

การใช้ถ้ำลอยซานอ้อยมาบัพัตน้ำเสียสี่ย้อมแล้วนำไปทำคอนกรีตบล็อก



นายสุเมธ เตชะกุลวิโรจน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

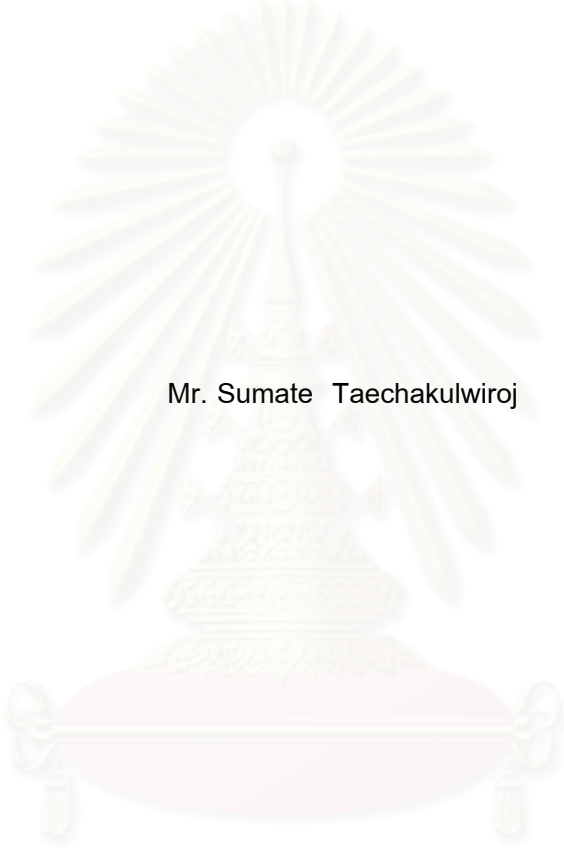
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4298-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH FOR TREATMENT OF DYEING WASTWATER
WITH SUBSEQUENT FABRICATION OF CONCRETE BLOCKS



Mr. Sumate Taechakulwiroj

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4298-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์
โดย
สาขาวิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

การใช้เถ้าลอยขานอ้อยมาบำบัดน้ำเสียสีย้อมแล้วนำไปทำคอนกรีตบล็อก
นายสุเมธ เตชะกุลวิโรจน์
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์ : การใช้เถ้าลอยชานอ้อยมาบำบัดน้ำเสียสีย้อมแล้วนำไปทำคอนกรีตบล็อก (UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH FOR TREATMENT OF DYEING WASTEWATER WITH SUBSEQUENT FABRICATION OF CONCRETE BLOCKS) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร. มนัสกร ราชากรกิจ, 141 หน้า. ISBN 974-17-4298-3

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลมาใช้ในกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ และจากนั้นนำมาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมคอนกรีต การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการดูดซับซึ่งได้ทำการศึกษาเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อม ไอโซเทอมการดูดซับ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ขั้นตอนการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ซึ่งได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระยะเวลาบ่ม และค่ากำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่า ขั้นตอนการดูดซับโดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสีได้แก่ สีดำ สีน้ำเงิน และสีแดง ความเข้มข้นเหมาะสมที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชไม่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ช่วงระหว่าง 240-300 นาที ปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสมอยู่ช่วงระหว่าง 2-4 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 97.72-99.05 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงมัวร์ ขั้นตอนการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ส่วนประกอบต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ได้แก่ อัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น คือ 1:1.1:1.9 อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสม คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม คือ 0.5 และระยะเวลาบ่ม 28 วัน ซึ่งกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม และมีราคาต้นทุนของการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซเท่ากับ 3.34 บาทต่อก้อน คอนกรีตน้ำหนัก 3.20 กิโลกรัม

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา2546.....

##4470611421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : ADSORPTION / CONCRETE BLOCK / BAGASSE FLY ASH

SUMATE TAECHAKULWIROJ : UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH FOR TREATMENT OF DYEING WASTEWATER WITH SUBSEQUENT FABRICATION OF CONCRETE BLOCKS. THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 141 pp. ISBN 974-17-4298-3

The research was conducted to study the utilization of bagasse fly ash, the waste from sugar factories, for adsorption of three reactive dyes (Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue R, and Remazol Brilliant Red F3B) and subsequent partial cement replacement to construct concrete blocks. This study was divided into 2 steps. First, adsorption studies were carried out for different contact time, initial concentration, initial pH, and adsorbent dose. In addition, suitable conditions for dye removal and isotherms models were investigated. Second, solidification studies to produce concrete blocks were carried out with varied cement-to-sand-to-gravel ratio, Portland cement replacement percentage, water-to-cement ratio, and curing time.

The experimental results indicated that the suitable initial concentrations for all dyes were 50 mg/L and initial pH of solutions did not affect dye removal. Efficiency the optimal contact times were found to be between 240-300 min and adsorbent doses between 2-4 g. The maximum efficiencies for dye removal were found to be between 97.72-99.05 %. As for the isotherm study, the results indicated that the Langmuir adsorption isotherm fitted the data better than the Freundlich adsorption isotherm. Bagasse fly ash–cement mortars can be used to directly replace Portland cement up to 20 percent by weight with a 1:1.1:1.9 ratio of cement-to-sand-to-gravel ratio, a water-to-cement ratio of 0.5, and curing time of 28 days. The unconfined compressive strength of these optimum mortars mixes met the regulatory limits issued by the Ministry of Industry and cost about 3.34 baht per 3.20 kilograms-block.

DepartmentEnvironmental Engineering..... Student's signature
 Field of studyEnvironmental Engineering..... Advisor's signature
 Academic year2003.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ ที่เอื้อเฟื้อกรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไข และสนับสนุนในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับข้อคิดเห็น และคำแนะนำ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับอุปกรณ์บางส่วนและสถานที่ในการทำงานวิจัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (ศูนย์เครือข่าย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

ขอบคุณบริษัท ไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ให้ถ้ำลอยซานอ้อยและให้ความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการผลิตน้ำตาล และ บริษัท ไดมสเตอร์ไทย จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟ

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้บางส่วน

ความดีของวิทยานิพนธ์ ขอมอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ให้ความรัก การสนับสนุน ทั้งด้านกำลังทรัพย์ คำปรึกษา และกำลังใจ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ที่สุด

ท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ทั้งในขณะศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การผลิตน้ำตาล.....	4
2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาล.....	4
2.1.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาล และการนำไปใช้ประโยชน์.....	5
2.1.3 การเผาขานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยขานอ้อยที่เกิดขึ้น.....	6
2.2 เถ้าลอย (Fly Ash).....	10
2.2.1 ส่วนประกอบทางเคมี.....	10
2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	10
2.2.3 ประเภทของเถ้าลอย.....	10
2.3 สีย้อม.....	11
2.3.1 การเกิดสีของสีย้อม.....	12
2.3.2 การจำแนกสีย้อม.....	13
2.4 สีย้อมอะโซ (Azo dyes).....	18
2.5 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes).....	18
2.5.2 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes).....	19
2.5.3 ชนิดของกลุ่มรีแอกทีฟ.....	20
2.6 กระบวนการดูดซับ.....	22
2.6.1 ประเภทของการดูดซับ.....	23
2.6.2 ปัจจัยที่มีผลกับการดูดซับ (Factors Affecting Adsorptions)....	23
2.6.3 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium).....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 คอนกรีต.....	27
2.7.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	27
2.7.2 วัสดุผสม (Aggregates).....	30
2.7.3 น้ำ.....	31
2.7.4 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น.....	33
2.8 คอนกรีตบล็อก.....	34
2.8.1 คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง.....	34
2.8.2 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....	34
2.8.3 เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....	35
2.9 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	39
บทที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.1.1 เครื่องมือ.....	47
3.1.2 วัสดุดิบ.....	47
3.1.3 สารเคมี.....	48
3.2 การดำเนินการวิจัย.....	52
3.2.1 ขั้นตอนการดูดซับ.....	52
3.2.2 ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....	55
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	57
4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	57
4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี.....	57
4.1.2 การกระจายขนาดอนุภาค.....	59
4.1.3 พื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะ.....	61
4.1.4 ความถ่วงจำเพาะ.....	62
4.1.5 ความดูดซึมน้ำของวัสดุ.....	63
4.2 ขั้นตอนการดูดซับ.....	63
4.2.1 ผลการทดลองหาเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของแก้าลอยขานอ้อย ที่ใส่ดูดซับสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	63
4.2.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มี ผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	66
4.2.3 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อม ในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ.....	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการทดลองปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมในการกำจัด สารละลายสีขุ่นในน้ำเสียสังเคราะห์.....	73
4.2.5 ผลการทดลองศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีขุ่น.....	76
4.3 ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....	80
4.3.1 ผลการทดลองศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสม ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....	80
4.3.2 ศึกษาหาอัตราส่วนผสมของแก๊สออกซิเจนที่ถูกใช้ใน การดูดซับสีขุ่นต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ การแปรค่าระยะเวลาบ่มที่เหมาะสม.....	81
4.3.3 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซ.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	94
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ประสิทธิภาพการกำจัดสีขุ่นของแก๊สออกซิเจนที่สภาวะการ เตรียมต่างๆ.....	102
ภาคผนวก ข. ประสิทธิภาพการกำจัดสีขุ่นที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	106
ภาคผนวก ค. ประสิทธิภาพการกำจัดของแก๊สออกซิเจนเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม....	110
ภาคผนวก ง. ประสิทธิภาพการกำจัดสีขุ่นในปริมาณแก๊สออกซิเจนต่างๆ.....	114
ภาคผนวก จ. ข้อมูลค่ากำลังรับแรงอัด.....	118
ภาคผนวก ฉ. ข้อมูลร้อยละกำลังรับแรงอัด.....	136
ภาคผนวก ช. รูปการจัดการแก๊สออกซิเจน.....	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141

สารบัญญัตินำ

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 618-96....	11
2.2 กลุ่มอะตอมออกซิโครม.....	12
2.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี.....	14
2.4 เปอร์เซนต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ใน สีรีแอกทีฟ แบ่งตามโทนสีต่างๆ.....	20
2.5 กลุ่มรีแอกทีฟที่สำคัญ.....	20
2.6 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต.....	27
2.7 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	28
2.8 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	29
2.9 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	29
2.10 อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ.....	31
2.11 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน สำหรับอัตราส่วนน้ำ..	32
2.12 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....	36
3.1 สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วลอยลิกไนต์ แก้วลอยชานอ้อย.....	48
3.2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	53
4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของแก้วลอยชานอ้อย แก้วลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	58
4.2 ขนาดอนุภาคของแก้วลอยชานอ้อย แก้วลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	60
4.3 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของแก้วลอยชานอ้อย.....	61
4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของแก้วลอยชานอ้อย แก้วลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..	61
4.5 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วลอยชานอ้อย แก้วลอยลิกไนต์ หินเกล็ด และทราย.....	62
4.6 เปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำของแก้วลอยชานอ้อย หินเกล็ดและทราย.....	63
4.7 ค่าคงที่ไอโซเทอมของแลงมัวร์และฟรุนดลิชสำหรับการดูดซับสีย้อม 3 โทนสี.....	76
4.8 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 คอนกรีต และระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆ.....	81
4.9 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริช 1 ก้อน.	92
ก1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแก้วลอยชานอ้อยที่สภาวะการเตรียมต่างๆ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีดำ Remazol Black R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 7 และปริมาณแก้วลอยชานอ้อย 1 กรัม.....	103

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก2 ประสิทธิภาพการกำจัดของเถาลอยชานอ้อยที่สภาวะการเตรียมต่างๆ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 7 และปริมาณเถาลอยชานอ้อย 1 กรัม.....	104
ก3 ประสิทธิภาพการกำจัดของเถาลอยชานอ้อยที่สภาวะการเตรียมต่างๆ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีแดง Ramazol Brillant Red F3R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 7 และปริมาณเถาลอยชานอ้อย 1 กรัม.....	105
ข1 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับของเถาลอยชานอ้อยที่เวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณเถาลอยชานอ้อย 1 กรัม ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีดำ Remazol Black R ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	107
ข2 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับของเถาลอยชานอ้อยที่เวลา 5 ชั่วโมง ปริมาณเถาลอยชานอ้อย 1 กรัม ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	108
ข3 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับของเถาลอยชานอ้อยที่เวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณเถาลอยชานอ้อย 1 กรัม ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง Remazol Brilliant Red F3R ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	109
ค1 ประสิทธิภาพการกำจัดของเถาลอยชานอ้อยเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีดำ Remazol Black R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.43 และปริมาณเถาลอยชานอ้อย 1 กรัม.....	111
ค2 ประสิทธิภาพการกำจัดของเถาลอยชานอ้อยเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.31 และปริมาณเถาลอยชานอ้อย 1 กรัม.....	112
ค3 ประสิทธิภาพการกำจัดของเถาลอยชานอ้อยเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีแดง Remazol Brillant Red F3R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.59 และปริมาณเถาลอยชานอ้อย 1 กรัม.....	113
ง1 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับที่ปริมาณเถาลอยชานอ้อยต่างๆ โดยใช้น้ำ เสียสังเคราะห์สีดำ Remazol Black R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.83.....	115
ง2 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับที่ปริมาณเถาลอยชานอ้อยต่างๆ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.72.....	116

สารบัญญัตราสาร (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง3 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับที่ปริมาณแก๊สลอยชานอ้อยต่างๆ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีแดง Remazol Brilliant Red F3R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.61.....	117
จ1 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 คอนกรีตและ ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆ.....	119
จ2 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยที่ไม่ได้ใส่แก๊สลอย ชานอ้อยและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4.....	120
จ3 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4.....	121
จ4 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 20 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4.....	122
จ5 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4.....	123
จ6 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 00 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5.....	124
จ7 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5.....	125
จ8 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 20 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5.....	126
จ9 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5.....	127
จ10 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 00 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6.....	128
จ11 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6.....	129
จ12 ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 20 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6.....	130
จ13 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6.....	131
จ14 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก๊สลอยชานอ้อยร้อยละ 00 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7.....	132

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ15 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก้วลอยซานอ้อยร้อยละ 10 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7.....	133
จ16 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก้วลอยซานอ้อยร้อยละ 20 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7.....	134
จ17 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของแก้วลอยซานอ้อยร้อยละ 30 โดย น้ำหนัก และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7.....	135
จ1 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ 0.4 ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆและระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ.....	137
จ2 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ 0.5 ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆและระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ.....	137
จ3 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ 0.6 ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆและระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ.....	138
จ4 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ 0.7 ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆและระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ.....	138

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแผนภูมิการผลิตน้ำตาล.....	7
2.2 กระบวนการผลิตน้ำตาล.....	8
2.3 การเผาชันอ้อยและการจัดการเถาลอยที่เกิดจากการเผา.....	9
2.4 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม.....	15
2.5 Langmuir adsorption isotherm in linear pattern.....	26
2.6 Constant value (K and n) of Freundlich equation.....	26
2.7 คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวงมาตรฐาน แบบและขนาดต่างๆ.....	37
2.8 ลักษณะและขนาดของบล็อกประสานปูพื้นแต่ละชนิด.....	38
3.1 วัสดุประสาน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (บน) วัสดุผสม ทราย (ล่างซ้าย) และหินเกล็ด (ล่างขวา).....	48
3.2 เถาลอยชันอ้อยก่อนผ่านตะแกรงคัดขนาด (ซ้าย) และ หลังผ่านตะแกรง คัดขนาด (ขวา).....	49
3.3 (ก) เครื่องเขย่า (ข) เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์.....	49
3.4 (ก) แบบหล่อก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ข) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (ค) เครื่องผสม (Mixer) มอร์ต้า.....	50
3.5 สูตรโครงสร้างสีย้อมรีแอกทีฟ Remazol Black B (ก), Remazol Brilliant Blue R (ข) และ Remazol Brilliant Red F3B (ค).....	51
4.1 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถาลอยชันอ้อย.....	59
4.2 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	59
4.3 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถาลอยลีกไนต์.....	60
4.4 ผลการทดลองหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของสีรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B)..	65
4.5 ผลการทดลองหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของสีรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R).....	65
4.6 ผลการทดลองหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของสีรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B).....	66
4.7 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัด สารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของสีดำ (Remazol Black B).....	68
4.8 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัด สารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R)...	69
4.9 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัด สารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B).....	69

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมของสีรีแอกทีฟโทเนสดำ (Remazol Black B)...	70
4.11 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมของสีรีแอกทีฟโทเนสน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R).....	71
4.12 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมของสีรีแอกทีฟโทเนสแดง (Remazol Brilliant Red F3B).....	71
4.13 ผลการทดลองหาปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสมในการกำจัดสีกำจัด สารละลายสีย้อมรีแอกทีฟโทเนส (ก) สีดำ (ข) สีน้ำเงิน และ (ค) สีแดง.....	74
4.14 เปรียบเทียบ (ก)สีย้อมก่อนการกำจัด (ข)สีย้อมหลังการกำจัด.....	75
4.15 เปรียบเทียบกราฟไอโซเทอมการดูดซับของ (ก) แลงมัวร์ (ข) ฟรุנדลิช ของ สีย้อมรีแอกทีฟโทเนสดำ (Remazol Black B).....	77
4.16 เปรียบเทียบกราฟไอโซเทอมการดูดซับของ (ก) แลงมัวร์ (ข) ฟรุנדลิช ของ สีย้อมรีแอกทีฟโทเนสน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R).....	78
4.17 เปรียบเทียบกราฟไอโซเทอมการดูดซับของ (ก) แลงมัวร์ (ข) ฟรุנדลิช ของ สีย้อมรีแอกทีฟโทเนสแดง (Remazol Brilliant Red F3B).....	79
4.18 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่แปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด.....	81
4.19 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ ที่ไม่ได้ใส่เถ้าลอยชานอ้อย..	83
4.20 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ ใส่เถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก.....	83
4.21 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ ใส่เถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก.....	84
4.22 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ ใส่เถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ30 โดยน้ำหนัก.....	84
4.23 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยและระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ 0.4.....	86

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยและระยะเวลาบ่มค่าต่าง ๆ อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ 0.5.....	86
4.25 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยและระยะเวลาบ่มค่าต่าง ๆ อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ 0.6.....	87
4.26 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยและระยะเวลาบ่มค่าต่าง ๆ อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ 0.7.....	87
4.27 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแปรค่าอัตราส่วนเถ้าลอยชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับ สีย้อมต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5.....	90
4.28 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซโดยอัตราส่วนเถ้าลอยชานอ้อยต่อ ซีเมนต์ร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน.....	90
ซ1 กองชานอ้อยที่ได้จากการหีบ.....	140
ซ2 เถ้าลอยชานอ้อยที่นำไปถมในบ่อ.....	140

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุตสาหกรรมน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันมีโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยจำนวน 46 โรงงาน ซึ่งหีบอ้อยในแต่ละปีการผลิตประมาณ 50 ล้านตัน ในกรรมวิธีผลิตน้ำตาล อ้อยจะถูกทำให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำเข้าเครื่องหีบเพื่อให้ได้น้ำอ้อยออกมา น้ำอ้อยจะผ่านกระบวนการทำให้สะอาดและนำเข้าหม้อต้มระเหยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลต่อไป วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นคือ เศษอ้อยที่ผ่านการหีบแล้วหรือที่เรียกว่า ชานอ้อย ปริมาณชานอ้อยในปีการผลิตหนึ่งๆ ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย มีไม่ต่ำกว่า 4 ล้านตัน และได้มี “โครงการส่งเสริมผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่ใช้พลังงานหมุนเวียน ครั้งที่ 2” เพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน โดยคณะกรรมการกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ให้สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพช.) ใช้เงินจากกองทุนสนับสนุนโครงการ บริษัท ไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด เป็นบริษัทหนึ่งที่ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนของโครงการเพื่อนำชานอ้อยไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สามารถรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังหมุนเวียน ภายหลังจากการเผาไหม้แล้วจะมีเถ้าลอยเกิดขึ้น ดังนั้นประมาณได้ว่าจะมีเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นี้ประมาณ 60,000 ถึง 120,000 ตันต่อปี ดังนั้นเถ้าลอยชานอ้อยที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ ไม่มีราคา เป็นภาระที่ต้องกำจัด อีกทั้งยังมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อถูกลมพัดซึ่งอาจทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ และอาจเกิดผลร้ายต่อสุขภาพเกี่ยวกับทางเดินหายใจ หากหายใจเอาเถ้าลอยเหล่านี้เข้าไป ถ้าเราสามารถนำเถ้าลอยเหล่านี้ มาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ก็จะเป็นการลดภาระในการกำจัดและได้ประโยชน์เพิ่มขึ้นในขอบข่ายของการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

อุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการพัฒนาและขยายตัวไปอย่างรวดเร็ว โดยปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมมากมายเป็นผลทำให้เกิดเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมมาก โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำเพราะโรงงานสิ่งทอและฟอกย้อมเป็นโรงงานที่มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตมาก เช่น ในกระบวนการฟอกย้อมพิมพ์ จะมีสิ่งเจือปนค่อนข้างสูง แม้ว่าข้อกำหนดตามพระราชบัญญัติของกระทรวงอุตสาหกรรมในปัจจุบันเกี่ยวกับการระบายน้ำทิ้งที่มีสีออกนอกบริเวณโรงงานได้มีข้อกำหนดไว้อย่างกว้างมากกล่าวคือ น้ำทิ้งที่จะระบายออกนอกบริเวณโรงงานต้องอยู่ในลักษณะเป็นน้ำรังเกียจ ก่อให้เกิดปัญหาในการตีความมากเพราะสีของน้ำทิ้งขนาดใดจึงถือว่าเป็นที่พึงรังเกียจ ตามความรู้สึกของประชาชนแล้วหากน้ำทิ้งไปไม่ใสก็ถือว่าเป็นน้ำที่ไม่สะอาดแม้ว่าจะมีค่าคุณลักษณะต่างๆทางวิทยาศาสตร์ที่บ่งบอกถึงความสะอาดก็ตาม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานฟอกย้อมทั่ว ๆ ไปมักจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสูตรโครงสร้างใหญ่และซับซ้อน ส่วนมากจะเป็นสารพิษด้วย ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซับสีย้อมเป็นบางส่วนเท่านั้น ที่เหลือจะคงอยู่ในน้ำย้อมและถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งในที่สุด ซึ่งนอกจากจะทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็นแล้ว ยังจะไปทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆที่อาศัยอยู่ในน้ำได้ทั้งโดยตรงและโดยอ้อม โดยที่อนุภาคของสีย้อมบางชนิดทำให้สมดุลของระบบนิเวศน์เปลี่ยนไป ก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันได้

การกำจัดสีในน้ำทิ้งโดยทั่วไปแล้วทำได้หลายวิธี ได้แก่ การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีววิทยา การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) การดูดซับ (Adsorption) การกรอง การออกซิไดซ์ ฯลฯ โดยที่ในแต่ละวิธียังไม่มีข้อสรุปว่าวิธีใดที่จะมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีได้ดีอย่างแน่ชัด

ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะมีการศึกษาและวิจัยหารายละเอียดของการกำจัดสีในน้ำทิ้งในแต่ละวิธีเพิ่มเติม เพื่อที่จะได้นำมาใช้ในการบำบัดเพื่อลดมลพิษดังกล่าว ในวิธีการกำจัดสีที่กล่าวมาแล้ว มีวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ ได้แก่ การกำจัดสีโดยวิธีการดูดซับ (Adsorption) เป็นตัวดูดซับแต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาต้นทุนในการผลิตสูง แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะสามารถกำจัดสีให้หลุดออกจากผิวของถ่านกัมมันต์แล้วนำกลับมาใช้ซ้ำอีก ก็ยังไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายที่เสียไป ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยใช้เถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse fly ash) เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากเถ้าลอยชานอ้อยมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีความสามารถในการดูดซับสีได้ และเถ้าลอยที่เป็นดูดซับสีแล้วนำไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต มีข้อดีก็คือ เป็นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม โดยใช้เถ้าลอยชานอ้อย
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณตัวดูดซับ เวลาที่ใช้ในการทดลอง และพีเอช ในการกำจัดสีย้อม
3. ศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยชานอ้อยกับซีเมนต์ อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อวัสดุผสม อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น
4. ศึกษาการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ถ้ำลอยซานอ้อย เป็นถ้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ซานอ้อยเพื่อเป็นพลังงานงานความร้อน มาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยนำมาจากโรงงานผลิตน้ำตาลในเครือไทยรุ่งเรือง จังหวัดสระบุรี

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมสีย้อมรีแอกทีฟ Remazol Black B สีดำ มีสูตรโครงสร้างไดอะโซ สีย้อมรีแอกทีฟ Remazol Brilliant Red F3B สีแดง มีสูตรโครงสร้างโมโนอะโซ และสีย้อมรีแอกทีฟ Remazol Brilliant Blue R* สีน้ำเงิน มีสูตรโครงสร้างไดอะโซ

การวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

กระบวนการดูดซับ

1. ศึกษาถึงเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของถ้ำลอยซานอ้อยที่ใช้ดูดซับสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
2. ศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
3. ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ
4. ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

1. ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น
2. ศึกษาอัตราส่วนผสมของถ้ำลอยซานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และการแปรค่าระยะเวลาบ่มที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อวัสดุผสมที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น
3. ศึกษาการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลของการศึกษานี้จะเป็นส่วนที่ช่วยส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการนำถ้ำลอยซานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล ซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือมาใช้ประโยชน์แทนที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการ
2. ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการใช้ถ้ำลอยซานอ้อยในการดูดซับสีย้อมและสามารถนำข้อมูลไอโซเทอมซึ่งเป็นการทดสอบการดูดซับมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับอื่นได้
3. ทำให้ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของการทำคอนกรีตบล็อก และเพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนของการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตน้ำตาล

2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาล

แผนภูมิโรงงานผลิตน้ำตาลแสดงในรูปที่ 2.1 และกระบวนการผลิตน้ำตาลแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมชิ้นอ้อย

อ้อยจะถูกนำไปซึ่งน้ำหนัก แล้วเทลงบนสะพานลำเลียงอ้อยผ่านไปเข้ามีดตัด เพื่อตัดอ้อยออกเป็นท่อนเล็กๆ จากนั้นจะส่งต่อมายังเครื่องฉีกอ้อย (Shredders) ซึ่งจะทำหน้าที่ฉีกอ้อยออกเป็นฝอย โดยที่ไม่สกัดน้ำอ้อยออก

2. การหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย

อ้อยที่ละเอียดแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อย คือ ชุดลูกหีบที่มีน้ำหนักมากที่ติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน แถวหนึ่งอาจประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4-6 ชุด และเพื่อให้มีการสกัดน้ำอ้อยออกมามากที่สุด จึงมีการพรมน้ำอ้อยและน้ำลงไปในกากอ้อยที่ออกมาจากลูกหีบแต่ละชุด ซึ่งการพรมน้ำนี้จะช่วยให้สามารถสกัดน้ำตาลออกมาจากอ้อย ได้มากกว่าร้อยละ 95

สำหรับกากอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดชุดสุดท้ายจะเหลือน้ำตาลน้อยมากและมีความชื้นประมาณร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 52 จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำและสามารถนำไปแปรรูปเป็น เยื่อกระดาษ บอร์ดชนิดต่างๆได้

3. การทำให้น้ำอ้อยใส

น้ำอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดจะมีลักษณะสีเขียวย้ำถึงดำ ขุ่นข้น และมีสภาพเป็นกรดอย่างอ่อน ดังนั้นจึงต้องกำจัดความขุ่น สี และทำให้น้ำอ้อยให้เป็นกลางรวมทั้งกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกโดยผ่านกระบวนการทำให้ใส ซึ่งจะใช้ความร้อนและปูนขาวปรับสภาพน้ำอ้อยให้เป็นกลางและปูนขาวจะจับกับสารละลายต่างๆ ปลอ่ยให้ตกตะกอนแล้วนำส่วนที่ใสไปทำการต้มเคี่ยวเป็นผลึกน้ำตาลต่อไป ส่วนตะกอนนั้นจะนำไปผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ (Rotary drum vacuum filters) เพื่อแยกเอาส่วนน้ำอ้อยซึ่งยังมีความหวานกลับเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่ง ส่วนกากตะกอน (Filter cake) ที่แยกออกจะส่งไปใช้ทำปุ๋ยต่อไป

4. การต้มและการเคี้ยวให้น้ำตาลตกผลึก

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสจะมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งจะต้องทำการต้มระเหยน้ำออกไปประมาณ 2 ใน 3 ส่วน โดยหม้อต้ม (Evaporator) ที่มีการวางต่อกัน โดยปกติจะวางเรียงกัน 4 ใบ น้ำเชื่อม (Syrup) ในหม้อสุดท้าย มีความเข้มข้นประมาณ 60 บริกซ์ น้ำเชื่อม หลังจากผ่านตะแกรงกรองแล้ว จะถูกส่งไปยังหม้อเคี้ยว (Vacuum pan) เพื่อต้มเคี้ยวจนน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นเกินกว่าสภาวะอิ่มตัว น้ำตาลซูโครสจะแยกเป็นผลึกออกมาจากน้ำเชื่อม ในสภาพที่มีผลึกน้ำตาลซูโครสปนอยู่ในน้ำเชื่อมอิ่มตัว เรียกสารละลายผสมนี้ว่า แมสควิท (Massequite) เมื่อทำให้แมสควิทนี้เย็นตัวลงด้วยรางกวนแบบตั้งหรือแบบนอน ผลึกน้ำตาลซูโครสจะยิ่งเติบโตได้ดีและแข็ง พร้อมทั้งจะนำไปแยกผลึกต่อไป

5. การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง

แมสควิทที่เย็นตัวลงเป็นผลึกน้ำตาลซูโครสที่แข็งดีแล้ว จะถูกปล่อยลงในเครื่องปั่นแยก (Centrifuge) ภายในเป็นลักษณะคล้ายตะแกรงที่มีรูเล็กๆขนาด 400-600 ช่องต่อตารางนิ้ว หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1000-1800 รอบต่อนาที ซึ่งจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่า โมลาส (Molasses) ออกไป ส่วนเมล็ดน้ำตาลจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง เก็บเข้าโกดังเพื่อการจำหน่ายต่อไป

2.1.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์

ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อย จะมีวัสดุเศษเหลือที่สำคัญ 4 อย่าง คือ กากน้ำตาล กากอ้อย กากตะกอนและถ้ำลอยขานอ้อย ซึ่งสามารถนำวัสดุเศษเหลือที่ได้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. กากน้ำตาล (Molasses)

เป็นของเหลวสีดำที่เหนียวข้น ซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกน้ำตาลได้อีกด้วยเครื่องจักรของโรงงานน้ำตาลธรรมดา โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลประมาณร้อยละ 7.5 กากน้ำตาลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์และเหล้า
- ใช้ผลิตเป็นผงชูรส
- ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดินเนื่องจากมีส่วนประกอบของโพแทสเซียมอินทรีย์ วัตถุและธาตุอาหารรองอื่นๆ อีกมาก
- ใช้ผสมกับขานอ้อยสำหรับทำถ่านเพื่อเป็นเชื้อเพลิงใช้ในครัวเรือน

2. กากอ้อยหรือขานอ้อย (Bagasse)

เป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบอ้อย จะมีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ขานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ

- นำมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ในการผลิตไอน้ำมาใช้ในการต้มเคี้ยวน้ำตาล
- ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก
- ใช้ทำเยื่อกระดาษ
- นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

ในประเทศไทยจะใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานเกือบทั้งสิ้นโดยปริมาณขานอ้อยที่เผาเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณขานอ้อยทั้งหมด ที่เหลือก็ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การใช้ขานอ้อยมาทำเยื่อกระดาษและอัดเป็นแผ่นยังมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงยังเหลือขานอ้อยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อีกมาก

3. กากตะกอนอ้อย (Filter cake)

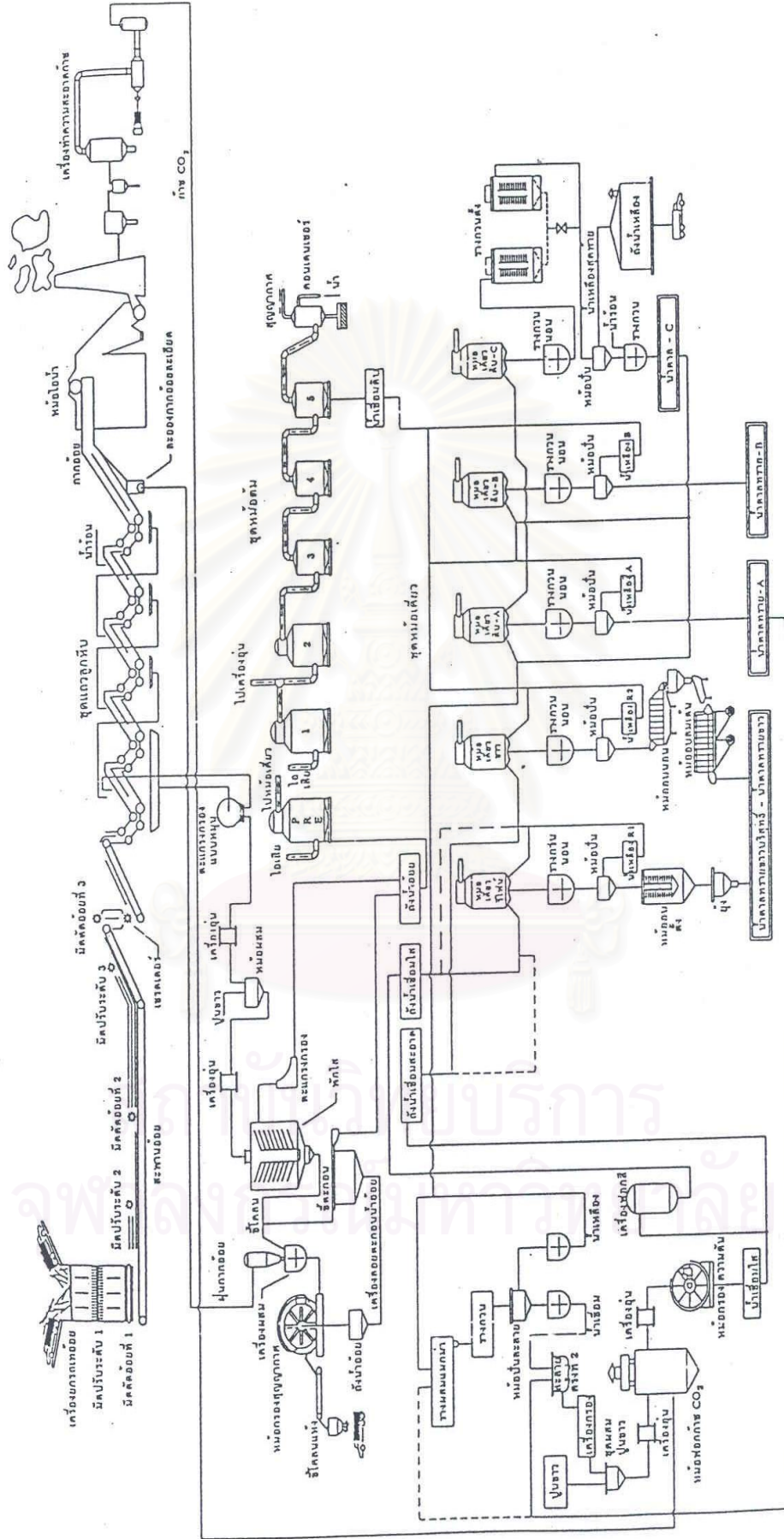
เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาล หลังจากทีกรองเอาน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลไปแล้ว มีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดินร่วนและมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแคลเซียมอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการนำกากตะกอนอ้อยมาใช้เป็นปุ๋ย

4. ถ้ำลอยขานอ้อย (Bagasse fly ash)

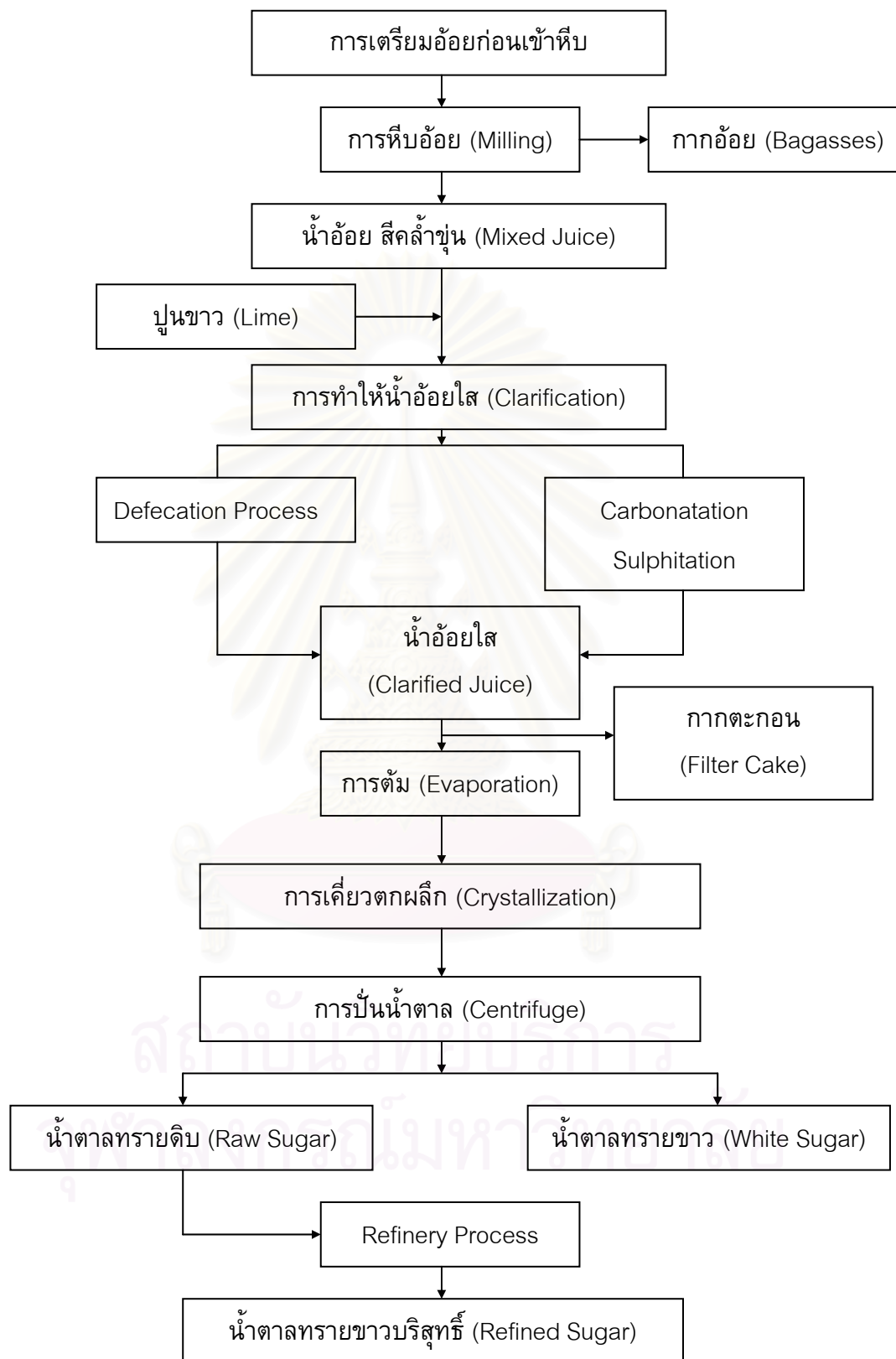
ถ้ำลอยนี้เกิดจากการนำขานอ้อยเผาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้ถ้ำลอยนี้เกิดขึ้นฟุ้งกระจาย จึงได้มีการฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับถ้ำลอยให้ถ้ำลอยตกลงมา ถ้ำลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนถ้ำที่เปียกมีสีดำ จากนั้นจึงรวบรวมและนำไปทิ้ง

2.1.3 การเผาขานอ้อยและการจัดการถ้ำลอยขานอ้อยที่เกิดขึ้น

ขานอ้อยที่เกิดจากการบีบสกัดเอาน้ำอ้อยออกมา จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาลประมาณร้อยละ 30 โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเผาจะเกิดถ้ำลอยขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 ถ้ำลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องสัมผัสแบบเปียก (Wet collectors) ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 0.1-20 ไมโครเมตร ก้อนถ้ำที่เปียกนี้จะถูกลำเลียงโดยสายพานส่งขึ้นรถบรรทุกเพื่อนำไปทิ้งในบ่อเก็บที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

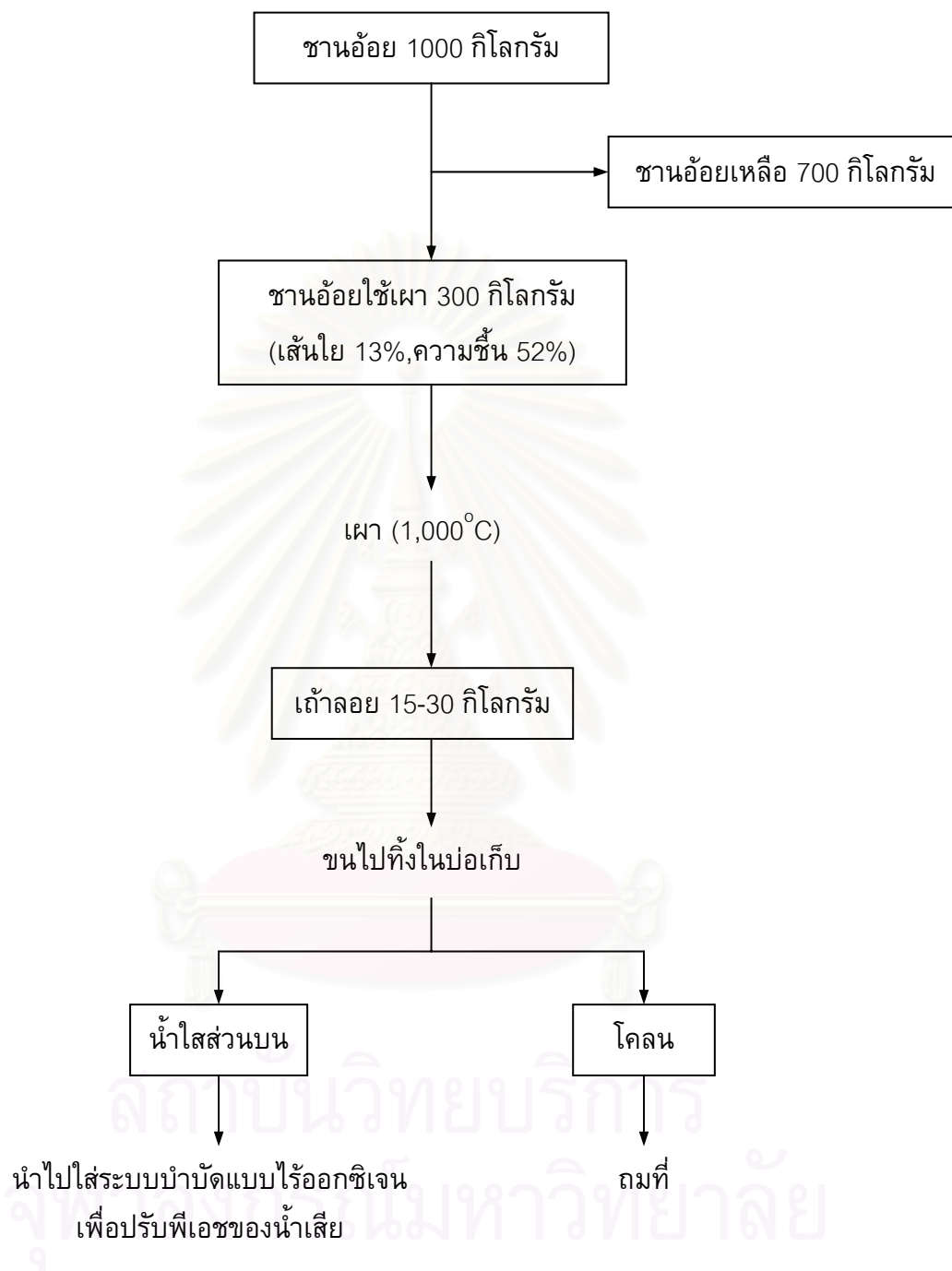


รูปที่ 2.1 รูปแผนภูมิการผลิตหน้าตาล
 ที่มา : สถาบันวิจัยพลังงาน, 2541



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำตาล

ที่มา : อัสวิทย์ ปัทมะเวณ, 2540



รูปที่ 2.3 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา (สถาบันวิจัยพลังงาน, 2541)

2.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย (Fly Ash) คือ เศษส่วนละเอียดที่สุดจากการเผาไหม้ มีขนาดเล็กมาก และอาจจะละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติของเถ้าลอยแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับสภาวะการเผาและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เถ้าลอยบางชนิดมีคุณสมบัติคล้ายกับเถ้าภูเขาไฟ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) จึงมีการสนับสนุนและพัฒนาการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต

หน่วยงานวิจัยหลายแห่งได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดสำหรับการนำเถ้าลอยไปใช้ เช่น ในสหรัฐอเมริกา มี American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Materials (ASTM) เป็นต้น นอกจากนี้สหรัฐอเมริกาแล้ว ที่อังกฤษ แคนาดา เยอรมัน เนเธอร์แลนด์ ญี่ปุ่นและอีกหลายประเทศในโลก ล้วนมีมาตรฐานของตนเองในการกำหนดชนิดและคุณสมบัติของเถ้าลอย

2.2.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอย ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 และ C ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยนั้นๆ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการนำเถ้าลอยไปใช้ เพราะยากต่อการควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ

2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยที่สำคัญต่อคุณภาพคอนกรีต คือ ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาเผาไหม้และลักษณะการเผาไหม้ โดยทั่วไปเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 0.001 จนถึง 0.15 มิลลิเมตร

2.2.3 ประเภทของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 96 แบ่งประเภทของวัสดุผสมในคอนกรีตเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่ ชั้นคุณภาพ N, F และ C โดยกำหนดองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C618 - 96

