นของน้ำสกัดเถ้าลอยชานอ้อย (มก./ล.)
Ag	5	<0.007
As	5	<0.05
Ba	100	0.100
Cd	1	<0.005
Cr	5	<0.007
Hg	2	<0.03
Pb	5	<0.05
Sg	1	<0.09

4.1.4 องค์ประกอบทางแร่

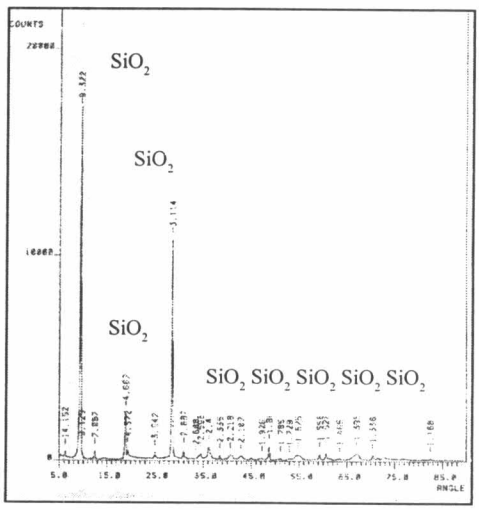
เถ้าลอยชานอ้อยมีองค์ประกอบทางแร่และเฟสที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยเนื้อที่แตกต่างกัน (Heterogeneous phase) คือส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Glassy phase) และส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline phase) โดยที่องค์ประกอบทางแร่ซึ่งแสดงในรูปผลึก (crystalline phases) ของเถ้าลอยชานอ้อยที่วิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) แสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.9 กับ รูปที่ 4.10 พบว่า สารประกอบตัวหลักที่พบมากของเถ้าลอยชานอ้อย คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งอยู่ในรูปควอทซ์ (Quartz) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นผลึก และมีเพียงบางส่วนที่อยู่ในรูปอสัณฐาน(amorphous หรือ ในรูปกล๊าส) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เป็นผลึก จากการศึกษาในอดีต พบว่า สารประกอบที่สำคัญของเถ้าลอยโดยทั่วไปนั้นมี 3 ลักษณะที่สำคัญรวมกันอยู่ คือ ควอทซ์ (Quartz) กล๊าส (Glass) และ มูลไลต์ (Mullite) โดยมีเฉพาะกล๊าสเท่านั้นที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ดี แต่อีกสองลักษณะที่เหลือจะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้น้อย จากรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) ของเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะ ที่ทำการศึกษาโดย Inthasaro (2002) จะเห็นว่า ส่วนประกอบหลักของเถ้าลอยลิกไนต์นั้น อยู่ในรูปอสันฐาน (amorphous หรือ ในรูปกล๊าส) มีส่วนประกอบในรูปผลึกหรือควอทซ์ (Quartz)ไม่มากนักที่ตรวจพบ ซึ่งเหมือนกับผลการวิจัยโดยผู้วิจัยก่อนหน้านี้หลายท่านที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับเถ้าลอยลิกไนต์ การที่เถ้าลอยลิกไนต์มีส่วนประกอบหลักในรูปอสันฐาน (amorphous หรือ ในรูปกล๊าส) ซึ่งทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี ทำให้มีคุณสมบัติปอซโซลานเมื่อผสมในคอนกรีต เป็นเหตุให้เถ้าลอยลิกไนต์สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงาน ก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ



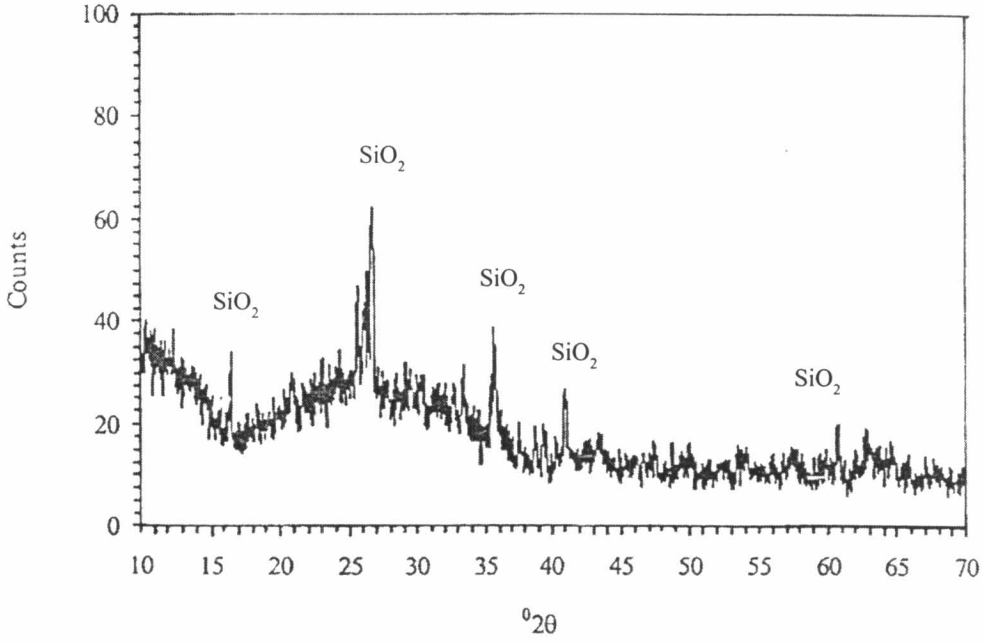
รูปที่ 4.8 ผล XRD ของเถ้าลอยชานอ้อย



รูปที่ 4.9 ผล XRD ของตัวอย่างวัสดุที่อยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous หรือ ในรูปกล๊าส)



รูปที่ 4.10 ผล XRD ของตัวอย่างวัสดุที่อยู่ในรูปควอทซ์ (Quartz)