คุณสมบัติ		ประเภทของวัสดุผสม		
		N	F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	%น้อยที่สุด	70.0	70.0	50.0
SO ₃	%มากที่สุด	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น	%มากที่สุด	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	%มากที่สุด	10.0	6.0	6.0
Pozzolanic Index	%น้อยที่สุด	75.0	75.0	75.0

ชั้นคุณภาพ N คือ วัสดุดิบหรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่เป็นผง เช่น ดินบางชนิด หินชนวน หินหรือแก้วภูเขาไฟ เป็นต้น ซึ่งหินและดินต้องผ่านกระบวนการแปรสภาพให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งาน

ชั้นคุณภาพ F คือ แก่ล่อยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส ซึ่งแก่ล่อยชั้นคุณภาพ F มีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic)

ชั้นคุณภาพ C คือ แก่ล่อยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์หรือซบิทูมินัส แก่ล่อยชั้นคุณภาพ C นอกจากจะมีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic) แล้ว ยังมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious) อีกด้วยและอาจจะมี CaO อยู่มากกว่าร้อยละ 10

2.3 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัด จะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอีน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป

การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดกันแน่นอาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ

- ก) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)
- ข) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force)
- ค) แรงไอออน (Ionic force)
- ง) พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

กำลังแรงเหล่านี้มักจะไม่นำหน้าทีที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุดได้แก่ พันธะโควาเลนต์

2.3.1 การเกิดสีของสีย้อม

สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) คือ

กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group) : $-NO$ (หรือ $=N-OH$)

กลุ่มไนโตร (Nitro Group) : $-NO_2$ (หรือ $=NO.OH$)

กลุ่มอะโซ (Azo Group) : $-N=N-$

กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group) : $>C=C$

กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group) : $>C=O$

กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group) : $>C=NH$ และ $-CH=N-$

กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group) : $>C=S$ และ $>C-S-S-C<$

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง จะทำให้นุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้วยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม “ออกโซโครม (Auxochromes)” (ตารางที่ 2.2) เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครมจะแสดงคุณสมบัติของสีออกมาได้ แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า “โครมาเจน (Chromagen)” ทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 2.2 กลุ่มอะตอมออกโซโครม (Rangnekar และ Singh, 1980)

Name	Group	Name	Group
Amino	$-NH_2$	Chloro	$-Cl$
Methylamino	$-NHCH_3$	Methyl	$-CH_3$
Dimethyl Amino	$-N(CH_3)_2$	Methoxy	$-OCH_3$
Sulphonic Acid	$-SO_3H$	Cyano	$-CN$
Hydroxy	$-OH$	Acetyl	$-COCH_3$
Carboxylic Acid	$-COOH$	Amido	$-CONH_2$

2.3.2 การจำแนกสีย้อม

Rangnekar และ Singh (1980) สามารถจำแนกสีย้อมได้ 2 วิธี คือ จำแนกสีย้อมตามวิธีการใช้งาน และจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี จะความยุ่งยากสำหรับผู้ที่ไม่ได้ศึกษาทางเคมีโดยตรง และสีในกลุ่มเคมีเดียวกันยังมีวิธีการย้อมแตกต่างกัน เช่น สีในกลุ่มอะโซ บางตัวย้อมง่ายๆ โดยตรง แต่บางตัวจะติดเส้นใยได้เมื่อน้ำย้อมมีสภาพเป็นกรด และบางตัวจำเป็นต้องมีสารบางอย่างช่วยจึงติดเส้นใย จึงทำให้จดจำได้ยาก ดังนั้นการจำแนกสีย้อมตามวิธีในการย้อมจึงเป็นที่นิยมมากกว่าและเป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสี แต่อย่างไรก็ตามการจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี ก็ยังมีประโยชน์ในการศึกษาถึงกลไกการบำบัดน้ำเสียสีของโรงงานฟอกย้อม ดังนั้นหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำแนกสีย้อมทั้งแบบโครงสร้างทางเคมีและแบบการนำไปใช้งาน ดังนี้

1. การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี จะมีความยุ่งยากสีเท่าที่ผลิออกมาจำหน่ายในขณะนี้ สีในกลุ่มเคมีเดียวกันมีวิธีย้อมแตกต่างกัน เช่น สีในกลุ่มอะโซบางตัวย้อมง่ายๆ โดยตรง บางตัวจะติดได้เมื่อน้ำย้อมมีสภาพเป็นกรด แต่อย่างไรก็ตามการจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมีก็ยังมีประโยชน์ในการที่จะกล่าวถึงกลไกการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วย จึงจะนำเสนอการจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างเคมี ดังตารางที่ 2.3

2. การจำแนกสีย้อมตามวิธีการใช้งาน

สามารถจำแนกได้ 9 ประเภทดังนี้ (Rangnekar และ Singh, 1980)

1. สีแอซิด (Acid dyes)

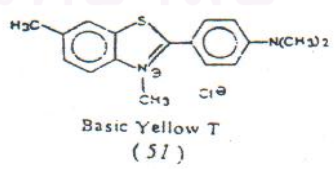
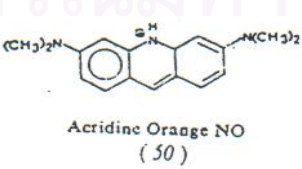
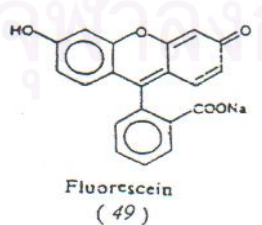
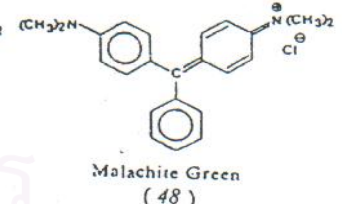
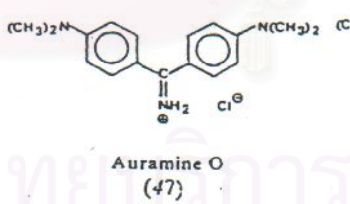
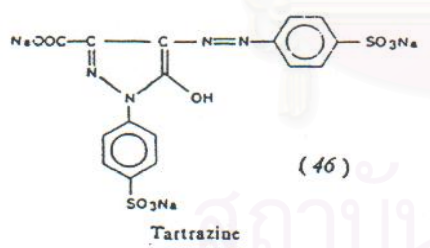
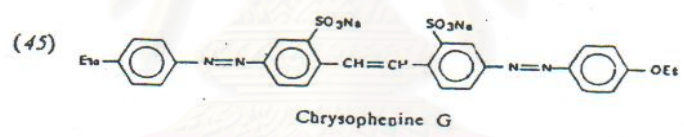
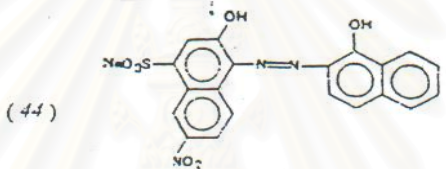
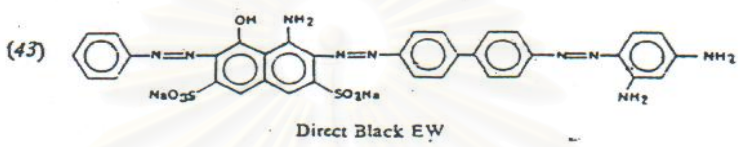
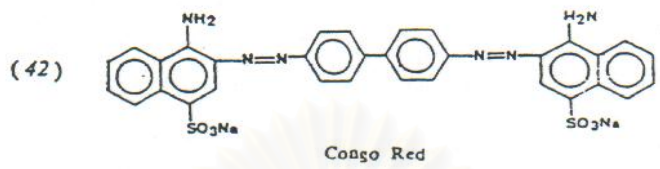
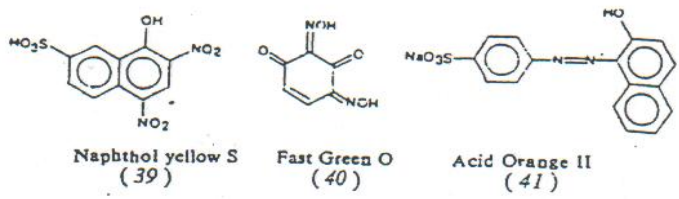
เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบสามารถละลายน้ำได้ดี เหมาะกับเส้นใยไนลอนและเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม เป็นต้น ไม่เหมาะที่จะนำไปย้อมเส้นใยประเภทเซลลูโลส ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซ ไตรฟีนีลมีเทนและแอนทราควิโนน สีย้อมแอซิดย้อมติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิกในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง

2. สีมอร์แดนท์ (Mordant dyes)

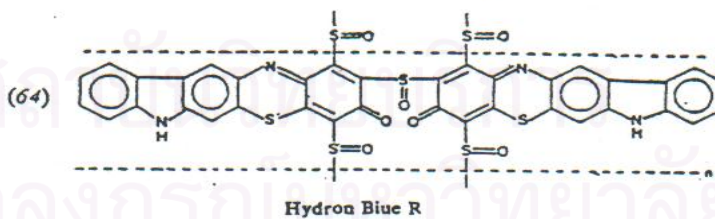
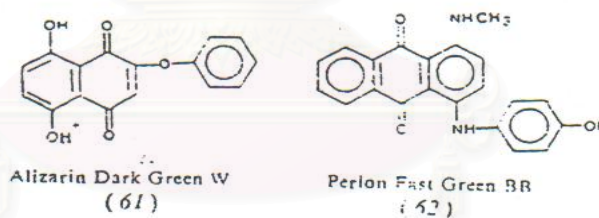
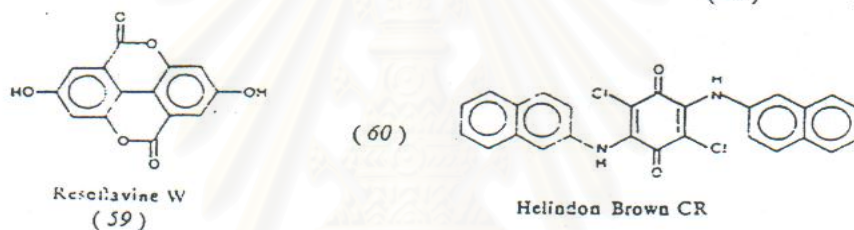
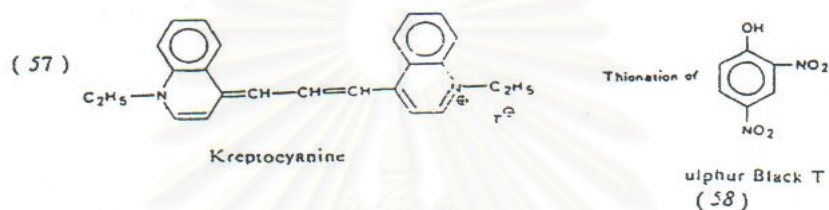
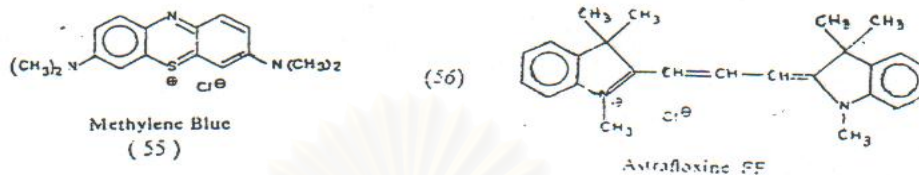
เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ เหมาะกับเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมนี้ส่วนใหญ่เป็นตัวย้อมในกลุ่มแอซิดที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม อลูมิเนียมและเหล็ก กระบวนการย้อมต้องมีการเติมเกลือของโลหะ เช่น โซเดียมไดโครเมตทำให้สีติดเส้นใยด้วยพันธะเชิงซ้อนและพันธะโควาเลนต์

ตารางที่ 2.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (Rangnekar และ Singh, 1980)

Class	Subclass	Example	Structure
Nitro	-	Naphthol Yellow S	(39)
Nitroso	-	Fast Green O	(40)
Azo	Monoazo	Acid Orange II	(41)
	Diazo	Congo Red	(42)
	Triazo	Direct Black EW	(43)
	Polyazo	-	
	Mordant azo	Erichrome Black T	(44)
	Stilbene azo	Chrysophenine G	(45)
	Pyrazolone azo	Tartrazine	(46)
Diphenylmethane	-	Auramine O	(47)
Triphenylmethane	-	Malachite Green	(48)
Xanthene	-	Fluorescein	(49)
Acridine	-	Acridine Orange NO	(50)
Thiazole	-	Basic Yellow T	(51)
Indamine&Indophenol	-	Toluylene Blue	(52)
Azine	-	Safranine T	(53)
Oxazine	-	Capri Blue GN	(54)
Thiazine	-	Methylene Blue	(55)
Cyanine	Methine	Astrafloxine FF	(56)
	Quinoline	Kryptocyanine	(57)
Sulphur	-	Sulphur Black T	(58)
Lactone	-	Resoflavine W	(59)
Aminoketone	-	Helindon Brown CR	(60)
Hydroxyketone	-	Alizarin Dark Green W	(61)
Anthraquinonoid	-	Perlon Fast Green 3B	(62)
Indigoid	-	Indigo	
Sulphurized Vat Dyes	-	Hydron Blue R	(64)
Phthalocyanine	-	Monastral Fast Blue BS	(65)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม (Rangnekar และ Singh, 1980)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม (ต่อ) (Rangnekar และ Singh, 1980)

3. สีเบสิก (Basic dyes)

เป็นสีย้อมที่ให้ประจุบวก สามารถละลายน้ำได้ดี เหมาะกับเส้นใยอะคริลิก ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกไดฟีนิลมีเทน ไตรฟีนิลมีเทน ออกซาซีน ไทอาซีนและอะโซ ซึ่งสามารถย้อมติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิก

4. สีไดเรกต์ (Direct dyes)

เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส สีกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มอะโซ กระบวนการย้อมสีไดเรกต์ ต้องมีการเติมสารอิเล็กโตรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต เพื่อช่วยให้สีซึมเข้าภายในเส้นใยได้มากขึ้น ซึ่งสีย้อมนี้จะติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิก

5. สีดีสเพอร์ส (Disperse dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้หรือละลายได้เล็กน้อย ดังนั้นตัวสีจะอยู่ในรูปคอลลอยด์ ต้องย้อมในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง เพื่อที่จะทำให้สีย้อมกระจายตัวเข้าไปใกล้เส้นใยและสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เหมาะสมกับเส้นใยเซลลูโลส อะซิเตต ไนลอนและโพลีเอสเตอร์ ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซ และแอนทราควิโนน

6. สีอะโซอิก (Azoic dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส เป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซ

7. สีแวต (Vat dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ จึงต้องมีการเติมสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมจึงจะสามารถละลายน้ำได้ สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีการย้อมทำได้โดยนำผ้าไปแช่ในน้ำย้อม และเมื่อสีย้อมเข้าไปในเส้นใยแล้ว เมื่อผ้าสัมผัสกับอากาศ สีย้อมถูกออกซิไดซ์ จะไม่ละลายน้ำเหมือนเดิม ทำให้สีติดเส้นใยได้ เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกแอนทราควิโนน

8. สีซัลเฟอร์ (Sulphur dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารรีดิวซ์ และเมื่อสีย้อมเข้าไปในเส้นใย เมื่อเส้นใยสัมผัสกับอากาศ สีย้อมจะถูกออกซิไดซ์ เปลี่ยนเป็นไม่ละลายน้ำดังเดิม ทำให้สีติดเส้นใยได้ เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส

9. สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes)

เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี เป็นสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซีอออนในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งทำให้สียึดติดเส้นใยได้ดี

2.4 สีย้อมอะโซ (Azo dyes)

สีย้อมอะโซ (-N=N-) ประกอบด้วยกลุ่มอะโซหนึ่งกลุ่ม หรือมากกว่านั้นจะทำหน้าที่เป็นโครโมฟอร์ และมีออกโซโครมได้หลายกลุ่ม สารตัวกลางในปฏิกิริยา (Intermediate) มี 2 ชนิด คือ ไดอะโซ และสารร่วมทำปฏิกิริยา (Coupling) ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาในสภาวะเป็นกรดหรือด่าง

ไดอะโซนิยมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะริลลามีนหรือเฮทเทอโรไซคลิกอะมีนกับสารร่วมปฏิกิริยา

ประเภทของสีย้อมอะโซ ได้แก่ (Rangnekar และ Singh, 1980)

Monoazo dyes ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซ เพียงหนึ่งกลุ่ม และแบ่งออกได้อีกเป็น 8 ชนิด คือ

Monoazo Direct dyes

Monoazo Acid dyes

Monoazo Food colours

Monoazo Mordant dyes

Monoazo Solvent dyes

Monoazo Disperse dyes

Monoazo Cationic dyes

Monoazo Reactive dyes

Diazo หรือ Biazos dyes มีโครโมฟอร์อะโซ 2 กลุ่ม

Triazo dyes มีโครโมฟอร์อะโซ 2 กลุ่ม

Polyazo dyes ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซตั้งแต่ 4 กลุ่มขึ้นไป

Mordant azo dyes คือ กลุ่มอะโซที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทำหน้าที่เป็นมอร์แดนท์หรือตัวช่วยเพิ่มการยึดเกาะ

Stilbene azo dyes ประกอบด้วยอะโซหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ซึ่งให้สีเหลืองหรือส้มที่สามารถย้อมได้เร็วและมีการยึดเกาะที่ดีสำหรับเส้นใยฝ้าย

Pyrazolone azo dyes เป็นสีย้อมอะโซที่มีหมู่ไพราซอลในโครงสร้าง

2.5 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

สีย้อมรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด โดยจะมีคุณสมบัติเป็นไอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีความเป็นด่าง ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH⁻) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ เพื่อสร้างสารประกอบครอสลิงก์กับเซลลูโลสซึ่งได้เป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ ทำให้เกิดเป็นสีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

โครงสร้างเคมีที่เป็นองค์ประกอบของสีรีแอกทีฟจะมีได้เกือบทุกประเภท ยกตัวอย่างเช่น กลุ่มอะโซ แอนทราควิโนนอยด์ ฟาทาโลไซยานีน เป็นต้น

2.5.1 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

สีย้อมรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี สีย้อมชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด โดยจะมีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่อยอยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีย้อมจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลไอออนในเซลลูโลส และเชื่อมโยงกับพันธะเคมีโควาเลนต์กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ทำให้เป็นสีที่มีความคงทนต่อการซักฟอกและการขัดถู

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟ ประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ

S - D - T - X

S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และเป็นกลุ่มที่อยู่ติดกับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟเนต ($-SO_2Na$) ซึ่งอาจมีมีเพียงกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม

D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส

T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่าง Reactive system กับ Chromophore ยกตัวอย่างเช่น หมู่ $-NH-$, $-NHCO-$, $-SO_2-$, $-NHSO_2-$ และ $-NCH_3$ เป็นต้น

X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของเส้นใยโดยได้แสดง Reactive system ชนิดต่างๆ ไว้ในตารางที่ 2.4

ส่วนประกอบ 2 ส่วนที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สีย้อมแต่ละชนิดแตกต่างกัน คือ

- กลุ่มโครโมฟอร์ (D)
- กลุ่มรีแอกทีฟ (X)

ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive group) อาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์โดยตรง โดยที่ไม่มี Bridging group ก็ได้ และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสาร Heterocyclic ring

สีย้อมรีแอกทีฟส่วนใหญ่ประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ชนิดอะโซซึ่งได้แก่ Unmetallised azo และ Metal-complex azo เป็นส่วนมาก โดยสูงถึงร้อยละ 81 เพราะฉะนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมประเภทที่มีรีแอกทีฟ ถ้าสามารถทำลายพันธะอะโซในกลุ่มโครโมฟอร์ได้ ก็จะลดสีในน้ำเสียลงได้

ตารางที่ 2.4 เปอร์เซนต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ใน สีรีแอกทีฟ แบ่งตามโทนสีต่างๆ (Shore, 1990)

Chemical Class	% การกระจายของโทนสี								ร้อยละของสีรีแอกทีฟทั้งหมด
	เหลือง	ส้ม	แดง	ม่วง	ฟ้า	เขียว	น้ำตาล	ดำ	
Unmetallised Azo	97	90	90	63	20	16	57	42	66
Metal-Complex Azo	2	10	9	32	17	5	43	55	15
Anthraquinone				5	34	37		3	10
Phthalocyanine					27	42			8
Miscellaneous	1		1		2				1
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100

2.5.2 ชนิดของกลุ่มรีแอกทีฟ

1. Monofunctional Systems ได้แก่สีย้อมที่ประกอบด้วยกลุ่มรีแอกทีฟที่เข้าทำปฏิกิริยาได้เพียง 1 หมู่
2. Bifunctional Systems ได้แก่สีย้อมที่มีกลุ่มรีแอกทีฟ 2 หมู่ ซึ่งให้ผลในด้านการยึดเกาะกับเส้นใยที่สูงกว่าพวกกลุ่มรีแอกทีฟแบบโมโนฟังก์ชัน

ตารางที่ 2.5 กลุ่มรีแอกทีฟที่สำคัญ (Shore, 1995)

กลุ่มรีแอกทีฟ	
Monofunctional	Bifunctional
Dichlorotriazine	Bis (aminochlorotriazine)
Aminochlorotriazine	Bis (aminonicotinotriazine)
Aminofluorotriazine	Aminochlorotriazine-Sulphatoethylsulphone
Trichloropyrimidine	Aminofluorotriazine-Sulphatoethylsulphone
Chlorodifluoropyrimidine	
Dichloroquinoxaline	
Sulphatoethylsulphone	
Sulphatoethylsulphonamide	

Monofunctional Systems

1. Dichloro-s-triazine dyes

โมเลกุลของกลุ่มรีแอกทีฟประเภทไดคลอโรไตรอะซีนจะมีขั้วที่พันธะของ C=N และ C-Cl เนื่องจากอะตอมของ N และ Cl มีค่าอิเล็กโตรเนกาวิตีหรือความสามารถที่อะตอมจะดึงดูดอิเล็กตรอนเข้ามาหาอะตอมนั้นสูงกว่าอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสีย้อม ฉะนั้นจึงคาดได้ว่า จะเกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่ (Nucleophilic Substitution) ยกตัวอย่างเช่นสี C.I.Reactive Red

2. Aminochloro-s-triazine dyes

กลุ่มรีแอกทีฟอะมิโนคลอโรไตรอะซีนได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมไดคลอโรไตรอะซีนกับอะมีนที่อุณหภูมิ 25-45 องศาเซลเซียส เกิดเป็นสีย้อมรีแอกทีฟที่สามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าพวกสีย้อมไดคลอโรไตรอะซีนมาก ยกตัวอย่างเช่น สีย้อม C.I.Reactive Red 3 ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกลุ่มรีแอกทีฟพวก 2-amino-4-chloro

3. Aminofluoro-s-triazine dyes

การทำงานของกลุ่มรีแอกทีฟอะมิโนฟลูออโรไตรอะซีนคือ ขณะย้อมอะตอมฟลูออรีนจะแตกตัวออกจากโมเลกุลของสีย้อม และการที่ฟลูออรีนมีค่าอิเล็กโตรเนกาวิตีสูงกว่าคลอรีนทำให้สีย้อมมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอกทีฟเป็นอะมิโนคลอโร