รูปที่ 4.11 ผล XRD ของเถ้าลอยลิกไนต์

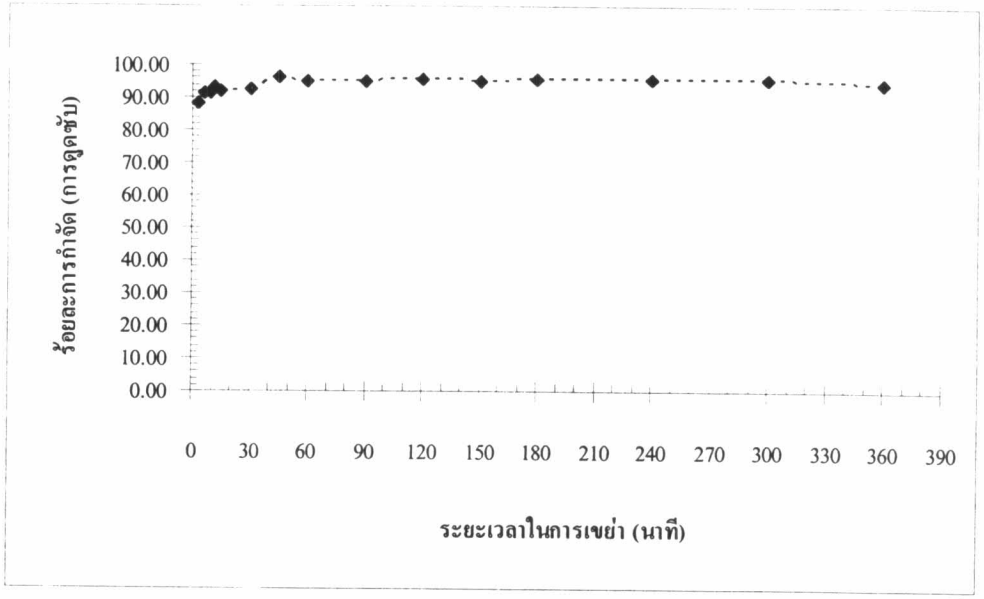
ที่มา : Inthasaro, 2002

4.2 ขั้นตอนการดูดซับ

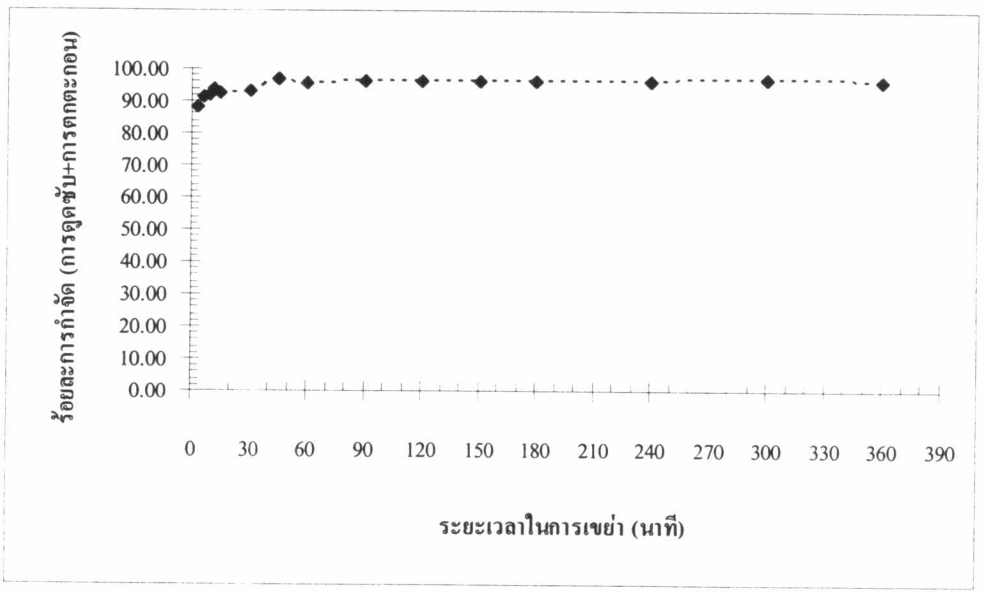
4.2.1 การศึกษาถึงเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้กำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองนี้ทำการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อเข้าสู่สมดุลโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 4 ในการทดสอบการกำจัดด้วยเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ

ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 และในภาคผนวกตารางที่ ก1 ในช่วงระยะเวลาในการเขย่า 15 นาทีแรก การกำจัดตะกั่วจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยสามารถกำจัดได้จาก 0 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 91.82 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดซับ และจาก 0 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 92.55 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน และภายหลังจาก 15 นาที การกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนค่อนข้างจะคงที่ คือมีร้อยละการกำจัดเป็น 91.82 ที่ระยะเวลาในการเขย่า 15 นาที จนกระทั่งร้อยละการกำจัดเป็น 94.34 ที่ระยะเวลาในการเขย่าเป็น 360 นาที สำหรับการดูดซับ และมีร้อยละการกำจัดเป็น 92.55 ที่ระยะเวลาในการเขย่า 15 นาที จนกระทั่งร้อยละการกำจัดเป็น 95.99 ที่ระยะเวลาในการเขย่าเป็น 360 นาที สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ซึ่งเวลาที่เหมาะสมหรือเวลาที่เริ่มคงที่ในการกำจัดทั้งการดูดซับ และการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน คือ 45 นาที



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อย 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 4



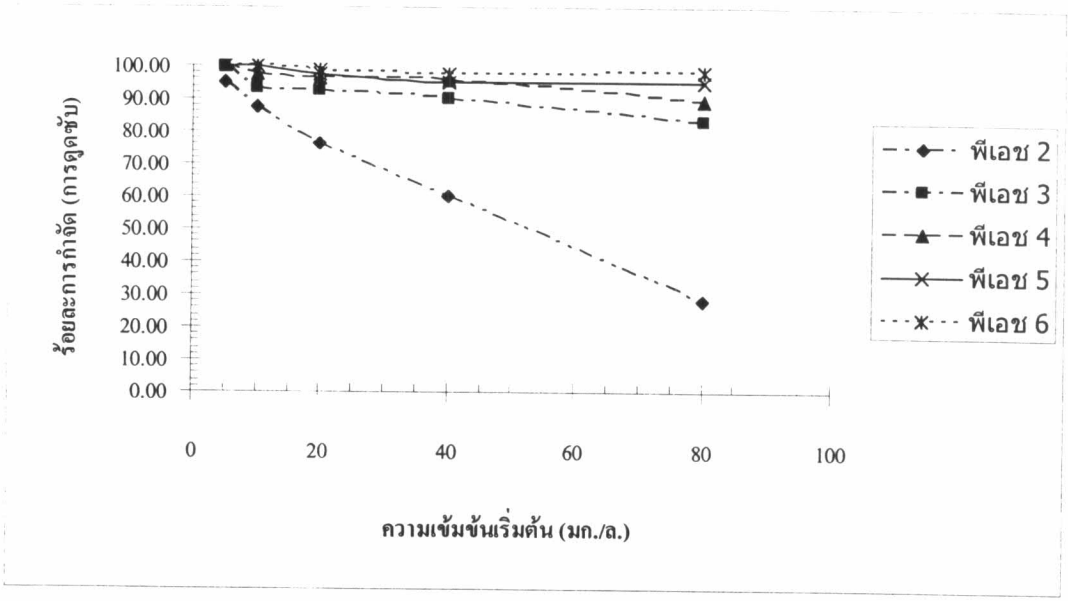
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อย 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 4

4.2.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วของเถ้าลอยชานอ้อย

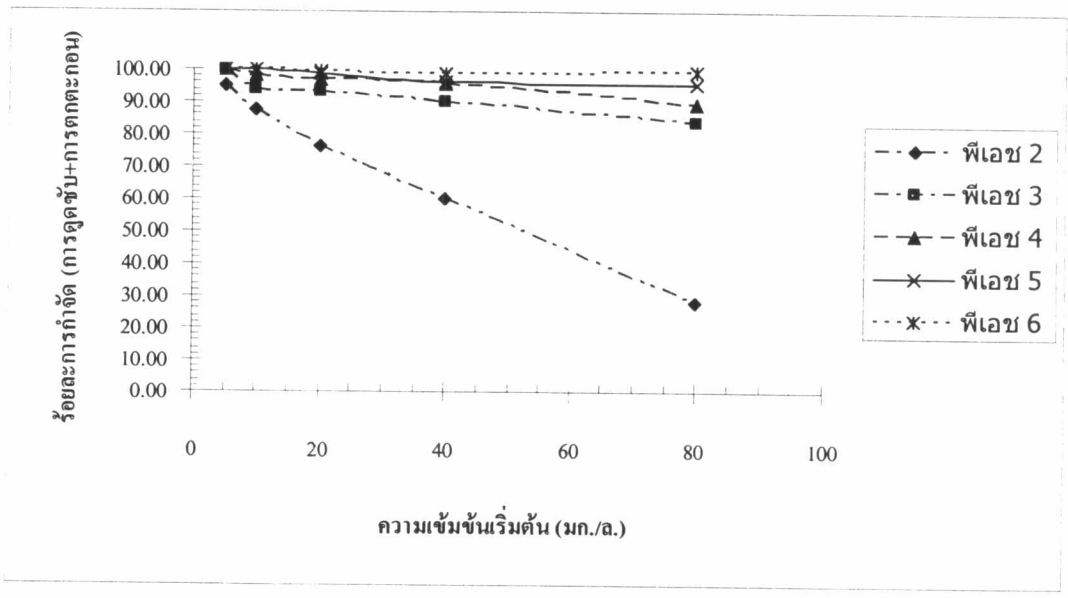
การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 10 20 40 และ80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 ถึง 6 ในการทดสอบการกำจัดด้วยเถ้าลอยชานอ้อย ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยทำการเขย่าเป็นเวลา 45 นาที ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 และในภาคผนวกตารางที่ ก2