4. Trichloropyrimidine dyes

สีย้อมไตรคลอโรไพริมิดีนได้จากปฏิกิริยาการแทนที่ (Nucleophilic Substitution) ของอะตอมคลอรีนตำแหน่งที่ 4 เพื่อสร้างพันธะระหว่าง กับโครโมฟอร์

5. Chlorodifluoropyrimidine dyes

เป็นสีย้อมจำพวกไพริมิดีนที่มีธาตุหมู่ 7 (Halopyrimidine) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายกว่าด้วยการปรับปรุงโครงสร้างโดยการใช้ฟลูออรีนแทนคลอรีนเพื่อเป็นกลุ่มรีแอกทีฟส่วนมากที่ใช้กันมากได้แก่ กลุ่มรีแอกทีฟ 5-chloro-2,6- difluoropyrimidine

6. Dichloroquinoxaline dyes

สีย้อมที่มีกลุ่มรีแอกทีฟประเภทนี้ จะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าสีย้อมไดคลอโรไพริมิดีน โดยเปรียบได้กับกลุ่มรีแอกทีฟไดคลอโรไตรอะซีน และไดฟลูออโรไพริมิดีน

7. Sulphatoethyl-sulphone และ -sulphonamide dyes

สีย้อมที่มีหมู่รีแอกทีฟประเภทนี้ ส่วนใหญ่จะมีการยึดเกาะที่ต่ำกว่าสีย้อมพวกฮาโลเฮทเทอร์โอสไตรคติกมาก โดยจะมีหมู่ซัลฟาโตที่อยู่ท้ายสุดของโมเลกุลที่จะทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ

8. Phosphonic acid dyes

โครงสร้างของสีย้อมชนิดกรดฟอสฟอนิกส่วนใหญ่เป็นสารตัวกลางระเหยง่าย อันได้แก่ 3-aminophenylphosphonic acid ซึ่งเกาะกับหมู่โครโมเจนโมโนอะโซ กลุ่มรีแอกทีฟประเภทนี้ จะมีความเสถียรในการสร้างพันธะกับเส้นใยมากเป็นพิเศษ โดยมีค่าสูงกว่าสีย้อมคลอโรไตรอะซีนที่ย้อมภายใต้สภาวะกรด และสีย้อมไวไนลซัลโฟนที่ย้อมภายใต้สภาวะต่าง

Bifunctional Systems

1. Bis (aminochlorotriazine) dyes

ประกอบด้วยกลุ่มรีแอกทีฟที่เหมือนกัน 2 หมู่ซึ่งทำให้มีการดูดติดและยึดเกาะกับเส้นใยสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอกทีฟอะมิโนคลอโรไตรอะซีนเพียงหมู่เดียว รวมทั้งมีปริมาณสีย้อมที่หลุดไปกับน้ำที่น้อยกว่าด้วย สำหรับขนาดของโมเลกุลจะมีค่าเป็น 2 เท่าของสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอกทีฟเดียว นอกจากนั้นสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอกทีฟ 2 กลุ่ม จะเกิดการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำต่ำกว่าที่มีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียว

2. Bis (aminonicotinotriazine) dyes

ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมอะมิโนคลอโรไตรอะซีนกับเทอเทียรีอะมีน เกิดเป็นอนุพันธ์ของควอทเทอนารีแอมโมเนีย โดยอะตอมไนโตรเจนตัวที่ 4 ที่เพิ่มขึ้นนี้จะเป็นตัวนำพาประจุบวก จึงทำให้พันธะ C-N ที่เชื่อมอยู่กับวงไตรอะซีนมีสภาพขั้วมากขึ้น และทำให้สีย้อมประเภทนี้เกิดปฏิกิริยาในสีย้อมที่มีโครงสร้างแบบเดิม

3. Aminochlorotriazine-sulphatoethylsulphone dyes

ประกอบด้วยกลุ่มสีที่ทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมไตรอะซีนกับอะริลอะมีนที่มีหมู่ 2-sulphatoethylsulphone ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยได้โดยหมู่โมโนคลอโรไตรอะซีนหรือหมู่ไวไนลซัลโฟน ซึ่งหมู่ไวไนลซัลโฟนนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าหมู่โมโนคลอโรไตรอะซีน

4. Aminofluorotriazine-sulphatoethylsulphone dyes

ประกอบด้วยหมู่อะลิฟาติกไวไนลซัลโฟน และ (Bridging group) คือ โมโนคลอโรไตรอะซีนหรืออะริลไวไนลซัลโฟน วัตถุประสงค์การใช้งานของสีย้อมประเภทนี้ได้แก่ ค่าสัมพรรคภาพที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำหรือปานกลาง แต่มีการยึดเกาะที่สูง สีย้อมชนิดนี้จึงเหมาะสมในการที่จะรักษาสภาพแวดล้อมมากที่สุด

2.6 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความเข้มข้นที่ผิว เมื่อมีการสัมผัสของสารที่อยู่ต่างสภาวะภายในโมเลกุลระหว่าง 2 สถานะ เช่น สารละลายของเหลวสัมผัสกับของแข็ง หรือก๊าซสัมผัสกับของแข็ง ถ้า 2 สถานะนั้นคือ ของแข็งกับของเหลว การดึงดูด

โมเลกุลที่ผิวจะไม่สมดุลกัน ของแข็งที่สามารถดูดซับอะตอม หรือโมเลกุลของของเหลวได้ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) และ โมเลกุลของของเหลวที่ไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของของเหลวเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate)

2.6.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด (วันเพ็ญ ก้องกิตติไพศาล, 2528) คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) จะเกี่ยวข้องกับแรงภายในโมเลกุล โดยที่แรงที่ทำให้เกิดการยึดเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับจะเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อนซึ่งจะเป็นแรงชนิดเดียวกันกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะยังคงมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) จะเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ พื้นผิวของโมเลกุลที่เป็นสารดูดซับ และจะมีแรงที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีบางครั้งจะต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย เรียกว่า Activated adsorption ซึ่งทำให้เกิดการดูดซับที่แรงกว่าการดูดซับทางฟิสิกส์

3. การดูดซับแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับที่พื้นผิวโดย Electrical attraction พวกตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) สามารถจัดอยู่ในกลุ่มนี้ ทำให้อิออนของสารติดอยู่ที่พื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้ามอิออนที่มีประจุสูง เช่น ประจุบวก 3 (Trivalent ions) จะดูดติดได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำ ๆ และอิออนที่มีขนาดเล็กจะดูดติดได้ดี

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลกับการดูดซับ (Factors Affecting Adsorptions)

ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ (Natural of the Adsorbent)

1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface area and pore structure) พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่ง ที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ในการดูดซับนั้นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้นกระนั้นก็ดี พื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้เป็นอย่างดี โครงสร้างของรูพรุนจะมีส่วนช่วยพื้นที่ผิวให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มยิ่งขึ้น เพราะถ้าขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถที่จะเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่จะถูกดูดซับใหญ่กว่ารูพรุน ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

2. ขนาดของวัตถุ (Particle size) โมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เพราะดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ว่า ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ

3. เคมีที่ผิวหน้า (Chemistry of surface) หมู่ฟังก์ชันนัล (Functional group) เฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับจะมีคุณสมบัติที่มีผลกับกระบวนการดูดซับ เช่นถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์ และหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง แต่ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ (Nature of the Adsorbate)

1. ความสามารถในการละลาย เป็นคุณสมบัติที่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ ซึ่งความสามารถในการละลายที่สูงเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

2. น้ำหนักของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล จะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนของคาร์บอนอะตอมมากขึ้น การดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

3. ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเพราะการเพิ่มโพลาริตี (Polarity) จะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

ผลของ $[H_3^+O]$ หรือ pH (Effect of $[H_3^+O]$)

$[H_3^+O]$ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโมเลกุลที่เป็นสารดูดซับกับโมเลกุลที่เป็นตัวถูกละลาย เช่นผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นสารที่เป็นตัวดูดซับจะสามารถดูดซับได้ทั้งกรด $[H_3^+O]$ และเบส $[OH^-]$ เป็นผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีสภาพเป็นกลางเสมอ และถ้าค่า pH ลดลง ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเพราะ $[H_3^+O]$ เพิ่มมากขึ้น

ผลของอุณหภูมิ (Effect of Temperature)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่คายความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

2.6.3 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยที่สารที่ถูกละลายจะถูกดูดซับ และมีการคายการดูดซับ (Desorb) ไปพร้อมๆกัน ซึ่งอัตราการดูดซับและการคายการดูดซับ (Desorption) ที่เท่ากัน จะทำให้เกิดสภาวะสมดุลเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ที่จุดสมดุลความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับจะเท่ากับความเข้มข้นของตัวดูดซับ และปริมาณของการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จะถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าทำการดูดซับโดยการให้อุณหภูมิคงที่เราใช้ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น (Noll และคณะ, 1992)

ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ไปพล็อตกราฟในรูปแบบของลอการิทึม กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ เส้นที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมดเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm)

รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) มีหลายแบบ ซึ่งแล้วแต่ว่าจะนำเอารูปแบบไหนมาอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับสมดุลการดูดซับ แต่ที่นำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับคือ Langmuir adsorption isotherm และ Freundlich adsorption isotherm

1. Langmuir's adsorption isotherm

สมมุติฐานของทฤษฎีนี้เป็นแนวความคิดของแบบจำลองของ Monolayer ดังนี้

- โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ที่จำกัดของผิวตัวดูดซับ
- แต่ละพื้นที่ของตัวดูดซับจะเหมาะกับโมเลกุลที่เป็น Monolayer
- พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะถูกดูดซับ
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆพื้นที่ของการดูดซับ

นอกจากนี้โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ จากสมมุติฐานต่างๆ ทำให้เขียนสมการได้ดังนี้ (Langmuir equation)

$$x/m = (Q_{\max} b C_e) / (1 + b C_e)$$

$$\text{และ } m/x = 1/q_e = 1/Q_{\max} + 1/b Q_{\max} C_e$$

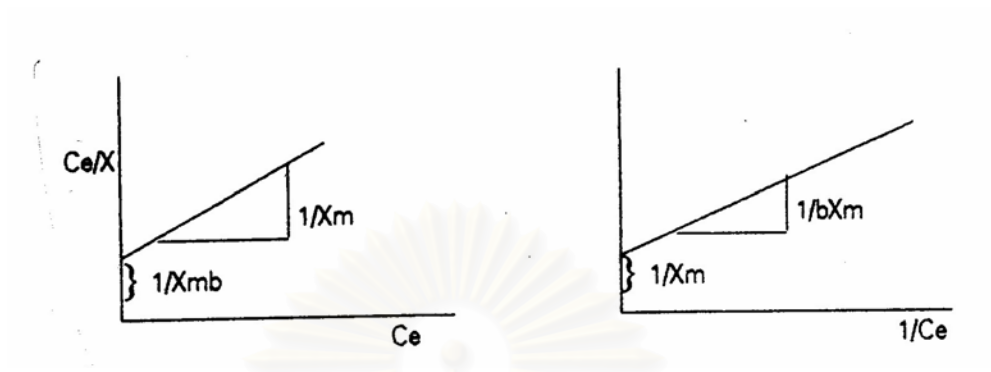
เมื่อ X = ปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับ (x) ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (m)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล

Q_{\max} = ปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (m) ซึ่งเรียกว่า Monolayer capacity

b = ค่าคงที่ของความร่อนของการดูดซับ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $1/C_e$ กับ $1/q_e$ จะได้กราฟเส้นตรง จะทำให้สามารถหาค่าความชันของกราฟได้ $1/bX_m$



รูปที่ 2.5 Langmuir adsorption isotherm in linear pattern (Noll และคณะ, 1992)

2. Freundlich adsorption isotherm

สมการการดูดซับของ Freundlich ส่วนใหญ่ จะใช้กันมากในรายละเอียดทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับในระบบสารละลาย (Aqous) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$X/m = KC_e^{1/n}$$

$$\text{และ } \log X/m = \log K + (1/n) \log (C_e)$$

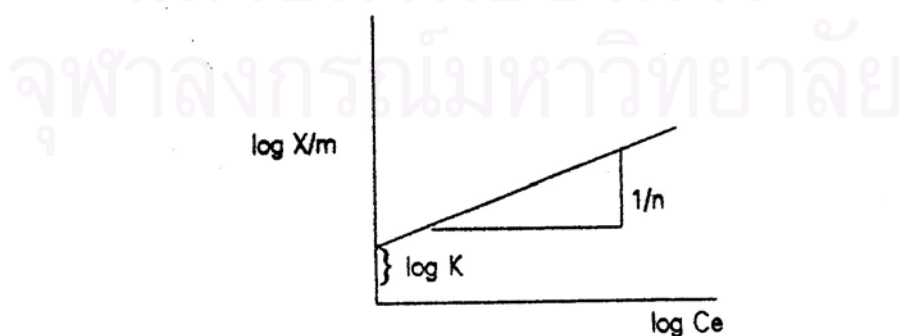
เมื่อ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่จะถูกดูดซับ

m = น้ำหนักของตัวดูดซับ

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล

$K, 1/n$ = คุณสมบัติที่คงที่ของระบบ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $1/n$ และหาค่า K ได้ ถ้าค่า K อยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 10 การดูดซับจะเกิดได้ดี แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Constant value (K and n) of Freundlich equation (Noll และคณะ, 1992)

2.7 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อการใช้งานด้านโครงสร้างเป็นวัสดุที่สามารถสร้างให้มีรูปร่างและลักษณะตามต้องการและเหมาะกับงาน ซึ่งเป็นข้อที่ได้เปรียบอีกประการหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น ไม้ อิฐ หรือ เหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2.6 คอนกรีตเกิดจากการผสมซีเมนต์ น้ำ ซึ่งทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นวัสดุประสาน รวมเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ กับ ทราฮินหรือกรวด ที่เป็นวัสดุผสมหรือมวลรวม ส่วนผสมทั้งหมดจะแข็งตัวภายใน 24 ชั่วโมง และจะสามารถทนแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆตามอายุ ตราบที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างเพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

คอนกรีตโดยทั่วไปจะมีปริมาตรของซีเมนต์เพสต์อยู่ประมาณร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 40 ซึ่งแยกออกเป็นปริมาตรของซีเมนต์ประมาณร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 15 ในน้ำประมาณร้อยละ 14 ถึงร้อยละ 21 และฟองอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่างประมาณร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 3 ที่เหลือเป็นปริมาตรของวัสดุผสม (วินิต ซอวีเชียร, 2539) สมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของซีเมนต์ ซีเมนต์ อัตราร่วนน้ำต่อซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำและซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เสริมในช่องว่างระหว่างวัสดุผสม หล่อลื่นคอนกรีตสดในขณะทำงาน ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว และป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ในขณะที่วัสดุผสมจะมีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานอยู่ในซีเมนต์เพสต์เนื่องจากมีราคาถูก และช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (ชัชวาลย์ เสรษฐบุต, 2539)

ตารางที่ 2.6 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต (ชัชวาลย์ เสรษฐบุต, 2539)

ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามความต้องการได้ 2. ราคาถูก 3. มีความทนทานสูง 4. ทนไฟได้ดี และไม่ไหม้ไฟ 5. สามารถเทหล่อได้ในสภาพที่ก่อสร้าง 6. สามารถทำให้ผิวสวยงามได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความสามารถรับแรงดึงต่ำ 2. มีความยึดตัวต่ำ 3. มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร 4. อัตรากำลังต่อน้ำหนักต่ำ

2.7.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสร้างงานก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหินกรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน (วินิต ซอวีเชียร, 2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูน

เม็ด (Clinker) จนละเอียด ซึ่งปูนเม็ดนี้เป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบที่ผสมรวมกันด้วย อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400–1,600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งก็คือปูนเม็ด

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งได้ 2 ประเภท คือ ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว กับประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกา และ อลูมินาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ดินดาน ดินเหนียว หินชนวน

องค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้หลังจากการเผาวัตถุดิบจะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล เศรษฐบุตร์, 2539)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
Na ₂ O+K ₂ O	0.5 – 1.3
TiO ₂	0.1 – 0.4
P ₂ O ₅	0.1 – 0.2
SO ₃	1 - 3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล เศรษฐบุต, 2539)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	33-55
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	15-35
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	7-15
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5-10

อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นมอร์ตาร์หรือคอนกรีต คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
(ชัชวาล เศรษฐบุต, 2539)

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโดย X-Ray Diffraction Spectrometry จะสนใจที่จะศึกษาสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งสารเชื่อมประสาน คัลเซียม ซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม

2.7.2 วัสดุผสม (Aggregates)

วัสดุผสม หรือบางครั้งเรียกว่า มวลรวม เป็นวัสดุเฉื่อยที่สำคัญสำหรับการผลิตคอนกรีต โดยจะแทรกประสานกระจายตัวอยู่ทั่วซีเมนต์เฟส มีปริมาตรเป็นร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของส่วนผสมทั้งหมด วัสดุผสมโดยทั่วไปได้แก่ หินย่อย กรวด และทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้คอนกรีตมีความคงทน ความแข็งแรง (Durability) เพราะวัสดุผสมโดยทั่วไปในธรรมชาติสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีต ปริมาตรของคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (Volume stability) และที่สำคัญยังช่วยให้คอนกรีตมีราคาที่ถูกลง กำลังและสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมหลายอย่างมีผลต่อสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพเหลวและแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกวัสดุผสมที่เหมาะสมไม่เพียงเป็นการประหยัด ยังเท่ากับเป็นการช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย วัสดุผสมที่ใช้ในงานคอนกรีตสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามขนาด คือ

1. **วัสดุผสมละเอียด (Fine aggregates)** เป็นวัสดุส่วนใหญ่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) ได้ แต่ต้องไม่เล็กจนเป็นฝุ่น (0.07 มิลลิเมตร) หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 วัสดุผสมละเอียดที่นิยมใช้คือ ทรายธรรมชาติ และควรเป็นทรายน้ำจืดที่สะอาด มีเหลี่ยมคม และขนาดของเม็ดสม่ำเสมอ

2. **วัสดุผสมหยาบ (Coarse aggregates)** คือ วัสดุส่วนใหญ่ที่ค้างบนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 อาจจะมีบางส่วนที่ละเอียดปนอยู่บ้าง แต่ต้องไม่เกินปริมาณที่มาตรฐานกำหนด วัสดุผสมหยาบได้แก่ หินย่อย หรือ กรวด หินที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตต้องมีเหลี่ยมมุม แข็ง ผิวขรุขระ ยึดหดตัวต่ำ และทนทานต่อการสึกหรอได้ดี และมีสัดส่วนละเอียดที่เหมาะสม ขนาดของหินโดยทั่วไปที่ใช้กันจะอยู่ในช่วง 4.76-76.20 มิลลิเมตร (3/16-3 นิ้ว) โดยสามารถแบ่งออกเป็นหินย่อยเบอร์ 1 ซึ่งมีขนาด 4.76-19.05 มิลลิเมตร (3/16-3/4 นิ้ว) หินย่อยเบอร์ 2 มีขนาด 19.05-38.10 มิลลิเมตร (3/4-1½ นิ้ว) และหินย่อยเบอร์ 3 ที่มีขนาดตั้งแต่ 38.10-76.20 มิลลิเมตร (1½-3 นิ้ว) วัสดุผสมต้องมีรูพรุนพอที่จะสามารถดูดซับน้ำได้และเป็นที่สำหรับการขยายตัวของน้ำเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต

3. ส่วนคละของวัสดุผสม (Gradation) คือ ส่วนคละมีผลอย่างมากต่อความสามารถทำงานได้ และปริมาณซีเมนต์ แต่ละก้อนหรืออนุภาคของวัสดุผสมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่าจะวัสดุผสมนั้นจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ นอกจากนี้วัสดุผสมหยาบและละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมเมื่อนำมาผสมรวมกัน เพื่อให้วัสดุผสมขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุผสมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่จะยึดวัสดุผสมเข้าไว้ด้วยกัน และลดช่องว่างระหว่างวัสดุผสม (ประณต กุลประสูตร, 2541) กล่าวไว้ว่า ส่วนคละของวัสดุผสมมีผลต่อเนื้อและคุณภาพคอนกรีต ปกติอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ กำหนดโดยให้ปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดมากกว่าปริมาตรช่องว่างในวัสดุผสมหยาบประมาณร้อยละ 5 โดยที่ช่องว่างระหว่างวัสดุผสมหยาบอาจมีมากถึงร้อยละ 45 ของปริมาตรวัสดุผสมหยาบ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักจะมีการกำหนดปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดเท่ากับประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรของวัสดุผสมหยาบที่แห้ง แต่เพื่อให้ส่วนผสมของคอนกรีตง่ายต่อการเท จึงได้มีการกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบไว้โดยอยู่ระหว่าง 1:1½ ถึง 1:2½ อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบแสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

ขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสมหยาบ		อัตราส่วนของวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ	
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
3/8 นิ้ว	หินเกล็ด	0.55	0.70
3/4 นิ้ว	หิน 1	0.40	0.60
1 นิ้ว หรือมากกว่า	หิน 2	0.30	0.50

2.7.3 น้ำ

น้ำสำหรับผสมคอนกรีตมีหน้าที่หลักคือ ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้เกิดการจับตัวแน่นกับวัสดุผสมทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นก้อนวัสดุที่แข็ง ช่วยเคลือบผิววัสดุผสมให้เปียกเพื่อการยึดจับกับซีเมนต์เพสต์ได้ดี และยังช่วยทำให้ส่วนผสมมีความลื่น มีความชื้นเหลวพอดีสามารถทำงานได้อย่างสะดวก และหล่อเข้าแบบได้ตามต้องการ ดังนั้นคุณภาพและปริมาณน้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต น้ำที่นำมาผสมในคอนกรีตจึงต้องเป็นน้ำสะอาด ไม่มีน้ำมัน กรด ต่าง สารอินทรีย์ และต้องมีความชื้นไม่เกิน 2,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตที่ผลิตได้ เช่น ระยะเวลาในการแข็งตัว ค่ากำลังรับแรงอัด หรือทำให้คอนกรีตมีสีผิวที่ไม่สม่ำเสมอ

คอนกรีตที่มีคุณภาพดีไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของอัตราส่วนผสมแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตที่ถูกกำหนดเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (Water to cement ratio) ก็จัดเป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญเช่นกัน กล่าวไว้ว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์น้อยจะแข็งแรงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์มาก แต่อย่างไรก็ตามส่วนผสมของคอนกรีตก็ควรจะต้องมีความเข้มข้นเหลวพอดี เพื่อให้สะดวกต่อการเทคอนกรีตลงแบบ ความต้องการน้ำจำนวนเพียงให้สามารถกลืนไหลเข้าแบบหล่อได้ แต่การใส่น้ำปริมาณมากเกินไปอาจทำให้คอนกรีตมีสภาพเหลว ซึ่งอาจมีความสะดวกการเทแต่ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จะมีค่าต่ำลง จากตารางที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ตารางที่ 2.11 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

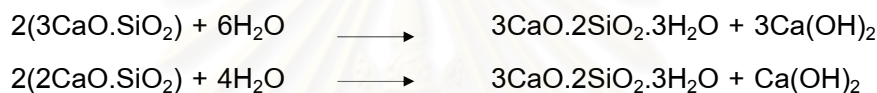
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
0.35	500	420
0.40	450	380
0.45	410	340
0.50	350	280
0.55	320	250
0.60	280	210
0.65	250	190
0.70	210	170