ซึ่งผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้งการดูดซับเพียงอย่างเดียวและจากการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน จะมีค่าร้อยละการกำจัดที่ใกล้เคียงกันมากทุกช่วงพีเอชที่ทำการทดลอง (พีเอช 2-6) และเมื่อพิจารณาการละลายน้ำของตะกั่ว ตะกั่วจะตกตะกอนในรูป $Pb(OH)_{2(S)}$ ในช่วงพีเอช 10 ถึง 12 จึงวิเคราะห์ได้ว่าที่พีเอช 2 ถึง 6 การกำจัดตะกั่วจะเกิดจากกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียวโดยไม่เกิดกลไกการตกตะกอนร่วมด้วย และจากผลการทดลองยังพบว่า ที่ค่าพีเอช 2 สำหรับที่ความเข้มข้น 5 10 20 40 และ80 มิลลิกรัมต่อลิตร จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดต่ำสุดของแต่ละความเข้มข้นคือมีร้อยละการกำจัดเป็น 94.83 87.53 76.08 60.01 และ27.90 ตามลำดับสำหรับการดูดซับ และมีร้อยละการกำจัดเป็น 94.96 87.70 76.25 60.25 และ28.07 ตามลำดับสำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน และประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นในค่าที่ใกล้เคียงกันมากในช่วงพีเอช 4 ถึง 6 คือ ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีร้อยละการกำจัดเป็น 100 ทั้งสำหรับการดูดซับและการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ในขณะที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีร้อยละการกำจัดเป็น 97.77 ถึง 100 สำหรับการดูดซับ และ 97.87 ถึง 100 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ส่วนที่ความเข้มข้นตะกั่ว 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีร้อยละการกำจัดเป็น 96.47 ถึง 98.44 สำหรับการดูดซับ และ 96.67 ถึง 99.54 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ที่ความเข้มข้นตะกั่ว 40 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีร้อยละการกำจัดเป็น 95.40 ถึง 97.54 สำหรับการดูดซับ และ 95.61 ถึง 98.92 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน และที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีร้อยละการกำจัดเป็น 89.08 ถึง 98.518 สำหรับการดูดซับ และ 91.55 ถึง 99.55 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน

ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ได้กำหนดให้ค่าความเข้มข้นตะกั่วในน้ำทิ้งต้องไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสำหรับความเข้นข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 3-6 ไม่มีค่าใดที่เกินค่ามาตรฐาน สำหรับที่ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ไม่มีค่าที่เกินค่ามาตรฐานเช่นเดียวกัน แต่ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าไม่มีค่าใดที่มีค่าความเข้มข้นตะกั่วต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ทุกค่าพีเอช



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัด (การดูดซับ) ของเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัด (การดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ของเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

สาเหตุที่ ค่าพีเอชสูงสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีนั้น สามารถพิจารณาจากสมการการละลายน้ำ (Hydrolysis) ของโลหะตะกั่วดังนี้คือ

$$Pb^{2+} + H_2O \longrightarrow PbOH^+ + H^+$$

$$Pb^{2+} + 2H_2O \longrightarrow Pb(OH)_2 + H^+$$

ซึ่งหากพิจารณาการแตกตัวของตะกั่วในน้ำที่ค่าพีเอชต่างๆ จะพบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ปริมาณตะกั่วไอออนอิสระ (Pb^{2+}) จะลดปริมาณลง โดยเปลี่ยนรูปไปเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($PbOH^+$) ขึ้นแทน และเมื่อพีเอชมากกว่า 8.5 ตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($PbOH^+$) ก็จะลดลงและเกิดตะกอน $Pb(OH)_2$ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งผลการทดลองจะสอดคล้องกับการวิจัยของ Yavada และคณะ(1989) ซึ่งกล่าวว่าการดูดซับของตะกั่วในน้ำเสีย จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ค่าพีเอช การแตกตัวของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างตะกั่วกับ Al_2O_3 และ SiO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในเถ้าลอย และการยึดเกาะกันของตะกั่วบนพื้นผิวของ Hydrous alumina และ Hydrous silica เป็นดังสมการ

$$\equiv AlOH + Pb^{2+} \longleftrightarrow \equiv AlO\,Pb^+ + H^+$$

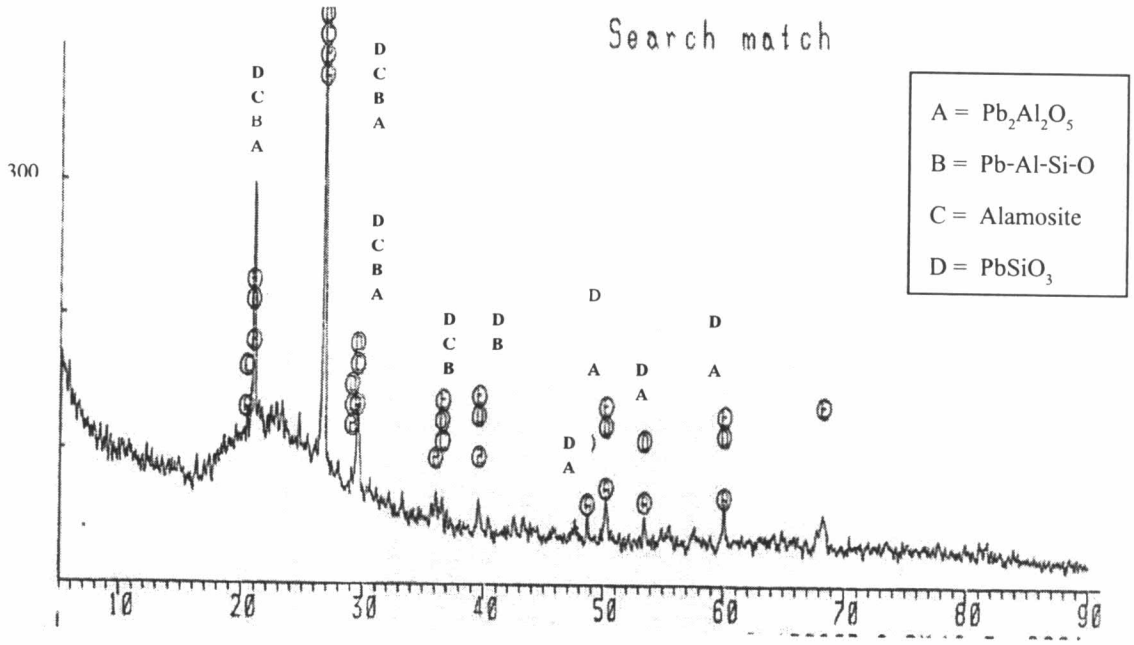
$$2[\equiv AlOH] + Pb^{2+} \longleftrightarrow [AlO]_2\,Pb^+ + H^+$$