น้ำสำหรับการบ่มเป็นน้ำที่คอนกรีตต้องการในขณะที่แข็งตัวแล้ว ต้องเป็นน้ำสะอาด เพื่อป้องกันผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต สีผิวคอนกรีตที่ไม่พึงประสงค์ และรอยเปื้อนที่ผิว อันเกิดจากการใช้น้ำสกปรกบ่มคอนกรีต ส่วนน้ำสำหรับการใช้ล้างวัสดุนั้นไม่จำเป็นต้องสะอาด เหมือนกับน้ำสำหรับส่วนผสมและบ่ม แต่ก็ควรเป็นน้ำที่สะอาดพอควร ไม่มีฝุ่น เกลือ หรือมีสารอินทรีย์ปนอยู่ เพราะอาจเคลือบผิววัสดุผสมและทำให้คอนกรีตที่ได้กำลังอัดลดลงหรือแข็งตัวช้า

2.7.4 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้น

1. ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

ปฏิกริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยมีสารตั้งต้นคือ คัลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) ซึ่งเป็นสารประกอบในปูนซีเมนต์และน้ำ (H_2O) เมื่อทำปฏิกริยาแล้วจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่เรียกรวมๆว่า ซีเมนต์เจล (Cement Gel) ประกอบด้วยคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate ; C-S-H) ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide ; $Ca(OH)_2$) อีกประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 25 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพราะมีปริมาณสูงสุด ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ มีผลึกหยาบ ปฏิกริยาดังกล่าวสามารถเขียนในรูป สมการเคมี ได้ดังนี้

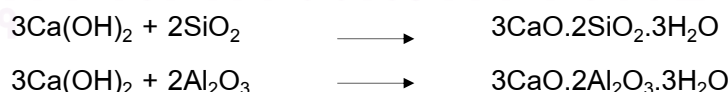


ปฏิกริยานี้จะดำเนินต่อเนื่องโดยที่คัลเซียมออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกจากคัลเซียมซิลิเกต ($CaO \cdot SiO_2$) เข้าทำปฏิกริยากับน้ำ (H_2O) ได้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ปฏิกริยาจะสิ้นสุดเมื่อเข้าสู่สมดุล หรือสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตถูกทำปฏิกริยาไปจนหมด

คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเชื่อมประสานทำให้ ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกริยาต่อไปได้อีก หากมีสารประกอบที่เหมาะสมมารวมทำปฏิกริยา

2. ปฏิกริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

เป็นปฏิกริยาขั้นที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นคือ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชัน เข้าทำปฏิกริยากับซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยมีปฏิกริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกริยาไฮเดรชัน มีผลต่อการเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีต แต่เนื่องจากเป็นปฏิกริยาขั้นที่ 2 และอัตราการเกิดปฏิกริยาเกิดขึ้นช้า จึงทำให้คอนกรีตซึ่งใช้เถ้าลอยบางชนิด (Class F) แทนที่ซีเมนต์บางส่วนมีสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจาก

ปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าปกติ จึงมีผลให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่าจึงทำให้เกิดการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย แต่ในกรณีเถ้าลอยบางชนิด (Class C) ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งในลักษณะเชื่อมประสาน (Cementitious) และปอซโซลาน (Pozzlane) การพัฒนากำลังในช่วงต้นอาจไม่แตกต่างมากนัก (เมธี เวชารัตนา, 2535)

2.8 คอนกรีตบล็อก

คอนกรีตบล็อก เป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ยังมีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยใช้ก่อเป็นผนังกันหรือกำแพงทั้งภายในและภายนอกของอาคาร หรือก่อเป็นพื้นทางเท้า ถนนเป็นต้น ด้วยสมบัติในการทนไฟและระบายความร้อนได้ดี น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ขนาดและคุณภาพได้ตามมาตรฐาน ทำให้คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุที่มีประโยชน์อย่างมากต่องานก่อสร้าง คอนกรีตบล็อกที่ดีต้องมีสมบัติได้มาตรฐานที่กำหนดโดย สมาคมทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (The American Society for Testing and Materials, ASTM) หรือตามมาตรฐาน มอก. ของประเทศไทยที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม

คอนกรีตบล็อก หมายถึง แท่งคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และวัสดุผสม ที่เหมาะสมชนิดต่างๆ เช่น ทราย กรวด หินย่อย และบางครั้งอาจมีสารอื่นที่เหมาะสมปนอยู่ด้วยอัดเข้าแบบมาตรฐานเป็นบล็อกต่างๆ คอนกรีตบล็อกสามารถแบ่งออกกว้างๆ ตามประโยชน์ในการใช้สอยเป็น คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง และคอนกรีตบล็อกสำหรับปูพื้น

2.8.1 คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง

คอนกรีตบล็อกก่อผนังสามารถจำแนกออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวง (Hollow concrete block) ซึ่งเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีลักษณะกลวง แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถรับน้ำหนักได้ (Load bearing block) ใช้สำหรับผนังที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุก และน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเอง และชนิดที่ไม่สามารถรับน้ำหนักได้ (Non-load bearing block) โดยไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกใดๆ ได้นอกจากน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเอง รูปที่ 2.7 แสดงคอนกรีตบล็อกแบบกลวงมาตรฐานที่มีการผลิตและใช้ในประเทศไทย

คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบตัน (Solid concrete block) เป็นคอนกรีตบล็อกที่ผลิตเฉพาะชนิดสามารถรับน้ำหนักได้เท่านั้น

2.8.2 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (Interlocking concrete paving block)

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีลักษณะเป็นก้อนคอนกรีตตัน ที่สามารถนำมาวางเรียงประสานกันได้อย่างต่อเนื่อง มีสีตามธรรมชาติหรืออาจมีผงสีเจือปนอยู่ทั้งบล็อกหรือเฉพาะที่ชั้น

ผิวหน้าและมีรูปร่างแบบใดก็ได้ เหมาะสำหรับใช้ปูพื้นเช่น ถนน ทางเท้า ลานจอดรถ และลานกองเก็บวัสดุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบโครงสร้างชั้นพื้นและชั้นรองพื้นให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งาน

ชนิดและขนาดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภท โดยพิจารณาถึงลักษณะ รูปร่างของคอนกรีตบล็อกซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิต ดังนี้

ก. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซีแพค 6 เซนติเมตร สำหรับปูทางเท้าและจอดรถถนนภายในอาคาร

ข. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซีแพค 10 เซนติเมตร สำหรับใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักสูง อาทิ ลานจอดรถในโรงงาน พื้นโกดังสินค้า ถนนสาธารณะ

ค. ขอบคันหินซีแพค สำหรับก่อทำขอบคันทางเดินหรือขอบของถนนที่ปูด้วยบล็อกชนิดนี้ ให้มีความเรียบร้อยสวยงาม

ง. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปตัว "ไอ" เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการปูซ้อนเพื่อทำพื้นถนน

รายละเอียดของบล็อกแต่ละชนิดให้ดูจากรูปที่ 2.8 ประกอบ

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้

ก. ปูง่ายสะดวกรวดเร็ว เสร็จแล้วใช้งานได้ทันที คอนกรีตบล็อกปูถนน ออกแบบมาให้สามารถล็อกกันได้ในตัว

ข. สะดวกและง่ายในการซ่อมบำรุง และด้วยเหตุที่มีรูปลักษณะเป็นก้อนที่ต่อเนื่องกัน คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจึงไม่มีการแตกหักเป็นรอยร้าวเหมือนพื้นคอนกรีตทั่วไป แต่ในกรณีที่จำเป็นต้องเปลี่ยนหรือซ่อมก็สามารถถอดเปลี่ยนได้เฉพาะก้อน

2.8.3 เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ก. มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมให้เป็นไปตามตารางที่ 2.12 แต่มาตรฐาน ASTM C936-82 ได้กำหนดมิติอย่างกว้างๆ โดยคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแต่ละก้อนต้องมีความกว้าง และความยาวไม่เกิน 140 และ 240 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความหนาต้องไม่มากกว่า 140 มิลลิเมตร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและความยาวกำหนดโดย ASTM C936-82 มีค่า ± 1.6 มิลลิเมตร ขณะที่ความคลาดเคลื่อนของความหนาเท่ากัน คือ ± 3.2 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C140-96

ตารางที่ 2.12 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น
(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531)

มิติ	เกณฑ์ที่กำหนด (มิลลิเมตร)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
ความกว้างและความยาว	ไม่เกิน 295	± 2
ความหนา	60	± 2
	80	± 2
	100	± 3
	120	± 3
ความหนาของชั้นผิวหน้า (เฉพาะชั้นผิวหน้าที่ทำเป็นสี)	ต่ำสุด 3	

ข. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต้องมีเนื้อแน่น ไม่ร้าวและสีของชั้นผิวหน้าต้องสม่ำเสมอ การทดสอบทำโดยการตรวจพินิจ

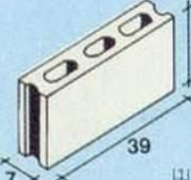
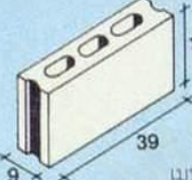
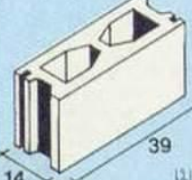
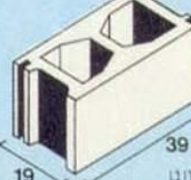
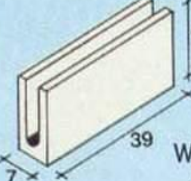
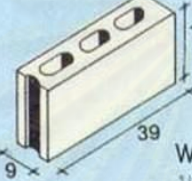
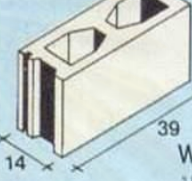
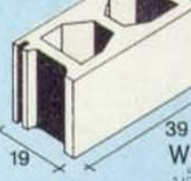

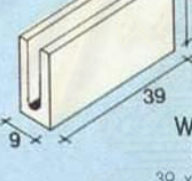
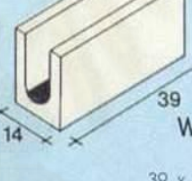
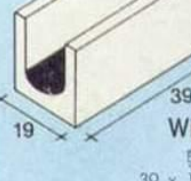
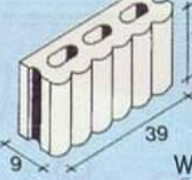
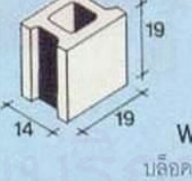


ค. ความได้ฉาก

- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเกณฑ์กำหนดของความหนาไม่เกิน 80 มิลลิเมตร จะมีค่าความเบี่ยงเบนของความได้ฉากได้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร

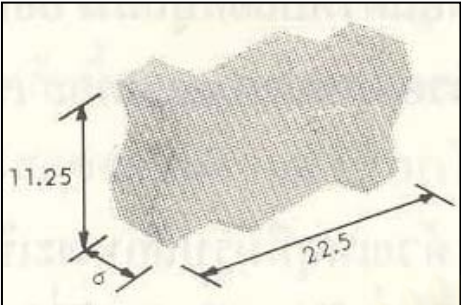
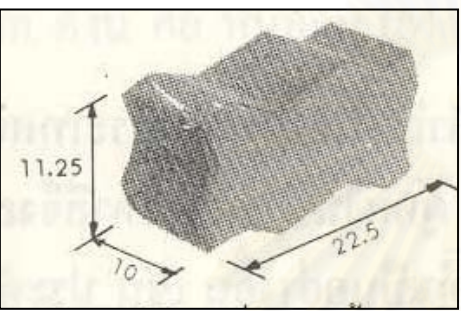
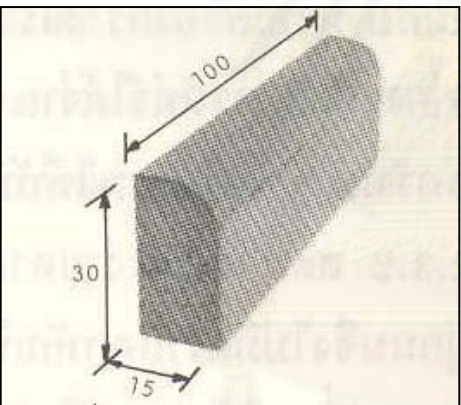
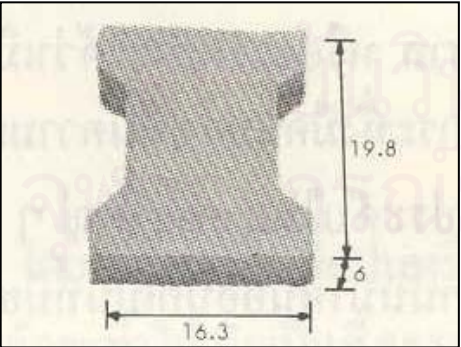
- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเกณฑ์กำหนดของความหนาเกิน 80 มิลลิเมตร จะมีค่าความเบี่ยงเบนของความได้ฉากได้ไม่เกิน 3 มิลลิเมตร

ง. ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแต่ละก้อน จะต้องไม่น้อยกว่า 35 เมกะปาสคาล และค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 40 เมกะปาสคาล ขณะที่ ASTM C936-82 กำหนดให้แต่ละก้อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจะต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 50 เมกะปาสคาล โดยให้ค่าเฉลี่ยมากกว่า 55 เมกะปาสคาล ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C140-96

จ. ASTM C936 กำหนดให้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และวัสดุปอซโซลานที่ใช้ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C150-95a และ C618-96 ตามลำดับ วัสดุผสมต้องได้มาตรฐานตามข้อกำหนด ASTM C33-93 ยกเว้นสัดส่วนคละที่ไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด โดยสามารถใช้ได้ทั้งวัสดุผสมธรรมดา หรือวัสดุผสมน้ำหนักเบา (Light weight aggregate) การดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกต้องไม่มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยในแต่ละก้อนต้องมีค่าไม่มากกว่า 7 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบตามวิธีในมาตรฐาน ASTM C140-96

คอนกรีตบล็อกมาตรฐาน แบบและขนาดต่าง ๆ			
Size 3ins Block บล็อกขนาด 3 นิ้ว	Size 4ins Block บล็อกขนาด 4 นิ้ว	Size 6ins Block บล็อกขนาด 6 นิ้ว	Size 8ins Block บล็อกขนาด 8 นิ้ว
 <p>WK 3 เมน-บล็อก 39 x 19 x 7 wt. 7.6 kg.</p>	 <p>WK 4 เมน-บล็อก 39 x 19 x 9 wt. 8.5 kg.</p>	 <p>WK 6 เมน-บล็อก 39 x 19 x 14 wt. 13.0 kg.</p>	 <p>WK 8 เมน-บล็อก 39 x 19 x 19 wt. 18.3 kg.</p>
 <p>WK 3-1 ยู-บล็อก 39 x 19 x 7 wt. 7.5 kg.</p>	 <p>WK 4-1 บล็อก-นม 39 x 19 x 9 wt. 9.0 kg.</p>	 <p>WK 6-1 บล็อก-นม 39 x 19 x 14 wt. 13.0 kg.</p>	 <p>WK 8-1 บล็อก-นม 39 x 19 x 19 wt. 19.0 kg.</p>
 <p>WK 3-2 บล็อกครึ่งก้อน 19 x 19 x 7 wt. 4.0 kg.</p>	 <p>WK 4-2 ยู-บล็อก 39 x 19 x 9 wt. 9.4 kg.</p>	 <p>WK 6-2 ยู-บล็อก 39 x 19 x 14 wt. 13.0 kg.</p>	 <p>WK 8-2 ยู-บล็อก 39 x 19 x 19 wt. 19.3 kg.</p>
	 <p>WK 4-3 บล็อก-ลอน 39 x 19 x 9 wt. 8.4 kg.</p>	 <p>WK 6-3 บล็อกครึ่งก้อน 19 x 19 x 14 wt. 6.0 kg.</p>	 <p>WK 8-3 บล็อกครึ่งก้อน 19 x 19 x 19 wt. 8.0 kg.</p>
	 <p>WK 4-4 บล็อกครึ่งก้อน 19 x 19 x 9 wt. 4.5 kg.</p>		

รูปที่ 2.7 คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวงมาตรฐาน แบบและขนาดต่างๆ
(ห้างหุ้นส่วนจำกัด วงกลม, แผ่นพับ)

	<p>บล็อกปูถนนซีแพค 6 ซม. สำหรับงานปูทางเท้า จอตรถนนภายใน บ้าน 1 ตารางเมตรใช้ 40 ก้อน</p> <table border="0"> <tr> <td>ความยาว</td> <td>22.5</td> <td>ซม.</td> </tr> <tr> <td>ความกว้าง</td> <td>11.25</td> <td>ซม.</td> </tr> <tr> <td>หนา</td> <td>6</td> <td>ซม.</td> </tr> </table>	ความยาว	22.5	ซม.	ความกว้าง	11.25	ซม.	หนา	6	ซม.			
ความยาว	22.5	ซม.											
ความกว้าง	11.25	ซม.											
หนา	6	ซม.											
	<p>บล็อกปูถนนซีแพค 10 ซม. สำหรับใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักสูง เช่น ลานจอตรใน โรงงาน โกดังสินค้า ถนนสาธารณะ 1 ตารางเมตรใช้ 40 ก้อน</p> <table border="0"> <tr> <td>ความยาว</td> <td>22.5</td> <td>ซม.</td> </tr> <tr> <td>ความกว้าง</td> <td>11.25</td> <td>ซม.</td> </tr> <tr> <td>หนา</td> <td>10</td> <td>ซม.</td> </tr> </table>	ความยาว	22.5	ซม.	ความกว้าง	11.25	ซม.	หนา	10	ซม.			
ความยาว	22.5	ซม.											
ความกว้าง	11.25	ซม.											
หนา	10	ซม.											
	<p>ขอบคันทินซีแพค เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการสร้างถนน ซีแพคได้ ผลิตขอบคันทินสำเร็จรูป ขนาดกว้าง 15 ซม. สูง 30 ซม. ยาว 1 เมตร เพื่อใช้ทำขอบถนนทั่วไป เหมาะสม มากสำหรับใช้ควบคู่ไปกับบล็อกปูถนนซีแพค สามารถ ทำการติดตั้งได้ง่ายเพียงแต่วางเรียงต่อกันเท่านั้น</p>												
	<p>บล็อกปูถนนรูปตัว "ไอ" เป็นบล็อกปูถนนซีแพคแบบใหม่ มีลักษณะรูปตัวไอ 1 ตารางเมตรใช้ 35 ก้อน</p> <table border="0"> <tr> <td>ความกว้าง</td> <td>16.3</td> <td>ซม.</td> </tr> <tr> <td>ความยาว</td> <td>19.8</td> <td>ซม.</td> </tr> <tr> <td>หนา</td> <td>6</td> <td>ซม.</td> </tr> <tr> <td>น้ำหนัก</td> <td>3.8</td> <td>กิโลกรัม</td> </tr> </table>	ความกว้าง	16.3	ซม.	ความยาว	19.8	ซม.	หนา	6	ซม.	น้ำหนัก	3.8	กิโลกรัม
ความกว้าง	16.3	ซม.											
ความยาว	19.8	ซม.											
หนา	6	ซม.											
น้ำหนัก	3.8	กิโลกรัม											

รูปที่ 2.8 ลักษณะและขนาดของบล็อกปูถนนซีแพคแต่ละชนิด (พิภพ สุนทรสมัย, 2530)

มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดให้ คอนกรีตบล็อกที่จะนำมาทดสอบต้องมีอายุไม่น้อยกว่า 7 วัน

(ชวลิต นิตยะ, 2524) กล่าวว่า วิธีการในการสร้างคอนกรีตบล็อกที่ดี หลักใหญ่คือ ทำให้รับกำลังได้ดีที่สุดในขณะที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด และให้ใช้ซีเมนต์น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็นเพื่อเป็นการลดค่าวัสดุ และการหดตัวจะได้ลดน้อยลงด้วย

2.9 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.9.1 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยการดูดซับ

การนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในการกำจัดสีย้อม เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากประเทศเหล่านี้มีการแปรรูปผลผลิตต่างๆ มาก ดังนั้นจึงมีกากผลผลิตเหล่านี้เป็นจำนวนมาก จึงน่าจะมีการนำมาพัฒนาใช้ให้เกิดประโยชน์ให้มากขึ้น โดยนำมาบำบัดน้ำเสียประเภทโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษอย่างมาก เช่น โรงงานย้อมผ้า โรงงานฟอกย้อม เป็นต้น

Johnson และคณะ (1965) ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD จากการบำบัดน้ำเสียชุมชนชั้นที่ 2 โดยใช้ถ่านและถ้ำลอยลิกไนต์เป็นตัวดูดซับ พบว่าถ้ำลอยลิกไนต์สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD ได้ถึงร้อยละ 66

Mokay และคณะ (1980) ได้ศึกษาอัตราการดูดซับสีเบสิก Astrazone blue โดยใช้ Sorbsil Silica ขนาด 500 – 710 μm พบว่าถ้าความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น เวลาที่ต้องการให้ถึงจุด สมดุลของการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ เช่นความเข้มข้นของสีย้อม 50 ppm จะต้องใช้เวลา 8 ชั่วโมง และถ้าความเข้มข้นของสี 500 ppm จะต้องใช้เวลา 24 ชั่วโมง และยังพบอีกว่าถ้าขนาดของตัวดูดซับลดลงการดูดซับสีก็จะเพิ่มขึ้นอีกทั้งถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราในการดูดซับในตอนเริ่มต้นจะเร็วขึ้น

Asfour และคณะ (1985) ศึกษาการกำจัดสีย้อมเบสิกโดยใช้ซีลี้อยไม้เนื้อแข็งที่มีความชื้น ร้อยละ 13 เป็นตัวดูดซับสี ทำการทดลองแบบแบตช์โดยใช้สารละลายสี Astrazone Blue (Basic Blue FRR69) ศึกษาผลของการกวนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี ขนาดของอนุภาคซีลี้อย และผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสี ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการกำจัดสี จะแปรผันตรงกับความเร็วยวในการกวน ความเข้มข้นสีเริ่มต้น และอุณหภูมิ และจะแปรผกผันกับขนาดอนุภาค โดยความสามารถในการกำจัดสีของซีลี้อยไม้เนื้อแข็ง ในสารละลายสีที่มีความเข้มข้น 200 มก./ลบ.ตม. สูงถึงร้อยละ 85 ที่เวลาสัมผัส 100 นาที อุณหภูมิ 80 °ซ โดยใช้ซีลี้อยไม้เนื้อแข็งที่มีขนาด 250-500 นาโนเมตร นอกจากนี้

อุณหภูมิยังมีผลต่อระยะเวลาสัมพัทธ์ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C เป็น 80°C จะสามารถลดระยะเวลาสัมพัทธ์ได้ถึงร้อยละ 44.4