$$=SiOH + Pb^{2+} \longleftrightarrow =SiO\,Pb^+ + H^+$$

$$2[=SiOH] + Pb^{2+} \longleftrightarrow [SiO]_2\,Pb^+ + H^+$$

จากการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าสารประกอบตัวหลักที่พบมากของเถ้าลอยชานอ้อย คือ ซิลิกา (SiO_2) และรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Pb^{2+} SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งอาจเกิดเป็นสารประกอบใหม่ๆได้ แต่ไม่สามารถจะยืนยันได้แน่ชัดว่าเป็นสารประกอบตัวใด ดังนั้นสารประกอบต่างๆที่นำเสนอในรูปที่ 4.16 เป็นเพียงความน่าจะเป็นไปได้เท่านั้น และจากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR Spectroscopy) เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ในเถ้าลอยชานอ้อย พบว่าซิลิกาที่มีในเถ้าลอยชานอ้อยจะอยู่ในหมู่ฟังก์ชันของ 3-Chloropropyl trimethoxysilane ซึ่งเป็นหนึ่งในหลายๆองค์ประกอบที่มีอยู่ในเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Charles และคณะ (1985) ซึ่งได้ทำการปรับปรุงลักษณะของ Syloid 266 silica ให้มีหมู่ฟังก์ชันของ silanes ซึ่งแสดงดังสมการข้างต้น เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวของซิลิกาในรูปของคาร์บอกซิล เพื่อให้ซิลิกาสามารถทำปฏิกิริยาการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ที่ซิลิกาที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของ 3-Chloropropyl

trimethoxysilane จะช่วยให้เถ้าลอยชานอ้อยสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.16 ผล XRD ของเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว

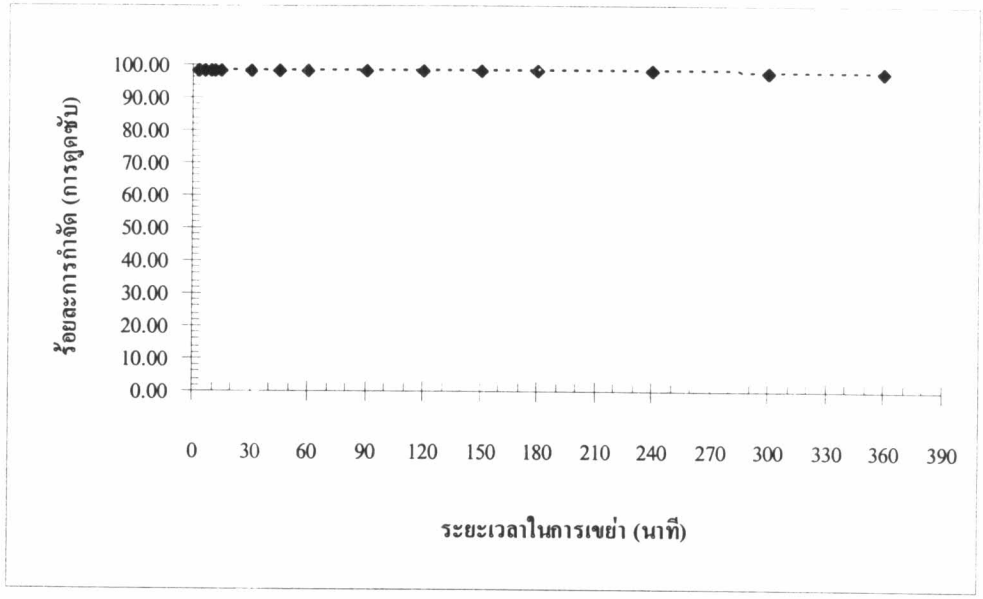
และเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับเทียบกับปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ พบว่าเมื่อค่าความเข้มข้นสูงขึ้น จะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วย ซึ่งที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเป็น 6 จะมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วของเถ้าลอยชานอ้อยสูงที่สุดเท่ากับ 8.019 มิลลิกรัมต่อกรัมเถ้าลอยชานอ้อย และมีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 99.46 ซึ่งจะเลือกใช้ค่านี้สำหรับการทดลองศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว สำหรับการทดลองต่อไป

4.2.3 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วสำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ

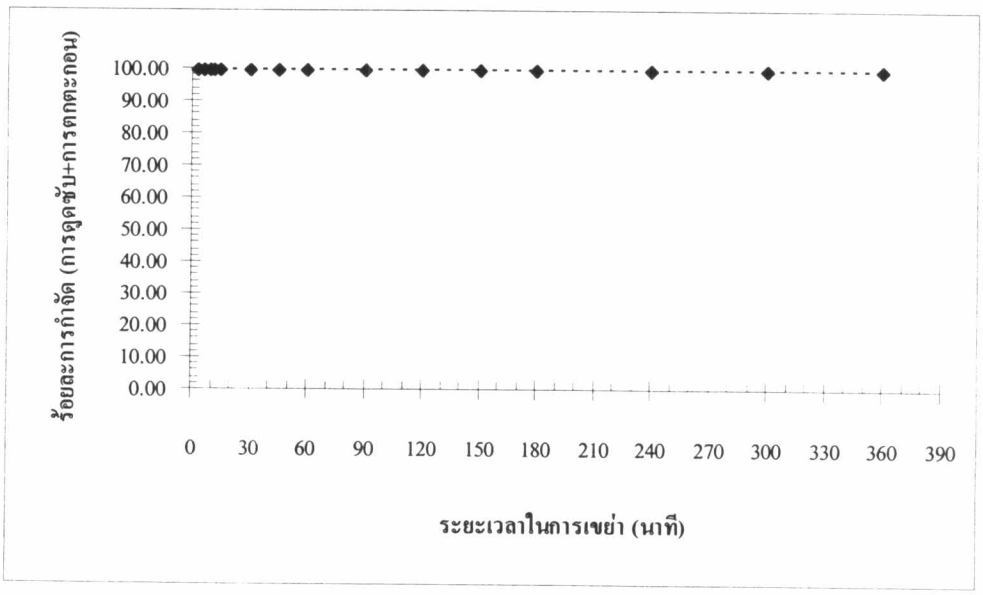
การทดลองขั้นนี้จะทำการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ในการทดสอบการดูดซับด้วยเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ

ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 และในภาคผนวกตารางที่ ก3 พบว่าการกำจัดตะกั่วจะค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ 3 นาทีแรกที่เริ่มทำการเขย่า ซึ่งอาจจะเริ่มคงที่โดยใช้เวลาที่น้อยกว่านี้แต่ไม่สามารถทำการทดลองที่ใช้เวลาน้อยกว่านี้ได้เนื่องจากขีดความสามารถของเครื่องมือที่

ใช้มีข้อจำกัด โดยมีร้อยละการกำจัดที่ 3 นาทีเป็น 98.16 และเมื่อเขย่าครบ 360 นาที ร้อยละการกำจัดเป็น 99.46 ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมของการกำจัดตะกั่วคือ 3 นาที



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อย 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 6



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อย 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 6

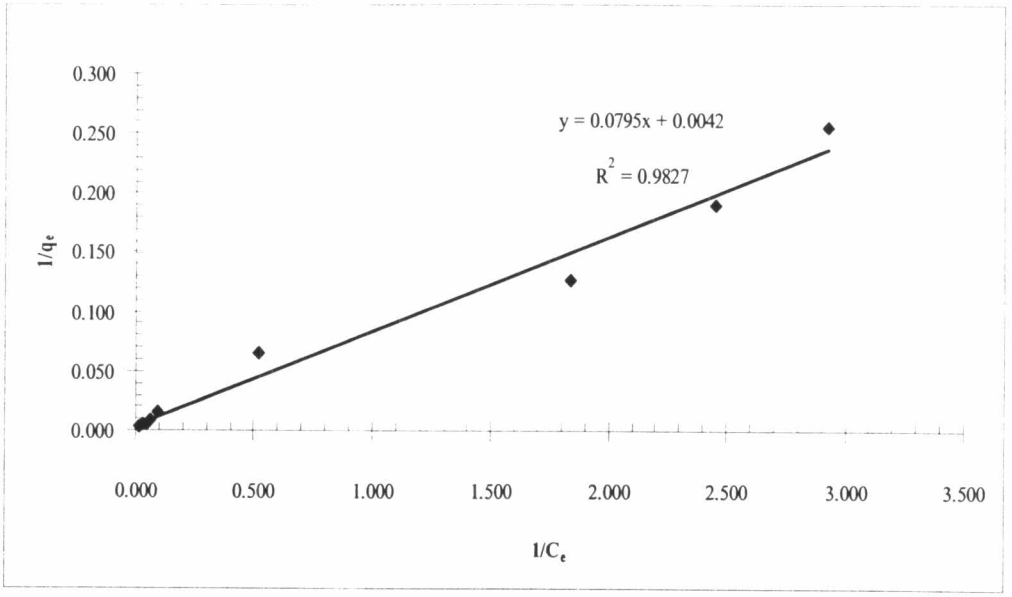
4.2.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว

การทดลองจะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ในการทดสอบการดูดซับด้วยเถ้าลอยชานอ้อยโดยแปรเปลี่ยนปริมาณเป็น 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 1 5 10 15 และ 20 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เป็นระยะเวลา 3 นาที ผลการทดลองแสดงดังตาราง 4.5 และในภาคผนวกตารางที่ ก4

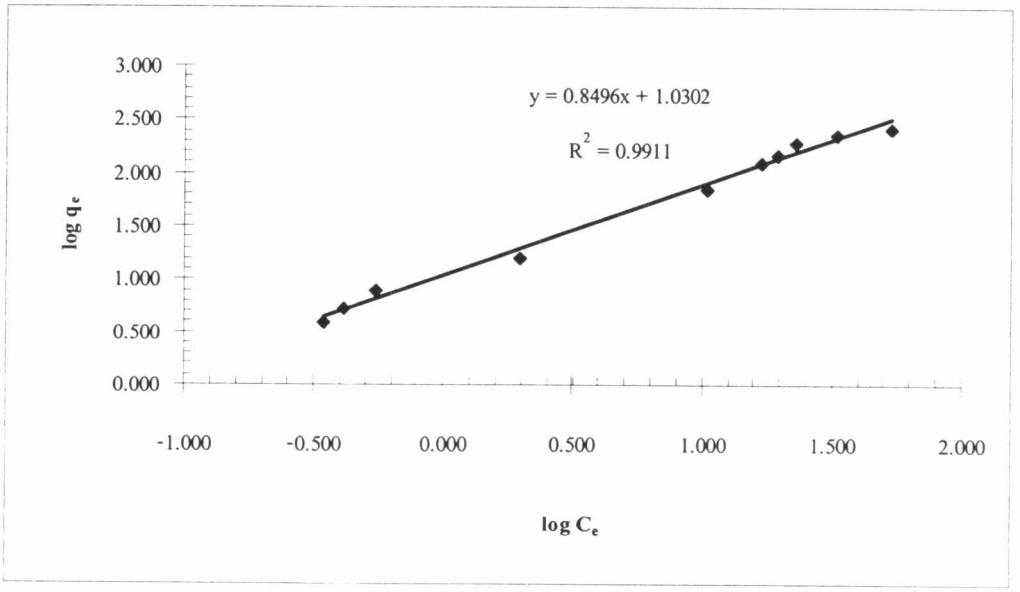
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล. น้ำตัวอย่าง)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (มก./ล.)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (มก.ตะกั่ว/ก. เถ้าลอยชานอ้อย)
0.1	25.250	252.500
0.2	46.171	230.855
0.3	55.416	184.720
0.4	59.510	148.775
0.5	61.944	123.888
1	68.402	68.402
5	76.953	15.391
10	78.337	7.834
15	78.474	5.232
20	78.541	3.927

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้สูงขึ้น จะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วลดลง และเมื่อนำข้อมูลผลการทดลองมาทำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และ ฟรุนดลิช ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

จากงานวิจัยของ Yavada และคณะ (1989) พบว่าการนำเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์มาใช้ในการดูดซับตะกั่วจะมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แต่เมื่อพิจารณาที่ค่า R-square ของไอโซเทอมทั้ง 2 แบบที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าค่า R-square ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิชมีค่าใกล้เคียงกันคือ มีค่าเป็น 0.9827 และ 0.9911ตามลำดับ ดังนั้นการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อยจึงน่าจะมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมทั้งแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช โดยที่ไอโซเทอม

การดูดซับแบบฟรุนดลิชจะใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว และจะสอดคล้องกับสมมติฐานของแบบจำลองแลงมัวร์ที่ว่าโมเลกุลจะถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ และเป็นการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งโมเลกุล (Single layer adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดเล็ก และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของตัวดูดซับ ซึ่งจะตรงกับลักษณะของเถ้าลอยชานอ้อย โดยรูปแบบไอโซเทอมแบบแลงมัวร์โดยทั่วไปคือ

$$q_e = Q_o bC_e / (1+bC_e)$$

สามารถนำมาเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$(1/qe) = (1/bQ_o)(1/Ce)+(1/Q_o)$$

จากสมการเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log $1/q_e$ กับ $1/C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.0805 และมีจุดตัดแกนเท่ากับ 0.0042 ซึ่งจะได้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 238.09 มก./ก. และสำหรับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชโดยทั่วไปคือ

$$q_e = KC^{1/n}$$

สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของล็อกการิธึมได้ ดังนี้

$$\text{Log } q_e = \log K + (1/n) \log C$$

สำหรับไอโซเทอมกำจัดตะกั่วของเถ้าลอยชานอ้อยแบบฟรุนดลิชเป็นดังสมการ

$$\text{Log } q_e = 1.0302 + 0.8496 \log C$$

จากสมการเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log q_e กับ log C จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.8496 และมีจุดตัดแกนเท่ากับ 1.0302 โดยทั่วไปค่า 1/n ที่ได้จากการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า 1/n ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ดี นอกจากนี้ค่า n ยังใช้เป็นตัวบอกความสามารถในการดูดซับและความจุของตัวดูดซับได้อีกด้วย โดยถ้าค่า n มากกว่า 1 หมายความว่าตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี และถ้าค่า n อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 หมายความว่าการดูดซับนั้นสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี เมื่อพิจารณาสมการแบบฟรุนดลิชที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่า1/n และ n มีค่าเท่ากับ 0.8496 และ 1.177 ตามลำดับ อาจบอกได้ว่าเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายได้ดี