Gupta และ Bhattacharya (1985) ศึกษาการกำจัดสีของโรงงานฟอกเยื่อกระดาษโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) ปูนขาว (Lime) และ High molecular weight amine (Kemamine T 1902D) โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ จากการทดลองพบว่า เถ้าลอยลิกไนต์สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 94 ส่วนสารเอมีนมีความสามารถในการกำจัดสีได้ดีกว่าเถ้าลอยคือกำจัดสีได้ประมาณร้อยละ 97 แต่มีราคาสูงกว่ามาก และสำหรับปูนขาวกำจัดสีได้ร้อยละ 90

McKay และคณะ (1987) ศึกษาการกำจัดสีย้อมเบสและสีย้อมแอซิด อย่างละ 2 โทนสีคือ สีน้ำเงิน และสีแดง โดยใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับสี และศึกษาผลของอุณหภูมิสีย้อม และขนาดอนุภาคของชานอ้อย ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ ผลการทดลองพบว่าชานอ้อยมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสได้สูงสุดเท่ากับ 158 มิลลิกรัมสีต่อกรัมชานอ้อย สำหรับสี Basic Blue 69 และ 77 มิลลิกรัมสีต่อกรัมชานอ้อย สำหรับสี Basic Red 22 แต่สามารถดูดซับสีย้อมแอซิดได้ต่ำกว่า คือเท่ากับ 23 มิลลิกรัมสีต่อกรัมชานอ้อย สำหรับสี Acid Red 114 และ 22 มิลลิกรัมสีต่อกรัมชานอ้อย สำหรับสี Acid Blue 25 ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พบว่า เป็นการเพิ่มการเคลื่อนที่ของไอออนขนาดใหญ่ในสีย้อม ทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงขึ้น

Gupta และคณะ (1988) ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในการกำจัดสี Metomega Chrome Orange GL. พบว่าต้องใช้เวลา 110 นาที การดูดซับสี Chrome จะเข้าถึงจุดสมดุลถ้าความเข้มข้นของสีลดลงจาก 20 ถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ pH 4.5 การดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 71 ถึง 90 และถ้าขนาดของเถ้าลอยลดลงจาก 125 ถึง 53 μm ประสิทธิภาพของการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 65 ถึง 92 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะลดลงจากร้อยละ 92 ถึง 69 ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมีค่า rate constant , K_{ad} เท่ากับ $3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$

Li และ Zhao (1991) ศึกษาทดลองเดินระบบกำจัดสีด้วยเถ้าและเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งใช้หลักการกรองติดผิวโดยระบบดังกล่าวสร้างเป็นชั้นกรองของเถ้า พบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกเยื่อสูง และได้แนะนำให้ใช้ระบบดังกล่าวแทนระบบทางชีวภาพและอิเล็กโทรไลซิสสำหรับโรงงานที่มีเถ้าเพียงพอลงแล้วหรือใช้ร่วมกันในกรณีที่ทำเถ้าได้ไม่พอ เพราะประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้มากกว่าการเลือกใช้แต่เฉพาะระบบชีวภาพและอิเล็กโทรไลซิส

Ahmed และ Ram (1992) ได้ศึกษาการใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับสีเบสิก พบว่าการดูดซับสีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลา 30 ถึง 40 นาที ก็เข้าถึงจุดสมดุล และพบว่าถ้า pH ของสารละลายต่ำปฏิกิริยาของการดูดซับจะเกิดขึ้นช้า

Ahmedna และคณะ (2000) ศึกษาลักษณะพื้นผิวและประสิทธิภาพการลดสีของน้ำตาลดิบจากโรงงานน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นจากชานอ้อยที่มีน้ำเชื่อมที่ทำจากข้าวโพดและน้ำมันดินเป็นสารปรุงแต่ง ผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการลดสีของน้ำตาล ควรีพื้นที่ผิวและมีสัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่ที่เหมาะสม และมีประจุบริเวณพื้นผิวตรงข้ามกับสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของคาร์บอนในการดูดซับสีของน้ำตาลจะลดลง เมื่อเพิ่มประจุลบที่ผิวคาร์บอน และประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มสูงสุด เมื่อคาร์บอนที่ใช้ไม่มีประจุลบ แสดงให้เห็นว่า น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล เป็นน้ำเสียที่มีประจุลบ

Ghouti และคณะ (2003) ศึกษาความเป็นได้ของการใช้ Diatomite ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ จากการศึกษพบว่า การดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับ Diatomite ซึ่งจะมีพันธะไฮดรอกซิลในหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแล้วทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนอะตอมของสีย้อม Methylene Blue ซึ่งจะเกิดกระบวนการดูดซับ

ชลธา ไกรวัตนุสรณ์ และคณะ (2538) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชานอ้อย และศึกษาผลของความชื้นที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านให้ได้ถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองพบว่า ความชื้นที่เหมาะสมในการกระตุ้นเท่ากับร้อยละ 54.4 ซึ่งจะให้ผลการดูดซับสีจากน้ำตาลได้สูงสุดถึงร้อยละ 97.4

อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์ (2538) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม 7 ประเภทโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยถ่านหินลิกไนต์ ณ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในปริมาณต่าง ๆ คือ 0.5 , 1.0 กรัม พบว่าถ้ำลอยลิกไนต์ปริมาณ 0.5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมประเภทต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 48.8-98.4% โดยมีช่วงเวลาที่ใช้ในการดูดซับอยู่ในช่วง 5-200 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณถ้ำลอยเป็น 1.0 กรัม พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมทั้ง 7 ประเภทเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 85.5-99.3% เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 5-160 นาที

2.9.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยของงานคอนกรีต

การศึกษาที่ผ่านมาส่วนมากเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ถั่วลอยจากการเผาถ่านหิน มาใช้ในงานคอนกรีต โดยในประเทศไทย คือ ถั่วลอยลิกไนต์ จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัด ลำปาง ซึ่งจะศึกษาในเรื่องผลกระทบต่อของคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ หรือคอนกรีตที่เกิดจาก ปัจจัยทั้ง ทางกายภาพและทางเคมีของถั่วลอยที่ผสมลงไป รวมทั้งผลของอุณหภูมิการบ่มและ ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ของถั่วลอยซึ่งรวบรวมได้ดังนี้

Nontananandh (1990) ได้สรุปว่า ปฏิริยาปอซโซลานของถั่วลอยสามารถสังเกตได้ จากการลดลงของ Ca(OH)_2 โดยใช้ X-Ray Diffraction เพราะปฏิริยาปอซโซลานเกิดจาก Ca(OH)_2 และเป็นปฏิริยาที่ทำให้เกิดสารประกอบคือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), เอททรินไกต์ (Ettringite; $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$), คัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) และ คัลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เป็นสาเหตุของการพัฒนากำลังใน คอนกรีต

Zhang และ Malhotra (1995) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่เรียกว่า Thermally activated alumina-silicate ต่อสมบัติของคอนกรีตสด (ความสามารถการทำงานได้ การยี้ม ระยะเวลาการก่อตัว และความร้อนจากปฏิริยาไฮเดรชัน) และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (กำลังรับแรง โมดูลัสความยืดหยุ่น การหดตัวและความต้านทานต่อสารเคมีต่าง ๆ) เปรียบเทียบกับ สัดส่วนควบคุม และกับคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูม วัสดุดังกล่าวมีลักษณะเป็นผงสีขาว มี ส่วนประกอบหลักเป็น SiO_2 ซึ่งมีค่าเป็น 51.34 เปอร์เซ็นต์ และ Al_2O_3 41.95 เปอร์เซ็นต์ โดย น้ำหนัก ขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.3 ไมครอน และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น Amorphous โดย มีส่วนที่เป็นผลึก (Crystallized phases) เพียงเล็กน้อย ผลการศึกษาพบว่า วัสดุดังกล่าวมีความ เป็นปอซโซลานสูง และสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ การแทนที่ ในสัดส่วน 10 เปอร์เซ็นต์จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าสัดส่วนควบคุมในทุกระยะเวลาการบ่ม ยาวนานไปจนถึง 180 วัน และสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงต้นได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ แทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม เนื่องจากอัตราการทำปฏิริยาไฮเดรชันที่เร็วกว่า สังเกตได้จาก อุณหภูมิในคอนกรีตสดที่เพิ่มขึ้นสูงกว่า ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน คอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วย Thermally activated alumina-silicate จะมีสมบัติโดยทั่วไปดีกว่าสัดส่วนควบคุม และคอนกรีต แทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม

Frias และคณะ (1997) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Microstructure) ของ มอร์ต้าผสมถั่วลอยและปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่ออนุภาคและขนาดช่องว่างในโครงสร้าง และจาก การศึกษาได้พบว่า ความละเอียดของถั่วลอยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการกระทบกันของอนุภาค นานขึ้นถั่วลอยบางอนุภาคอาจเกิดการแตกหักระหว่างกระบวนการกระทบ ทำให้อนุภาคหลัง กระบอบ เสียลักษณะทรงกลม และยังพบว่า ความพรุนทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นหลังจากอายุประมาณ

28 วัน และเพิ่มขึ้นตามอายุ กำลังของมอร์ตาลดลงแบบเส้นตรงเมื่อความพรุนรวมมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อส่วนผสมของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาลดลงในระยะต้น

Maltais และ Marchand (1997) ศึกษาอุณหภูมิของการบ่มต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนา กำลังของมอร์ตาลผสมเถ้าลอย Class F ที่มีขนาดเล็กกว่าและใหญ่กว่า $45 \mu\text{m}$ ใช้ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 20°C และ 40°C ผลการศึกษาพบว่า ขนาดเถ้าลอยจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อายุช่วงแรกเพิ่มขึ้น สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิการบ่มมีผลต่อการลดกำลังอัดในระยะยาวของมอร์ตาลควบคุม แต่ไม่มีผลเชิงลบต่อกำลังอัดของมอร์ตาลที่ผสมเถ้าลอยในระยะยาว ในช่วงต้นโครงสร้างของคัลเซียม ซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ของทั้งมอร์ตาลที่ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาลธรรมดาไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างที่อายุน้อยกว่า 28 วัน อิทธิพลของเถ้าลอยต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ไม่ปรากฏชัดทุกอุณหภูมิการบ่มของเถ้าลอยทั้งสองชนิด แต่จะปรากฏชัดเพิ่มขึ้นหลังจากอายุ 28 วันไปแล้ว นอกจากนี้แล้วเถ้าลอยที่ขนาดละเอียดกว่ามีผลต่อการเพิ่มความแน่นของโครงสร้างภายใน เนื่องจากว่าปริมาณของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ เอททรินไกต์ (Ettringite; $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$) ที่เพิ่มขึ้น

Wangwichit (1997) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการต้านทานความชื้นได้ของคลอไรด์ โดยวัดความลึกของการซึม โดยแบ่งอุณหภูมิจากการศึกษาเป็น 3 อุณหภูมิ คือ 20°C , 30°C และ 40°C จากการศึกษาพบว่า มอร์ตาลธรรมดาที่มีความลึกในการซึมได้ของคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนมอร์ตาลที่ผสมเถ้าลอยมีความลึกของความซึมลดลง การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสาน (water-to-binder ratio) มีผลต่อการเพิ่มความลึกในการซึมได้ของคลอไรด์ในมอร์ตาลทั้งสองชนิด แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานเท่ากันที่อุณหภูมิ 20°C มอร์ตาลที่ผสมเถ้าลอยมีความลึกของความซึมมากกว่ามอร์ตาลธรรมดา ส่วนที่อุณหภูมิ 30°C และ 40°C มอร์ตาลที่ผสมเถ้าลอยให้ผลดีต่อการต้านทานความชื้นได้ของคลอไรด์ได้มากกว่าสำหรับผลของปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ พบว่าที่อุณหภูมิ 20°C ความลึกของซึมได้ในมอร์ตาลที่ผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์สูงขึ้น ขณะที่อุณหภูมิ 30°C และ 40°C ความลึกของการซึมได้ในมอร์ตาลที่ผสมเถ้าลอย ค่อนข้างคงที่ทุกระดับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์

Weiping และ Brown (1997) ได้ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแปรตามปริมาณการเติม $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, ไตรคัลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต และเอททรินไกต์ ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์หลักเช่นเดียวกันกับที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณปูนขาวต่ำ (low-lime ash) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะยังไม่เกิดในช่วงแรก แต่หากใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณปูนขาวสูง (high-lime ash) จะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นมีผลในการเพิ่มสารเชื่อมประสานโดยตรง จากการศึกษาพบว่า

ระดับอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา โดยที่ระดับอุณหภูมิก่ (25°C) ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างช้าๆ แต่เมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วและเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วง 24 ชั่วโมงแรก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 60°C

Damanhuri และคณะ (2000) ได้ศึกษาการยึดตรึง (Fixation) ของโลหะหนักในถ้ำจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้าโดยการผสมในซีเมนต์ ผลิตเป็นคอนกรีตเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง พบว่า อัตราส่วนผสมของถ้ำลอยต่อซีเมนต์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาบ่ม 28 วัน สามารถรับกำลังอัดได้ 473 กก./ซม.³ และผ่านมาตรฐานการชะละลาย TCLP ของประเทศอินโดนีเซีย นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบในสภาวะแบบชื้นและแบบแห้งโดยการทำให้ก้อนตัวอย่างชุ่มน้ำสลับกับการให้ความร้อนเป็นระยะๆ เป็นเวลา 13 วัน พบว่า มีการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง 8.15-10.87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผ่านเกณฑ์ของ ASTM D4843 (ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์)

Isaia และคณะ (2003) อธิบายว่าวัสดุปอซโซลานที่เติมแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปนั้น ส่วนใหญ่เพื่อเพิ่มสมบัติรับน้ำหนักเชิงกล (Mechanical strength) และความคงทน (Durability) ของโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น และโครงสร้างรูพรุน (Pore structure) ในเนื้อคอนกรีตที่ลดลง อันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของวัสดุที่ลดลงสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวเติมเต็ม (Physical filler) ให้กับโครงสร้างคอนกรีตอีกด้วย คอนกรีตที่ใช้ในการทดลองจะถูกแทนที่ด้วยวัสดุประสานต่างๆ ได้แก่ ถ้ำลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ถ้ำกลบจากโรงสี และปูนขาวที่บดให้ละเอียด ในสัดส่วนที่ต่างๆ กัน (12.5 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์) รวมถึงแทนที่ด้วยวัสดุประสาน 2 ชนิดร่วมกันในสัดส่วนถ้ำลอยและถ้ำกลบเท่ากับ 12.5+12.5 และ 25+25 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับสัดส่วนควบคุมที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 0.5 และ 0.65 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic effect) และสมบัติการเติมเต็ม (Filler effect) จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเพิ่มของวัสดุปอซโซลานในส่วนผสม โดยอัตราการเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 91 วันจะมีค่าสูงกว่าที่ 28 วัน เมื่อพิจารณาที่ค่ากำลังรับแรงอัดคงที่ สมบัติการเติมเต็มจะมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน

อุดม หงษ์ประธานพร (2532) ศึกษาถึงการพัฒนา กำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมถ้ำลอยและถ้ำกลบ โดยใช้ถ้ำลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และถ้ำกลบที่ได้จากการเผาอิฐในจังหวัดราชบุรี พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 15 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก การพัฒนา กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แต่ในอัตราการแทนที่ของถ้ำทั้งสองที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 20 จะให้การพัฒนากำลังในช่วงแรกต่ำกว่าปูนซีเมนต์ล้วน แต่ในช่วงอายุหลังจะให้กำลังที่สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างถ้ำลอยกับถ้ำกลบ พบว่าถ้ำลอยให้การพัฒนากำลังดีกว่าถ้ำกลบ เนื่องจากมีอนุภาคละเอียดกว่าซึ่งทราบได้จากภาพถ่ายจากกล้อง Electron Microscope

นภฤกษ์ แสงเงิน และ ฤทธิชัย ดิงธนาธิกุล (2537) ศึกษาถึงการนำเถาลอยลิกไนต์ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักประเภทตะกั่วและทองแดงโดยวิธีทำเป็นก้อนแข็ง อีกทั้งยังศึกษาแนวทางการเป็นไปได้อาจมีความเหมาะสมในการปูรองพื้นทางเท้า โดยทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดว่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้หรือไม่ และความสามารถในการถูกสกัดว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ความปลอดภัยต่อการใช้งาน โดยศึกษาการแปรค่าซีเมนต์เถาลอยลิกไนต์ผสมปูนซีเมนต์เป็นอัตราส่วน 0.10 0.25 0.50 และ 0.75 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งปรากฏผลว่า อัตราส่วนของเถาลอยลิกไนต์ต่อปูนซีเมนต์ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดอยู่ในช่วง 0-0.33 ฉะนั้นโครงการนี้ยังเป็นแนวทางในการศึกษาถึงประโยชน์ในการนำมาประยุกต์ใช้ทำวัสดุปูพื้นซึ่งใช้ประโยชน์ได้จริงเมื่อปริมาณของโลหะหนักน้อย เพื่อที่อัตราส่วนระหว่างเถาลอยลิกไนต์ต่อปูนซีเมนต์จะอยู่ในเกณฑ์ที่ทำให้เกิดค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในสภาวะที่ใช้งานได้จริง

พชรพงศ์ ชื่นศิริ และ แสงสิน เกตุโตประการ (2540) ศึกษาการนำกากตะกอนของสีน้ำทาบ้านมาเป็นส่วนผสมการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ผลการทดลองพบว่า สามารถผสมเศษสีแห้งเร็ว และกากตะกอนจากระบบบำบัดสีแห้งเร็วในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นได้ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถรับแรงกดได้สูงสุด 131.7 กก./ซม.² อัตราการชะละลายออกมาของโลหะหนักในน้ำไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด (ยกเว้นเหล็กที่มีอัตราการละลายสูงสุด 0.9-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ให้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร) น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตได้เบากว่าผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด 1.136 เท่า ส่วนราคาของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้นมีราคาถูกกว่าผลิตภัณฑ์ทั่วไปตามท้องตลาดประมาณร้อยละ 50 แต่ราคายังไม่ได้รวมราคาต้นทุนจากการทำเศษสีแห้งเร็วและกากตะกอนจากระบบบำบัดสีแห้งเร็วแบบเปียกให้แห้ง และบดให้ละเอียด

ไฉทิพย์ อภิธรรมวิริยะ (2542) ศึกษาการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำเป็นวัสดุปูพื้นได้แก่ บล็อกซีเมนต์เพสต์ประสาน และกระเบื้องดินเผา โดยทำการทดสอบผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อการทำก้อนแข็งและสมบัติทางกายภาพเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ เช่น ค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ความชื้นน้ำ และทดสอบการชะละลายสารประเภทแอนทราควินโนน พบว่า อัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 เนื่องจากผลการทดสอบให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (37.47 เมกะปาสคาล และความหนาแน่น 2.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลาย 72 เปอร์เซ็นต์ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของคอนกรีตที่ผลิตได้เป็น 3.76 บาท ต่อขนาดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นขนาด 3 กิโลกรัม ที่ระยะเวลาบ่มที่เหมาะสม 28 วัน เมื่อทำการศึกษาในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่อัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.50 พบว่า ระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมคือ 14 วัน บล็อกประสานปูพื้นมีค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นเป็น 30.55 เมกะปาสคาลและ 2.08 กรัมต่อ

ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ โดยให้ค่าประสิทธิภาพการลดการชะละลายแอน ทราควิโนน 54 เปอร์เซ็นต์ ต้นทุนค่าใช้จ่าย 3.30 บาทต่อขนาดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นขนาด 3 กิโลกรัม

กฤษฎ์ จารุทะวีย์ (2546) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มจาก โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตาร์ พบว่า เถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง ส่วนของความต้องการน้ำและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาร์ได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.485 ต่อ 1 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนงานดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือ

- เครื่องวัดพีเอช
- เครื่องคัดแยกขนาด
- ตะแกรงคัดขนาด 160 ไมครอน
- เครื่องชั่งขนาด 3,100 กรัม และ เครื่องชั่งขนาด 210 กรัม
- เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.3 (ข)
- เครื่องเขย่า แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก)
- ขวดขนาด 50 มิลลิลิตร
- เต้าอบวัสดุ
- หลอดทดลอง
- ชุดเครื่องกรอง
- เครื่องผสม (Mixer) มอร์ตา และคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.4 (ค)
- กระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน
- เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด แสดงดังรูปที่ 3.4 (ข)
- แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4 (ก)

3.1.2 วัตถุดิบ

- เถ้าลอยชานอ้อย

เถ้าลอยชานอ้อยเป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ชานอ้อย เพื่อเป็นพลังงานความร้อนมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยนำมาจากโรงงานผลิตน้ำตาล บริษัทไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดสระบุรี แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยมีคุณสมบัติของเถ้าลอยชานอ้อยในรูปของสารประกอบออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 3.1

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง (Ordinary Portland Cement) แสดงดังรูปที่ 3.1

- หินเกล็ด และทราย แสดงดังรูปที่ 3.1
- น้ำประปา

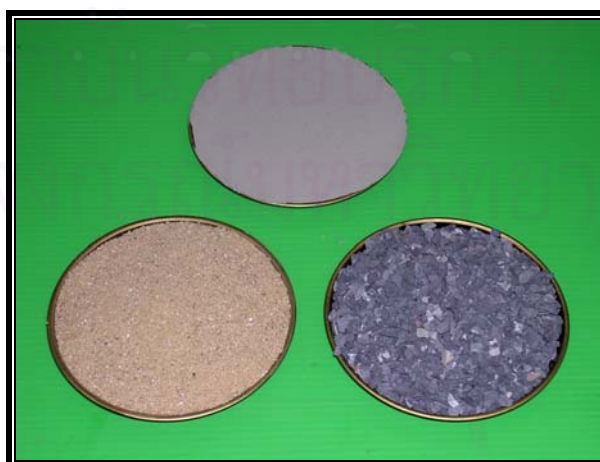
ตารางที่ 3.1 สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วลอยลิกไนต์ แก้วลอยชานอ้อย

% สารประกอบออกไซด์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2528)	แก้วลอยลิกไนต์ (อุดม หงษ์ประธานพร, 2532)	แก้วลอยชานอ้อย
SiO ₂	20.20	35.43	51.96
Al ₂ O ₃	5.42	28.27	1.37
Fe ₂ O ₃	2.92	14.57	0.82
CaO	63.82	11.92	7.26
K ₂ O	0.46	2.48	1.32
MgO	1.52	2.13	1.74
SO ₃	2.55	2.35	0.11
L.O.I.	2.72	2.56	33.17

หมายเหตุ : ค่า L.O.I (Loss On Ignition) หมายถึง ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

4.1.3 สารเคมี

- สีย้อม : สีรีแอกทีฟที่มีหมู่อะโซได้ความอนุเคราะห์จากบริษัท ไตสตาร์ไทย จำกัด
สีดำ Remazol Black B แสดงสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 3.5 (ก)
สีแดง Remazol Brilliant Red F3B แสดงสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 3.5 (ข)
สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R แสดงสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 3.5 (ค)
- กรดไฮโดรคลอริก
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- น้ำกลั่น



รูปที่ 3.1 วัสดุประสาน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1(บน)
วัสดุผสม ทราย (ล่างซ้าย) และหินเกล็ด (ล่างขวา)



รูปที่ 3.2 ถ้ำล่อยชานอ้อยก่อนผ่านตะแกรงคัดขนาด (ซ้าย) และหลังผ่านตะแกรงคัดขนาด (ขวา)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) เครื่องเขย่า (ข) เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์