ในการเตรียมเถ้าลอยชานอ้อยเพื่อใช้ในการทดลองการทำเป็นก้อนแข็งจะใช้สภาวะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 80 มก./ล. พีเอช 6 ปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยเท่ากับ

10 ก./ล. เนื่องจากเมื่อพิจารณาการทดลองที่ 4.2.2 จะเป็นค่าที่ให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด

4.3 ขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง

4.3.1 การศึกษาหาอัตราส่วนเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยทุกส่วนผสมจะใช้อัตราบ่ม 7 วัน

ในการศึกษาจะทำการหล่อก้อนมอร์ตาขนาด 50 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 2.75 ตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้วในปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน

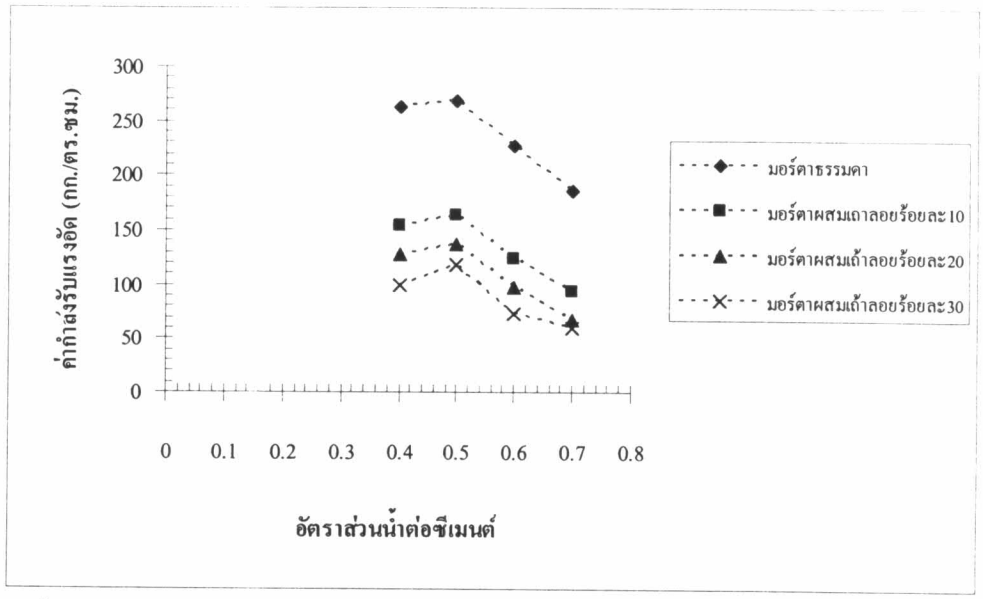
กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว แสดงในภาคผนวกตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ที่ระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7 วัน

ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยโดยน้ำหนัก	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์			
	w/c=0.4	w/c=0.5	w/c=0.6	w/c=0.7
0	262	267	226	186
10	153	163	124	94
20	127	138	98	67
30	99	119	74	60

จากรูปที่ 4.21 จะพบว่า มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้วด้วยปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว จะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดาที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เท่ากับ 0.5 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของแต่ละอัตราส่วนมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้วทุกปริมาณการแทนที่ โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว ด้วยปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 เท่ากับ 163 138 และ 119 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดาคิด

เป็นร้อยละ 60.87 51.44 และ 44.42 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดในแต่ละปริมาณการแทนที่ มีค่าต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

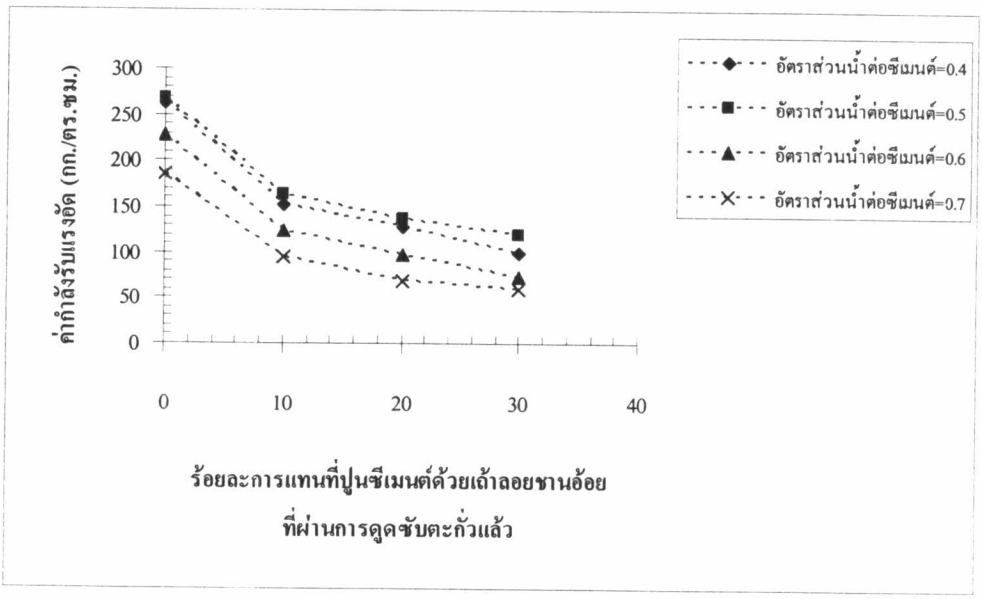


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วที่ปริมาณต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน

ตารางที่ 4.7 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ที่ระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7 วัน

ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยโดยน้ำหนัก	ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%) ของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรดา			
	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์			
	w/c=0.4	w/c=0.5	w/c=0.6	w/c=0.7
0	100	100	100	100
10	58.40	60.87	54.55	50.76
20	48.70	51.44	43.26	36.28
30	37.94	44.42	32.52	32.64

ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 ในทุกอัตราส่วนมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว เมื่อมีปริมาณการแทนที่สูงขึ้น กำลังรับแรงอัดจะมีค่าต่ำลงกว่ามอร์ตาธรรมดาที่อายุการบ่มเดียวกัน โดยที่มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว ที่มีปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้วด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 ที่มอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว เมื่อมีปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 153 163 124 และ 94 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดาคิดเป็นร้อยละ 58.40 60.87 54.55 และ 50.76 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน

ดังนั้นค่าที่เหมาะสมสำหรับมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว คือมีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้วร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 163 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา คิดเป็นร้อยละ 60.87

ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดอาจจะเป็นปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่มากในเถ้าลอยชานอ้อยคือ ร้อยละ 33.17 โดยน้ำหนัก ซึ่งคาร์บอนจะดูดน้ำที่ใช้ผสมขณะทำมอร์ตา ทำให้มีปริมาณน้ำที่จะใช้ทำปฏิกิกริยาไฮเดรชั่นลดลง และตัวอย่างที่ผสมได้นั้นจะมีลักษณะ ร่วน แห้ง เกาะตัวกันได้ไม่ดี โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้เถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ในปริมาณสูง คือ ร้อยละ 20 และ 30 ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Singh และคณะ(2000) ยังพบว่า เมื่อปูนซีเมนต์มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณมากขึ้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นเป็นผลให้เกิดการดูดน้ำมากขึ้น ซึ่งถ้ามีการดูดน้ำเข้าไปใช้ในการทำปฏิกิริยาในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการขัดขวางปฏิกิริยาในการก่อตัวซึ่งส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด ดังนั้นสำหรับเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 112.4 ตร.ม./ก. ซึ่งค่อนข้างสูงจึงทำให้กำลังรับแรงอัดลดต่ำลงเมื่อมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงขึ้น

การศึกษาผลการชะละลาย

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายสำหรับมอร์ตา ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว ในปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ค่าพีเอชของน้ำสกัดแสดงในตารางที่ 4.8 และในภาคผนวกตารางที่ ก9-ก11 แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของน้ำสกัดของก้อนมอร์ตามีค่าค่อนข้างสูงทั้งนี้อาจจะเกิดจากการละลายของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ เมื่อเพิ่มการแทนที่ของซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว พบว่าค่าพีเอชของน้ำสกัดมีค่าลดลงทุกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว สาเหตุมาจากส่วนผสมมีปูนซีเมนต์ลดลง คัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ชะละลายได้มีค่าลดลง พีเอชจึงลดลง และจากตารางจะเห็นว่าปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น จึงเลือกอัตราส่วนผสมของการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว เท่ากับ 0.5 เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ใช้ในการทดลองต่อไป

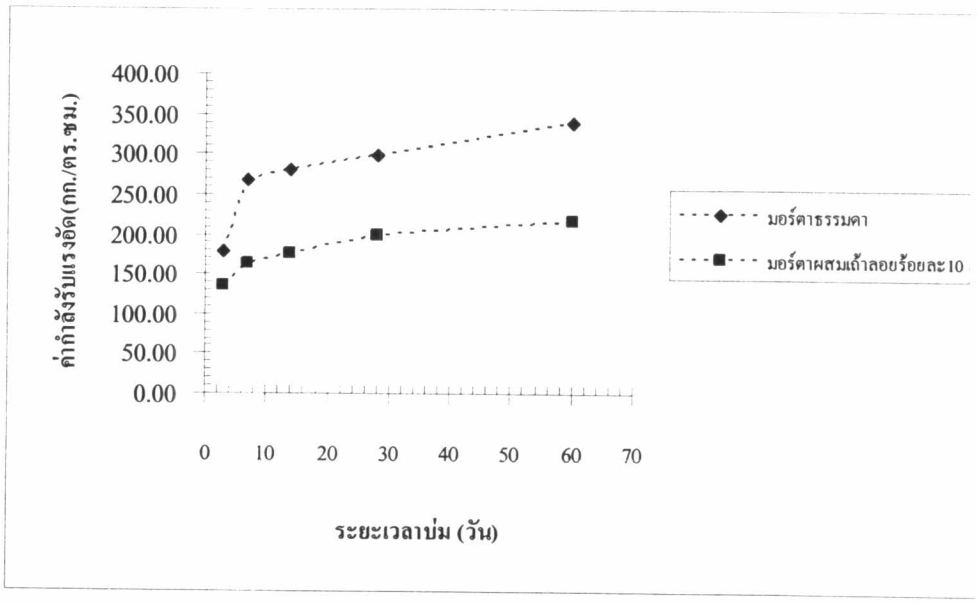
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว โดยน้ำหนัก	ค่าพีเอช	ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัด (มก./ล.)
0.4	0	12.23	N.D.
	10	12.13	0.086
	20	12.00	0.059
	30	11.86	0.038
0.5	0	12.22	N.D.
	10	12.08	0.113
	20	11.92	0.080
	30	11.84	0.032
0.6	0	12.23	N.D.
	10	12.12	0.127
	20	12.04	0.103
	30	11.84	0.044
0.7	0	12.22	N.D.
	10	12.14	0.125
	20	12.07	0.092
	30	11.91	0.050

หมายเหตุ : N.D. = มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ค่าแน่นอน

4.3.2 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่ม โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม จากการทดลองที่ 1

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด จะทำการหล่อลูกบาศก์มอร์ตา ขนาด 50 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนทรายต่อ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 2.75 ตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว ในปริมาณร้อยละ 10โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3.1 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาบ่มของมอร์ตาธรรมดาและมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อใช้เถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้วแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าต่ำมาก ทุกระยะเวลาบ่มมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดา ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว เมื่อมีการแทนร้อยละ10 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่า 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ที่กำหนดไว้ที่ 245 กก./ซม.^{2}และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา เพียงประมาณร้อยละ 67.10 ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และในภาคผนวกตารางที่ ก12-ก13

ตารางที่ 4.9 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน

ชนิดตัวอย่าง	ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
มอร์ตาธรรมดา	100	100	100	100	100
มอร์ตาธรรมดาผสมเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	75.49	60.87	62.15	67.10	63.79

เมื่อพิจารณาปริมาณซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นตัวช่วยในการพัฒนากำลังรับแรงอัดหากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่า ทั้งๆที่เถ้าลอยชานอ้อยมีปริมาณซิลิกา (SiO_2) อยู่ถึงร้อยละ 51.96 โดยน้ำหนัก แต่ก็ยังให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบด้วยวิธี X-Ray Diffractograms (XRD) ของเถ้าลอยชานอ้อย พบว่า ซิลิกา (SiO_2) ที่มีอยู่มากนั้นอยู่ในรูปของควอทซ์ (Quartz) จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมีได้น้อย

การศึกษาผลการชะละลาย

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายสำหรับมอร์ตา ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย เท่ากับ 0.5 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

จากภาคผนวกตารางที่ ก14 แสดงให้เห็นว่าพีเอชของน้ำสกัดมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น สาเหตุอาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกาบางส่วนที่อยู่ในรูปของอสัณฐาน (amorphous หรือ ในรูปกล๊าส) ซึ่งจะทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำสกัดลดลง จึงทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลงเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น ส่วนปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.4 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

ในการนำไปใช้งานจริง เนื่องจากเถ้าลอยชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากการเผาชานอ้อยในการใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงานแก่หม้อต้มระเหยของโรงงานน้ำตาล ซึ่งเป็นของเสียที่ไม่มีราคาและมีปริมาณมาก จากงานวิจัยพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้งานจริง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง หลังการบำบัดแล้วสามารถทำการแยกตะกอนออกได้ง่าย นอกจากนี้อาจนำมาบำบัดในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น เพื่อเป็นการลดปริมาณโลหะหนักส่วนหนึ่งก่อนที่จะนำไปบำบัดในขั้นต่อไป จนน้ำเสียที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ กล่าวคือในการทดลองได้มีการเติมสารเคมีเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นการควบคุมค่าพีเอชไม่ให้เปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะที่ทำให้เกิดการตกตะกอนเมื่อมีการเติมเถ้าลอยชานอ้อย เนื่องจากเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าความเป็นด่างค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานจริงอาจทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีนี้มีค่าพีเอชสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้

ส่วนกากตะกอนที่เหลือหลังจากการบำบัดนั้นควรที่จะนำไปทำให้คงรูปด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อที่จะทำให้โลหะหนักไม่สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ แต่จากการศึกษาในอดีตพบว่ากากตะกอนเถ้าลอยชานอ้อยที่เกิดขึ้นอาจมีปริมาณมากกว่าการบำบัดด้วยวิธีตกตะกอน ดังนั้นอาจไม่คุ้มค่ากับการขนส่งเพื่อส่งไปบำบัดยังสถานที่ที่รับบำบัดของเสียอันตราย จึงอาจนำกาก