(ก)



(ข)

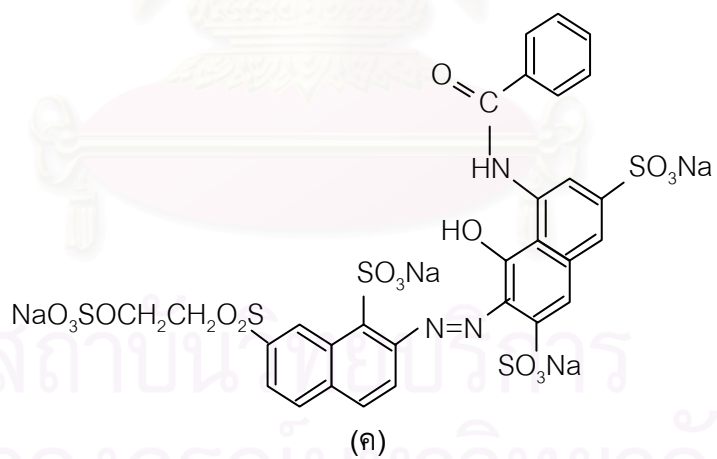
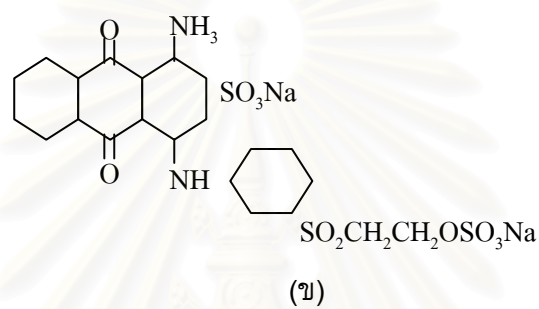
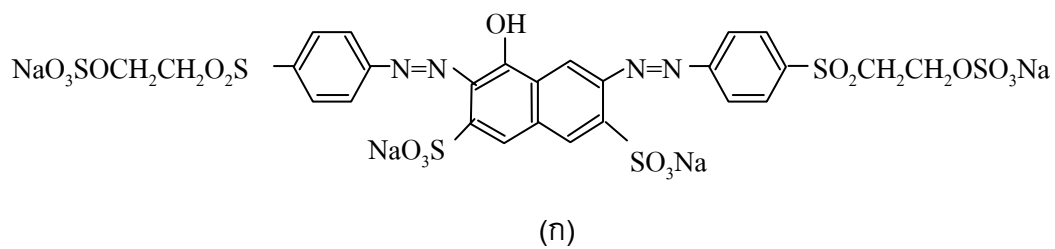


(ค)

รูปที่ 3.4 (ก) แบบหล่อก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

(ข) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

(ค) เครื่องผสม (Mixer) มอร์ตาร์



รูปที่ 3.5 สูตรโครงสร้างสี้อมรีแอกทีฟ Remazol Black B (ก), Remazol Brilliant Blue R (ข)
และ Remazol Brilliant Red F3B (ค)

3.2 การดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

3.2.1 ขั้นตอนการดูดซับ

3.2.2 ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

3.2.1 ขั้นตอนการดูดซับ

3.2.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

1. ตัวแปรอิสระ

- ชนิดของสีย้อมรีแอกทีฟที่มีหมู่อะโซโทนดำ แดง และน้ำเงิน
- ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
- ปริมาณตัวดูดซับ
- เวลาที่ใช้ในการทดลอง
- พีเอช

2. ตัวแปรตาม

- ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการกำจัด
- ความสามารถในการดูดซับ

3. ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ในการทดลอง

- ชนิดของวัสดุที่ใช้ดูดซับ
- ขนาดของตัวดูดซับ
- ความเร็วรอบในการกวน

ค่าต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	พารามิเตอร์
- ตัวแปรอิสระ	
1. ชนิดของสีย้อม	สีย้อมรีแอกทีฟ : Remazol Black B : Remazol Brilliant Red F3B : Remazol Brilliant Blue R
2. ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมในน้ำเสียดังเคราะห์	- 50 มิลลิกรัม/ลิตร - 100 มิลลิกรัม/ลิตร - 150 มิลลิกรัม/ลิตร - 200 มิลลิกรัม/ลิตร
3. ปริมาณตัวดูดซับ	0.05, 0.1, 0.15, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัม
4. พีเอช	5 , 7 , 9
5. เวลาที่ใช้ในการทดลอง	- ทุก ๆ 15 นาทีใน 1 ชั่วโมง - ทุก ๆ 30 นาที ใน 2 ชั่วโมง - 3 , 4 , 5 และ 6 ชั่วโมง
- ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัด	- ความเข้มข้นของสารละลายสี - พีเอช
2. ความสามารถในการดูดซับ	- เปอร์เซ็นต์การกำจัดสี
- ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ในการทดลอง	
1. ชนิดของวัสดุที่ใช้ดูดซับ	ถ้ำลอยชานอ้อย
2. ขนาดของตัวดูดซับ	เส้นผ่านศูนย์กลาง < 100 เมช (160 ไมครอน)
3. ความเร็วรอบในการกวน	125 รอบต่อนาที

3.2.1.2 ขั้นตอนในการทดลอง

การทดลองที่ 1

การศึกษาถึงเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของแก๊ลลอยซานอ้อยที่ใช้ดูดซับสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

1. เตรียมสารละลายสีย้อมชนิดสีรีแอกทีฟ (Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue R, Remazol Brilliant Red F3B) ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 50 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ปรับพีเอชของสารละลายให้ได้ เท่ากับ 7
3. นำสารละลายสีที่เตรียมไว้มา 1 ลิตร เติมแก๊ลลอยซานอ้อย 1 กรัม ลงไปเพื่อเป็นตัวดูดซับสี
4. ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็วคงที่ 125 รอบต่อนาที
5. เก็บตัวอย่างโดยชั่วโมงแรกเก็บตัวอย่างทุก 15 นาที หลังจาก 1 ชั่วโมงจะเก็บตัวอย่าง ทุกครึ่งชั่วโมงจนครบ 2 ชั่วโมง และหลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างที่ 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง
6. นำน้ำเสียสังเคราะห์ไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน
7. แล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสีที่ลดลงที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม

การทดลองที่ 2

การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

1. เตรียมสารละลายสีย้อมชนิดสีรีแอกทีฟ (Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue R, Remazol Brilliant Red F3B) ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 50 , 100 , 150 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ปรับพีเอชของสารละลายให้ได้ เท่ากับ 5 , 7 , 9
3. นำสารละลายสีที่เตรียมไว้มา 1 ลิตร เติมแก๊ลลอยซานอ้อย 1 กรัม ลงไปเพื่อเป็นตัวดูดซับสี
4. ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็วคงที่ 125 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการทดลองที่ 1
5. นำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน
6. วัดความเข้มข้นสีที่ลดลงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

การทดลองที่ 3

การศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลอง ไอโซเทอมการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายสีย้อมที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 2
2. ปรับพีเอชของสารละลายสีย้อมที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 2
3. นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมไว้มา 1 ลิตร เติมเกลือยอนอ้อย 1 กรัม ลงไปเพื่อเป็นตัวดูดซับสี
4. ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็วคงที่ 125 รอบต่อนาที
5. หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างโดยชั่วโมงแรกเก็บตัวอย่างทุก 15 นาที หลังจาก 1 ชั่วโมงจะเก็บตัวอย่างทุกครึ่งชั่วโมงจนครบ 2 ชั่วโมง และหลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างที่ 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง
6. แล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน
7. แล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสีที่ลดลงที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม

การทดลองที่ 4

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมสารละลายสีย้อมที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 2

1. ทำการปรับพีเอชของสารละลายสีย้อมที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 2
2. นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมไว้มา 1 ลิตร เติมเกลือยอนอ้อยปริมาณ 0.05, 0.1, 0.15, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัม ลงไปเพื่อเป็นตัวดูดซับสี
3. ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็วคงที่ 125 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมในการทดลองที่ 3
4. แล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน
5. วัดความเข้มข้นสีที่ลดลงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

3.2.2 ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

เกลือยอนอ้อยที่จะนำมาใช้ในขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นนั้น เป็นเกลือยอนอ้อยรวมที่ใช้ในการดูดซับสีต่างๆ กันได้แก่ (สีดำ Remazol Black B, สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R, สีแดง Remazol Brilliant Red F3B) ในความเข้มข้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งจะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

การทดลองที่ 1

ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยแปรค่าอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด (เบอร์ 4) เท่ากับ 1:1:2 1:1.1:1.9 1:1.5:2.5 1:2:3 และ 1:3:5 โดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 และระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน แล้วนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด เพื่อหาอัตราส่วนผสมพื้นฐานที่เหมาะสม

การทดลองที่ 2

ศึกษาการแปรค่าต่างๆ ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้ค่าอัตราส่วนของวัสดุผสมที่ได้จากการทดลองที่ 1 การแปรค่าต่างๆ มีดังนี้

- แปรค่าอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยขานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีต่อซีเมนต์ 0.0, 0.1, 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนัก
- แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7
- แปรค่าระยะเวลาบ่มที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน

แล้วนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

การทดลองที่ 3

ศึกษาการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำเถ้าลอยขานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสี ย้อมมาใช้ประโยชน์ในการทำเป็นคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นเพื่อการก่อสร้าง และเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกประเภทเดียวกันที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีหาโดยวิธี X-ray fluorescence (XRF) spectroscopy โดยตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อยในรูปออกไซด์ รวมทั้งนำส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาแสดงด้วยเพื่อเปรียบเทียบกัน

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของ เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์ มีแคลเซียม (CaO) อยู่เพียงร้อยละ 7.26 และ 11.92 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าที่พบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีอยู่ถึงร้อยละ 63.82 โดยน้ำหนัก ซึ่งแคลเซียมนี้ จะทำปฏิกิริยาน้ำ (H_2O) ซึ่งก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวขึ้น ดังนั้น เถ้าลอยชานอ้อยจึงมีการเชื่อมประสานภายในตัวเองเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เถ้าลอยชานอ้อยมีส่วนประกอบหลักคือ ซิลิกา (SiO_2) โดยมีอยู่ร้อยละ 51.96 และมีผลรวมของซิลิกา อลูมินาและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) เท่ากับร้อยละ 54.15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สารประกอบส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งคือปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เมื่อเปรียบเทียบผลรวมของซิลิกา อลูมินาและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) นี้ กับของเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 78.27 และ 28.54 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อยมาก

ค่า LOI (Loss On Ignition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยชานอ้อย มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 33.17 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าค่าตามมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96) ที่กำหนดชั้นคุณภาพ F และ C ให้มี LOI มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดย LOI หรือคาร์บอนในเถ้าลอยนี้จะดูดน้ำเมื่อทำการผสมเพื่อทำคอนกรีตบล็อก เนื่องจากเถ้าลอยชานอ้อยมีตัวคาร์บอนสูงซึ่งคาร์บอนนี้

เป็นตัวที่ดูดซับที่ดี ทำให้น้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง นอกจากนี้ยังจะดูดสารบางตัวที่เป็นตัวเพิ่มกำลังรับแรงอัด เป็นผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อย กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96) จะเห็นว่า เถ้าลอยชานอ้อยไม่อาจจัดอยู่ในชั้นคุณภาพใดๆได้ เนื่องจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) และซิลิกา (SiO₂) ของเถ้าลอยชานอ้อยไม่ตรงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.1

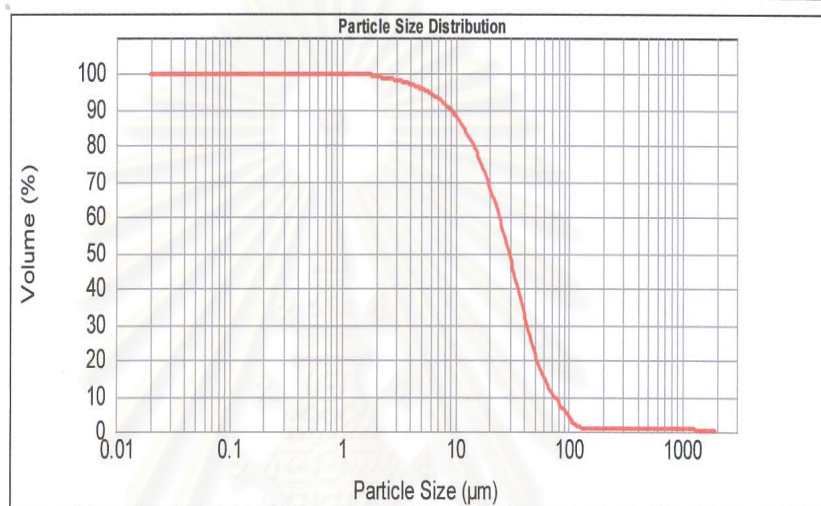
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ส่วนประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอยชานอ้อย	เถ้าลอยลิกไนต์แม่เกาะ (อุคม หงษ์ประทานพร, 2532)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2528)
Na ₂ O	0.43	-	0.26
MgO	1.74	2.13	1.50
Al ₂ O ₃	1.37	28.27	5.42
SiO ₂	51.96	35.43	20.20
P ₂ O ₅	1.43	-	-
SO ₃	0.11	2.35	2.55
Cl	-	-	-
K ₂ O	1.32	2.48	0.46
CaO	7.26	11.92	63.82
TiO ₂	0.22	0.38	-
MnO	0.14	0.11	-
Fe ₂ O ₃	0.82	14.57	2.92
CuO	0.01	0.05	-
Rb	0.01	-	-
SrO	-	0.09	-
ZrO ₂	0.01	-	-
ZnO	-	0.01	-
PbO	-	0.04	-
LOI	33.17	-	-
รวม	100.00	97.83	97.13

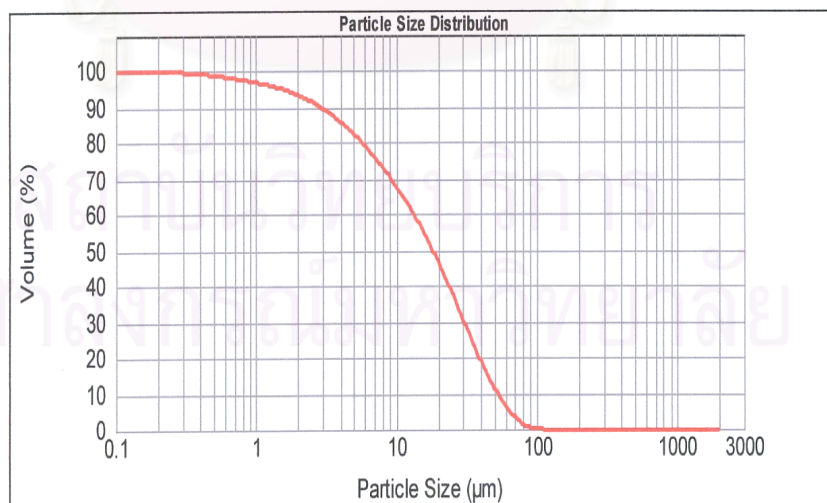
หมายเหตุ : “-“ คือ ไม่มีข้อมูลในงานวิจัย

4.1.2 การกระจายขนาดอนุภาค

การกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยซานอ้อย หาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) รูปที่ 4.1 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของถ้ำลอยซานอ้อย ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

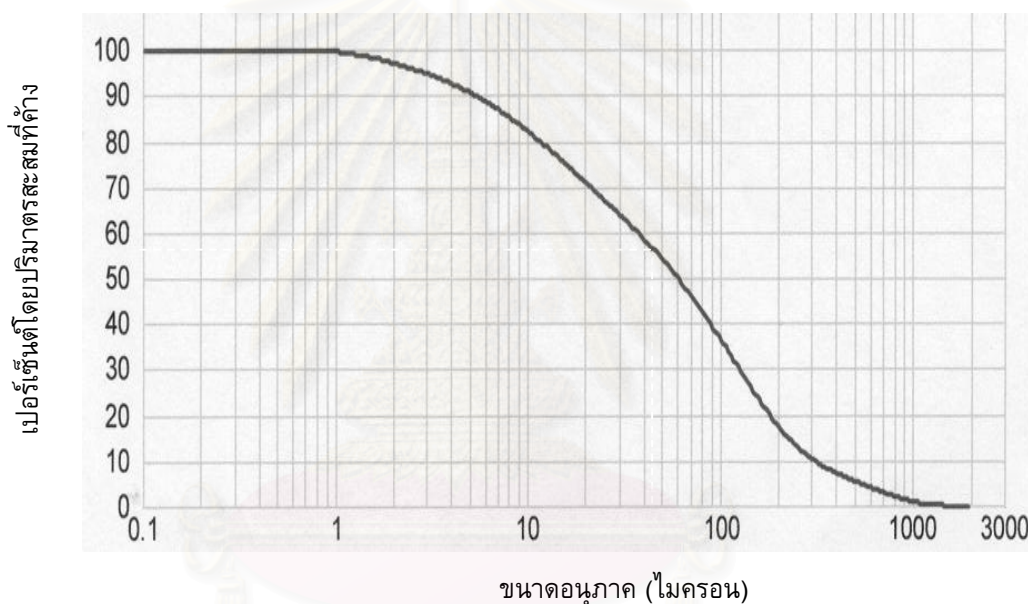


รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของถ้ำลอยซานอ้อย



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากรูปที่แสดงจะให้เห็นว่า ถ้ำลอยซานอ้อยมีขนาดหยาบกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของถ้ำลอยลิกันต์ ที่แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002) จะเห็นว่าขนาดของถ้ำลอยลิกันต์มีขนาดละเอียดกว่าถ้ำลอยซานอ้อย ส่วนขนาดอนุภาคที่ร้อยละโดยปริมาตรสะสมของถ้ำลอยลิกันต์เท่ากับ 10 50 และ 90 แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งถ้าขนาดอนุภาคมีขนาดละเอียดมาก จะทำให้เกิดการดูดซับได้ดีเพราะอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และมีรูพรุนมาก ซึ่งคาดว่าถ้ำลอยซานอ้อยอาจดูดซับได้ดีกว่าถ้ำลอยลิกันต์เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ส่วนการผลิตคอนกรีตบล็อกวัสดุสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุผสมที่ใหญ่กว่า



รูปที่ 4.3 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของถ้ำลอยลิกันต์

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของถ้ำลอยซานอ้อย ถ้ำลอยลิกันต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

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

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของถ้ำลอยลิกันต์เป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002)

4.1.3 พื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะ

จากผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนของถ้ำลอยชานอ้อยด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ้ำลอยชานอ้อยมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์มาก ซึ่งถ้ำลอยชานอ้อยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 112.40 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนของถ้ำลอยชานอ้อยมีค่าเท่ากับ 0.1127 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ผงถ่านกัมมันต์จะมีขนาดของรูพรุนน้อยกว่าถ้ำลอยชานอ้อย

ตารางที่ 4.3 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของถ้ำลอยชานอ้อย

ลักษณะ	ผงถ่านกัมมันต์ (สัญชวัล อิงคภากย์, 2539)	ถ้ำลอยชานอ้อย
พื้นที่ผิว BET Surface Area (sq.m./g)	1,163.81	112.40
ปริมาตรของรูพรุน BJH Cumulative Adsorption Pore Volume of Pore between 17-3000 A. dia. (cc./g)	0.8118	0.1127
ขนาดของรูพรุน Average Pore Diameter (A)	26.7743	39.0954

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีหน่วยเป็นพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีมาตรฐานในการหาความละเอียด ดังแสดงตารางที่ 4.4 แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ้ำลอยชานอ้อยเปรียบเทียบกับถ้ำลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะนี้ หาโดยใช้เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM C204-96

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ้ำลอยชานอ้อย ถ้ำลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนิดตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{cm}^2/\text{กรัม}$)
ถ้ำลอยชานอ้อย	4,121
ถ้ำลอยลิกไนต์	2,370
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3,380

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของถ้ำลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002)

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability) จะวัดระยะเวลาที่อากาศจำนวนหนึ่ง ไหลผ่านชั้นถ้ำลอยที่ถูกอัดแน่น ซึ่งอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอนของถ้ำลอยชานอ้อยนั้น ทำให้ชั้นการอัดแน่นนั้นหลวมกว่าการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ เป็นผลให้ความต้านทานอากาศที่ไหลผ่านชั้นการอัดแน่นนั้นของถ้ำลอยชานอ้อยมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ ลักษณะอนุภาคที่มีรูพรุนอยู่มากของถ้ำลอยชานอ้อย ก็ยังทำให้อากาศไหลผ่านไปได้อย่างรวดเร็วด้วย ดังนั้นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ้ำลอยชานอ้อยจึงมีค่าสูง แม้ว่าจะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ฉะนั้น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจึงอาจจะไม่สอดคล้องกับค่าความละเอียดของอนุภาคก็ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอนและมีรูพรุนมาก แต่ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะนี้ ก็เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการหา และเป็นวิธีที่ดีพอสมควรที่จะบอกได้อย่างคร่าวๆ ถึงคุณภาพหรือลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอย หรือวัสดุละเอียดอื่นๆ ส่วนที่จะใช้ในซีเมนต์รวมทั้งบอกลักษณะทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ เมื่อผสมวัสดุนั้น เช่น ความต้องการน้ำ ความสามารถในการทำงานได้

4.1.4 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุวิเคราะห์จากการคำนวณมวลต่อปริมาตร มวลได้จากการชั่งน้ำหนักและปริมาตรหาโดยการแทนที่น้ำ โดยค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และความพรุนของอนุภาค จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถ้ำลอยชานอ้อย หินเกล็ด และทราย รวมทั้งเปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะของถ้ำลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประ찬พร (2532)

ตารางที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถ้ำลอยชานอ้อย
ถ้ำลอยลิกไนต์ หินเกล็ด และทราย

ชนิดของวัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.12
ถ้ำลอยชานอ้อย	1.65
ถ้ำลอยลิกไนต์	2.56
หินเกล็ด	2.70
ทราย	2.65

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของถ้ำลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประ찬พร (2532)

จากตารางที่ 4.5 ค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันนั้น เนื่องมาจากส่วนประกอบทางเคมีในแต่ละวัสดุ ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีแต่ละตัวนั้น จะมีความถ่วงจำเพาะต่างกัน พวกที่มีความถ่วงจำเพาะสูง ได้แก่ คัลเซียม (CaO) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่มากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์ ส่วนพวกที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในเถ้าลอยชานอ้อย ทำให้เถ้าลอยชานอ้อยนี้มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ นอกจากนี้ความถ่วงจำเพาะยังขึ้นอยู่กับความพรุนของอนุภาค ซึ่งหากอนุภาคมีความพรุนสูง ค่าความถ่วงจำเพาะจะต่ำ และความพรุนของวัสดุสูงทำให้เกิดการดูดซับได้ดี ส่วนวัสดุที่นำมาทำก่อนนั้นถ้ามีความถ่วงจำเพาะต่ำกำลังรับแรงอัดจะลดลงเนื่องจากวัสดุมีความพรุนสูง

4.1.5 ความดูดซึมน้ำของวัสดุ

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุต่างๆเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากเพื่อใช้ในการควบคุมปริมาณน้ำของส่วนผสม เพื่อให้หน้าที่เต็มลงไปเป็นน้ำสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่มีหน้าที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ช่วยให้คอนกรีตสดทำงานได้ และเคลือบผิววัสดุผสมให้ซีเมนต์เพสต์เข้าจับยึด การหาใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C128-93 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สำหรับวัสดุผสมละเอียด ยกเว้นหินเกล็ดที่ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C127-88 ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเถ้าลอยชานอ้อย หินเกล็ดและทราย

ชนิดของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ
เถ้าลอยชานอ้อย	65.00
หินเกล็ด	1.06
ทราย	2.35

4.2 ขั้นตอนการดูดซับ

4.2.1 ผลการทดลองหาเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ดูดซับสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

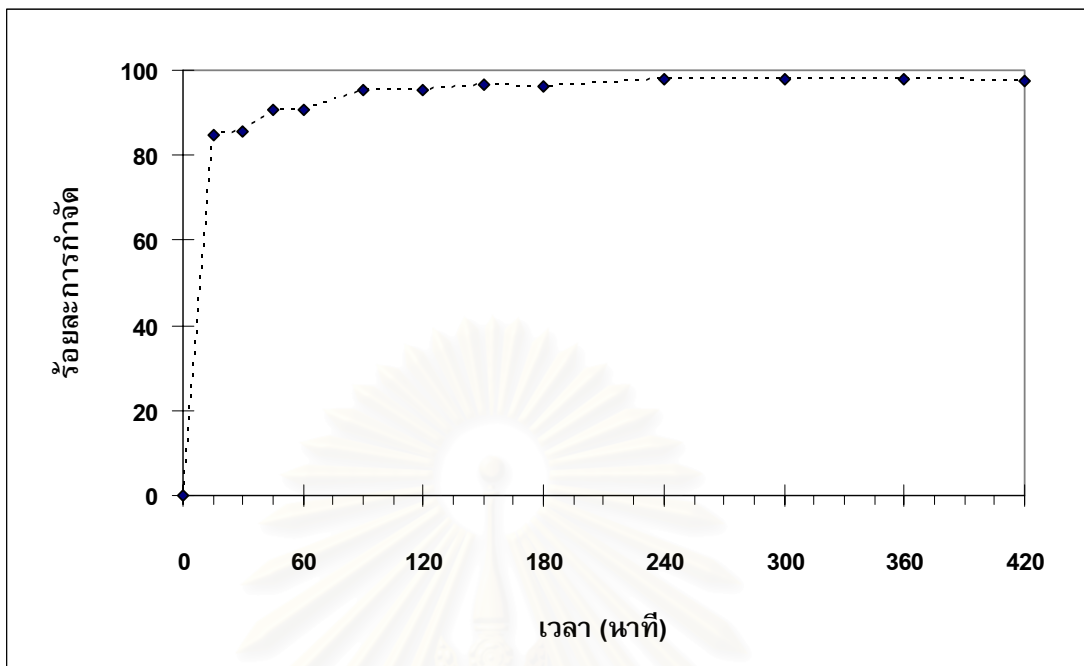
ผลการทดลองหาเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลแสดงผลโดยกราฟรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 โดยจะแสดงผลของกราฟในรูปแบบเป็นร้อยละของการกำจัดสีกับเวลา แต่ละกราฟจะแสดงผลของสีย้อมในแต่ละโทนสี และแสดงข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของเถ้าลอยชานอ้อยที่สภาวะการเตรียมต่างๆในภาคผนวก ก ในตารางที่ ก1 ถึง ก3

ผลการทดลองหาเวลาเข้าสู่สมดุของสีรีแอกทีฟโทเนสดำ (Remazol Black B) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ใช้ถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.4 พิจารณาที่ช่วงเวลาต่างๆของการทดลองพบว่า หลังการทดลองค่าของสีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 240 นาที แม้เพิ่มเวลาอีกก็ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสียอมให้สูงขึ้นมากได้อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองในรูปแบบร้อยละของการกำจัดสียอมจะปรากฏว่า ถ้ำลอยชานอ้อยมีประสิทธิภาพโดยให้ผลการกำจัดสียอมอยู่ในช่วงร้อยละ 84.83 ถึง 97.89 พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการกำจัดอยู่ในช่วงระหว่าง 9.47 ถึง 9.50

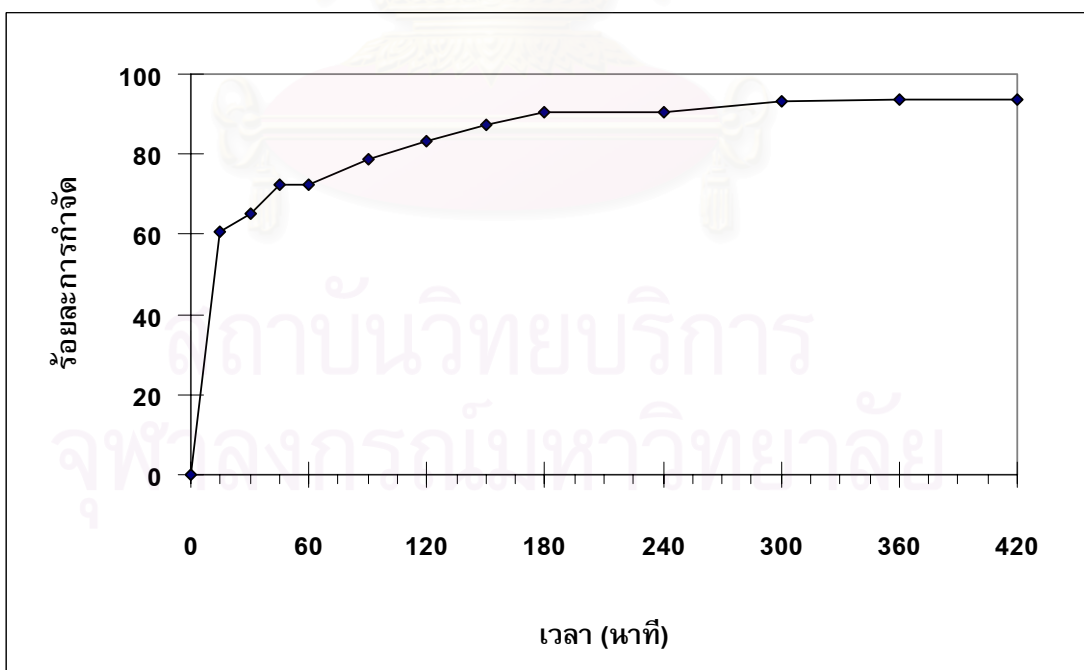
ผลการทดลองหาเวลาเข้าสู่สมดุของสีรีแอกทีฟโทเนสน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ใช้ถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.5 พิจารณาที่ช่วงเวลาต่างๆของการทดลองพบว่า หลังการทดลองค่าของสีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 300 นาที แม้เพิ่มเวลาอีกก็ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสียอมให้สูงขึ้นมากได้อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองในรูปแบบร้อยละของการกำจัดสียอมปรากฏว่า ถ้ำลอยชานอ้อยมีประสิทธิภาพโดยให้ผลการกำจัดสียอมอยู่ในช่วงร้อยละ 60.70 ถึง 93.82 พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการกำจัดอยู่ในช่วงระหว่าง 8.83 ถึง 8.86

ผลการทดลองหาเวลาเข้าสู่สมดุของสีรีแอกทีฟโทเนสแดง (Remazol Brilliant Red F3B) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ใช้ถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.6 พิจารณาที่ช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง พบว่า หลังการทดลองค่าของสีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 240 นาที แม้เพิ่มเวลาอีกก็ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสียอมให้สูงขึ้นมากได้อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองในรูปแบบร้อยละของการกำจัดสียอมปรากฏว่า ถ้ำลอยชานอ้อยมีประสิทธิภาพโดยให้ผลการกำจัดสียอมอยู่ในช่วงร้อยละ 78.43 ถึง 95.13 พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการกำจัดอยู่ในช่วงระหว่าง 9.01 ถึง 9.04

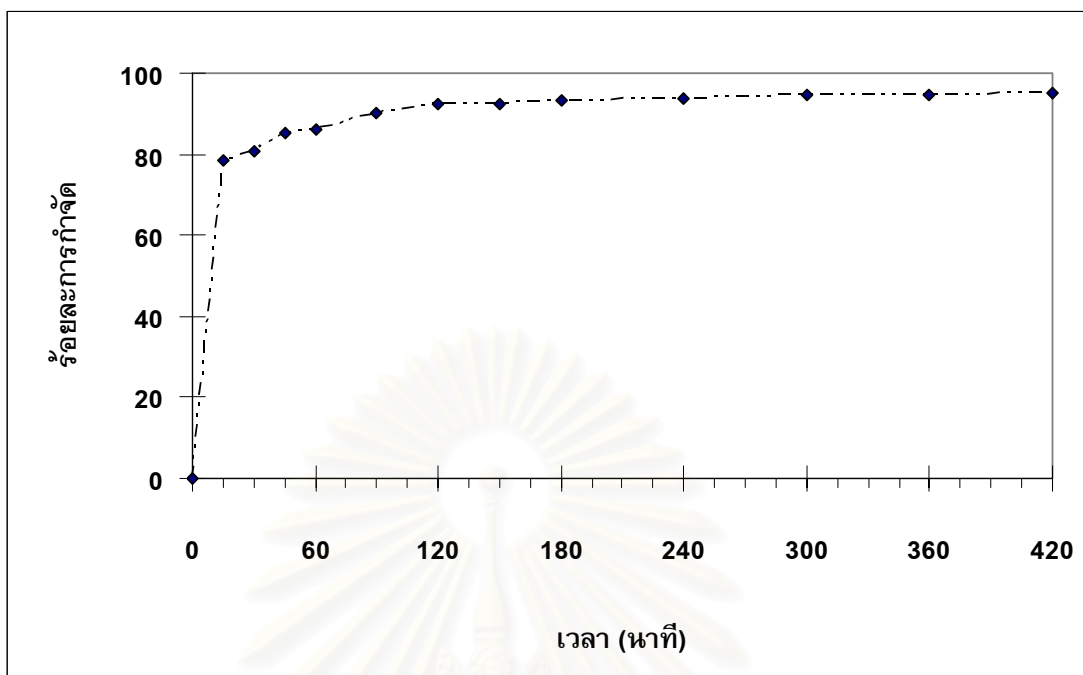
จากผลการทดลองหาเวลาเข้าสู่สมดุของสียอมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทเนส พบว่ามีเวลาที่เข้าสู่สมดุที่แตกต่างกัน ได้แก่ สีรีแอกทีฟโทเนสดำ (Remazol Black B) และ สีรีแอกทีฟโทเนสแดง (Remazol Brilliant Red F3B) เวลาที่เข้าสู่สมดุ 240 นาที ส่วนสีรีแอกทีฟโทเนสน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) เวลาที่เข้าสู่สมดุ 300 นาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดแล้วพบว่า เมื่อเวลาเท่ากันสีรีแอกทีฟโทเนสดำ (Remazol Black B) ถ้ำลอยชานอ้อยมีประสิทธิภาพโดยให้ผลการกำจัดได้ดีที่สุด รองลงมาคือ สีรีแอกทีฟโทเนสแดง (Remazol Brilliant Red F3B) และ สีรีแอกทีฟโทเนสน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) ถ้ำลอยชานอ้อยมีประสิทธิภาพโดยให้ผลการกำจัดต่ำที่สุด ส่วนค่าพีเอชที่ได้หลังการกำจัดสียอมจะมีแนวโน้มที่ค่อนข้างเป็นเบสสูง



รูปที่ 4.4 ผลการทดลองหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของสิรีแอกทีฟโทนสีดำ
(Remazol Black B)



รูปที่ 4.5 ผลการทดลองหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของสิรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน
(Remazol Brilliant Blue R)



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของสีรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B)

4.2.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการทดสอบหาค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เวลาที่เข้าสู่สมดุลที่ได้จากการทดลองที่ 4.1.1 แสดงผลโดยกราฟในรูปแบบเป็นร้อยละของการกำจัดสีกับพีเอช และค่าความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งแต่ละกราฟจะแสดงผลของสีย้อมในแต่ละสี ผลการทดสอบหาค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 และแสดงข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ในภาคผนวก ข ในตารางที่ ข1 ถึง ข3

ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมของสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5 7 9 ใช้เกลือยวซันอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที และใช้เวลาทำการทดลอง 240 นาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ค่าความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่มีแนวโน้มเดียวกันคือ ไม่แตกต่างกันมากเมื่อพีเอช 5 7 9 ส่วนค่าความเข้มข้นที่ 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่มีแนวโน้มเดียวกันเช่นกันคือ ไม่แตกต่างกันมากเมื่อพีเอช 5 7 9 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีค่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วง

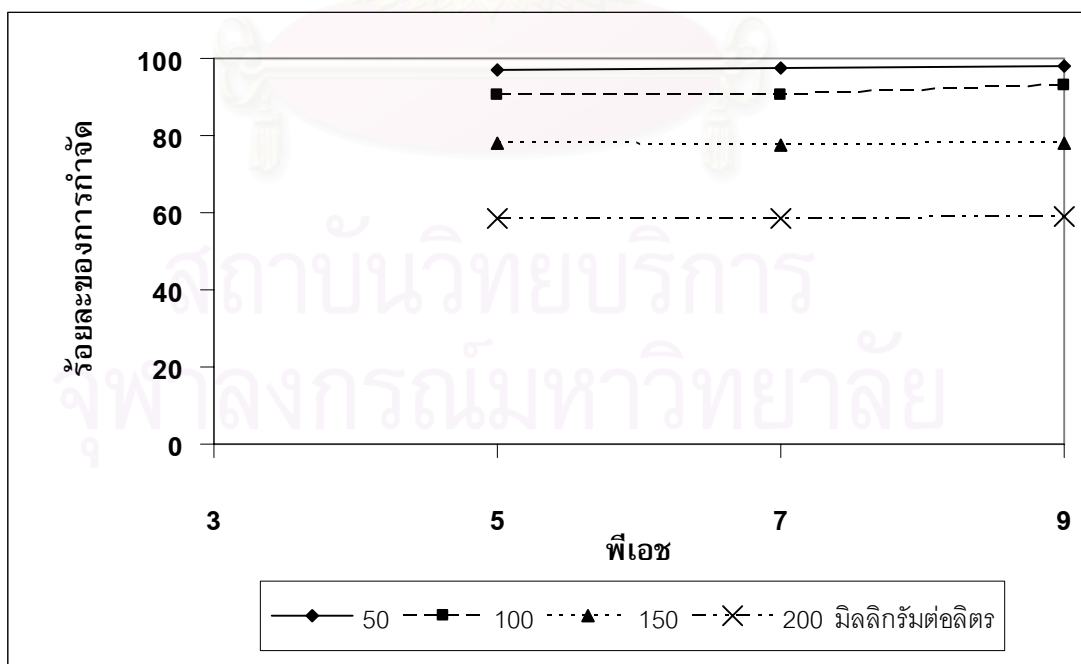
ระหว่างร้อยละ 97.05 ถึง 98.03 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีค่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 90.36 ถึง 93.04 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่มีความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 77.63 ถึง 78.04 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 58.48 ถึง 59.05 ส่วนค่าพีเอชที่ได้หลังการกำจัดสียอมจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 9.48 ถึง 9.51 ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน และจะสรุปได้ว่าค่าความเข้มข้นที่มีค่าน้อยประสิทธิภาพของการกำจัดสูงกว่าที่ค่าความเข้มข้นมาก จึงได้ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนค่าพีเอชจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดสี

ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมของสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5 7 9 ใช้เกลือยวซันอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที และใช้เวลาทำการทดลอง 300 นาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า ความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่มีแนวโน้มเดียวกันคือ ไม่แตกต่างกันมากเมื่อพีเอช 5 7 9 ส่วนค่าความเข้มข้นที่ 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่มีแนวโน้มเดียวกันเช่นกันคือ ไม่แตกต่างกันมากเมื่อมีค่าพีเอช 5 7 9 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 5 7 9 มีค่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 92.85 ถึง 93.47 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 70.12 ถึง 70.35 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 56.63 ถึง 57.16 และประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีค่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 46.15 ถึง 46.91 ส่วนค่าพีเอชที่ได้หลังการกำจัดสียอมจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 8.83 ถึง 8.89 ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน และจะสรุปได้ว่าค่าความเข้มข้นที่มีค่าน้อยประสิทธิภาพของการกำจัดสูงกว่าที่ค่าความเข้มข้นมาก จึงได้ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนค่าพีเอชจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดสี

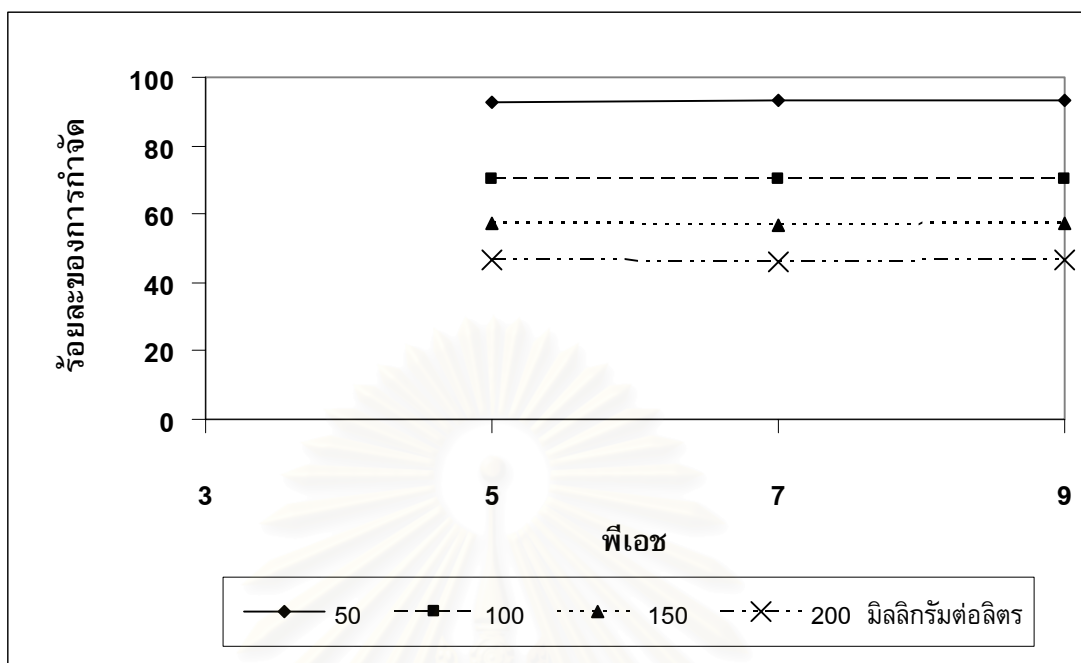
ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมของสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5 7 9 ใช้เกลือยวซันอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที และใช้เวลาทำการทดลอง 240 นาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า ความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่มีแนวโน้มเดียวกันคือ ไม่แตกต่างกันมากเมื่อพีเอช 5 7 9 ส่วนค่าความเข้มข้นที่ 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่มีแนวโน้มเดียวกันเช่นกันคือ ไม่แตกต่างกันมากเมื่อพีเอช 5 7 9 ประสิทธิภาพของการกำจัด

สีที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 5 7 9 มีประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 94.27 ถึง 94.60 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5 7 9 มีประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 79.52 ถึง 80.55 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 61.35 ถึง 63.35 และประสิทธิภาพของการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 7 9 มีประสิทธิภาพของการกำจัดสีอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 46.30 ถึง 47.47 ส่วนค่าพีเอชที่ได้หลังการกำจัดสีย่อมจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 9.01 ถึง 9.04 ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน และจะสรุปได้ว่าค่าความเข้มข้นที่มีค่าน้อยประสิทธิภาพของการกำจัดสูงกว่าที่ค่าความเข้มข้นมาก จึงได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนพีเอชจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดสี

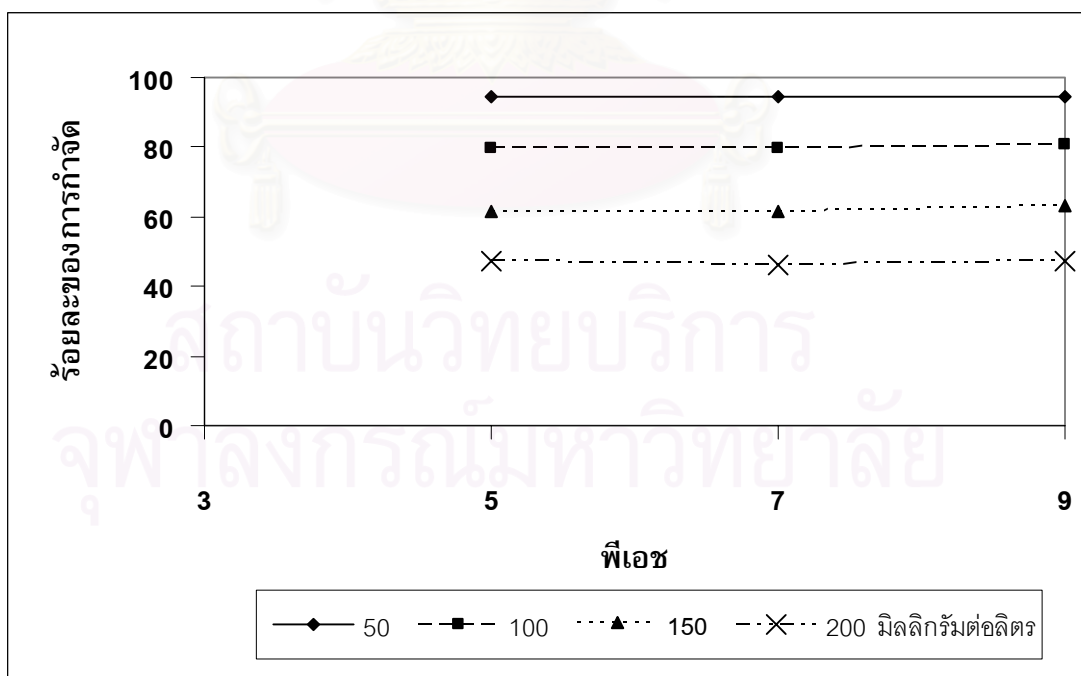
จากผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมของสีย้อมรีแอกทีฟของทั้ง 3 โทนสี หลังการทดลองพบว่า ความเข้มข้นที่มีค่าน้อยจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าความเข้มข้นที่มีค่ามาก ดังนั้นความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นค่าที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม เนื่องจากมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีสูงสุด ส่วนกลไกของการดูดซับในงานวิจัยนี้คาดว่าเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี เนื่องจากได้นำเกลือยวซันอ้อยที่ดูดซับสีแล้วไปทำการชะละลายผลปรากฏว่าไม่มีสีย้อมหลุดออกเลย พีเอชหลังการทดลองของแต่ละโทนสีใกล้เคียงกันและมีค่าที่สูง เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ได้ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ทำให้ค่าของพีเอช ออกมาค่อนข้างสูง และตัวที่ทำให้พีเอชสูงได้แก่เกลือยวซันอ้อยซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นด่างที่สูง ส่วนพีเอชเริ่มต้นค่าต่างๆไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี ย้อม ดังนั้นการทดลองขั้นต่อไปจึงไม่ต้องปรับพีเอช



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของสีดำ (Remazol Black B)



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R)