ตะกอนเถ้าลอยชานอ้อยที่ได้ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในงานคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดมาก

จากค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ที่ได้จากการวิจัย ดังสรุปในตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วมีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังเช่นการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในงานคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดมาก เช่น คอนกรีตบล็อก ซึ่งมีค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดกำหนดไว้ที่ 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรืออาจใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำให้เป็นก้อนแข็ง และการปรับเสถียร ซึ่งคาดว่าจะสามารถแทนที่ได้ในปริมาณมาก เนื่องจาก มีค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดกำหนดไว้เพียง 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาในงานวิจัยนี้เป็นเพียงแนวทางเท่านั้น เพราะอาจมีสัดส่วนผสมต่างกับผลิตภัณฑ์ต่างๆที่จะทำขึ้น ทำให้ผลที่ได้อาจแตกต่างไป ในหัวข้อนี้จะทำการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำคอนกรีตบล็อก (กฤษณ์ จารุฑะวัย, 2545) ซึ่งมีค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดกำหนดไว้ที่ 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 4.10 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว และร้อยละกำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว (%)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})	ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)
0	267.34	100
10	162.74	60.87
20	137.53	51.44
30	118.75	44.42

ตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบรายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนกับการใช้เถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในส่วนผสม สำหรับอัตราส่วนผสมของวัสดุในการทำคอนกรีตบล็อก ใช้อัตราส่วน วัสดุประสาน : ทราย : น้ำ เท่ากับ 1 : 2.75 : 0.5 (วัสดุประสาน เมื่อมีเถ้าลอยแทนที่ ใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : เถ้าลอย เท่ากับ 9 : 1)

ตารางที่ 4.11 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกธรรมดา 1 ก้อน

วัสดุที่ใช้				คอนกรีตบล็อกธรรมดา	
ส่วนประกอบ	ราคา (บาท/หน่วย)	น้ำหนัก/ หน่วย (กก.)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2,320 บาท/ตัน	1,000 กก.	2.32	2.025	4.70
ทราย	250 บาท/ลบ.ม.	2,650 กก.	0.094	5.569	0.52
น้ำ	15 บาท/หน่วย	1,000 กก.	0.015	1.012	0.015
รวมค่าใช้จ่าย	-	-	-	-	5.235

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เมื่อใช้เถ้าลอยชานอ้อย ที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

ส่วนประกอบ	คอนกรีตบล็อก ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 10		คอนกรีตบล็อก ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 20		คอนกรีตบล็อก ผสมเถ้าลอยชานอ้อย ร้อยละ 30	
	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	1.823	4.23	1.620	3.76	1.418	3.29
ทราย	5.569	0.52	5.569	0.52	5.569	0.52
น้ำ	1.012	0.015	1.012	0.015	1.012	0.015
เถ้าลอยชาน อ้อย	0.203	-	0.405	-	0.608	-
รวม ค่าใช้จ่าย	-	4.765	-	4.295	-	3.825

จากตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 จะเห็นว่า ค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เท่ากับ 5.235 บาท หรือประมาณ 6 บาท เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และเท่ากับ 4.77 4.30

และ 3.82 บาท เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ทั้งนี้การเลือกว่าจะใช้ปริมาณการแทนที่เท่าไรนั้น ต้องพิจารณาถึงสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตบล็อกที่ได้จากการใช้เถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณต่างๆ โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัดว่าเป็นอย่างไร เปรียบเทียบกับราคาต่อก้อนแล้วคุ้มค่าหรือไม่ ซึ่งต้องทำการหล่อก้อนคอนกรีตบล็อกแล้วทดสอบ โดยอาจต้องปรับส่วนผสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติเป็นที่พอใจ ในราคาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุด

ทั้งนี้สำหรับการคำนวณราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน ในการคิดค่าใช้จ่ายยังต้องมีองค์ประกอบอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น

- ค่าขนส่ง จากรายงานของศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางได้ทำการประเมินค่าน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อการขนส่งของเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งเท่ากับ 0.69 บาท/กก. (กรมทางหลวง, 2545) ดังนั้นเมื่อมีการรวมค่าขนส่งแล้วอาจทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อกมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้อาจมีค่า ใช้จ่ายที่มากกว่าต้นทุน โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางในการขนส่งด้วย เพราะถ้าห่างแหล่งวัตถุดิบมาก ค่าขนส่งก็จะสูงขึ้น

- ค่าจ้างแรงงาน จากประกาศกระทรวงแรงงาน พ.ศ. 2546 พบว่าอัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำเท่ากับ 133 บาท แต่หากเป็นแรงงานในท้องที่กรุงเทพและปริมณฑลจะมีอัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำที่สูงขึ้นซึ่งเท่ากับ 170 บาท และหากเป็นแรงงานต่างจังหวัดยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่โรงงานผลิตน้ำตาลซึ่งตั้งอยู่ในจ.สระบุรี ก็จะมีอัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำเท่ากับ 151 บาท ดังนั้น ค่าจ้างแรงงานก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะนำมาพิจารณาในการคิดค่าใช้จ่ายต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก

- ค่าทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและค่าทดสอบแท่งตัวอย่าง เพื่อต้องการควบคุมคุณภาพของวัสดุที่นำมาใช้แทนปูนซีเมนต์นั้นให้อยู่ในคุณภาพที่เหมาะจะนำไปใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและทดสอบแท่งตัวอย่างอยู่เสมอ องค์ประกอบทางเคมีและค่าทดสอบแท่งตัวอย่างที่มักทำการทดสอบ เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ ค่าน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ค่าทดสอบแรงอัดที่ 7 วันและที่ 28 วัน ค่าระยะเวลาก่อตัว เป็นต้น โดยที่ค่าธรรมเนียมในการทดสอบค่าต่างๆ เหล่านี้ประมาณตัวอย่างละ 4,000-5000 บาท ซึ่งราคานี้อาจแตกต่างกันไปตามสถานที่ที่รับตรวจสอบตัวอย่างนั้นๆ

- ค่าใช้จ่ายในการจัดการเถ้าลอยหากไม่ได้เอามาใช้ประโยชน์ จากข้อมูลของ กฟผ. ในปีพ.ศ. 2544 รายงานว่าราคาของเถ้าลอยเมื่อรวมค่าขนส่งและค่าการจัดการเถ้าลอยจะอยู่ที่ 1,000 บาท/ตัน ในขณะที่ซีเมนต์ปกติจะจำหน่ายในราคาประมาณ 2,000 บาท/ตัน แต่เนื่องจากเถ้าลอยยังไม่จัดเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมจึงยังคงมีความไม่แน่นอนในการควบคุมคุณภาพและการขนส่ง อาจทำให้ค่าใช้จ่ายสูงเกินกว่า ที่จะนำมาใช้ทดแทนซีเมนต์

นอกจากนี้ยังมีราคาค่าดำเนินการต่างๆที่เกี่ยวข้องเช่น ค่าเสื่อมราคาของเครื่องมือ ค่าติดต่อประสานงานกับหน่วยงานอื่นๆ และค่าบริการอื่นๆ โดยค่าใช้จ่ายอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะเศรษฐกิจในขณะนั้น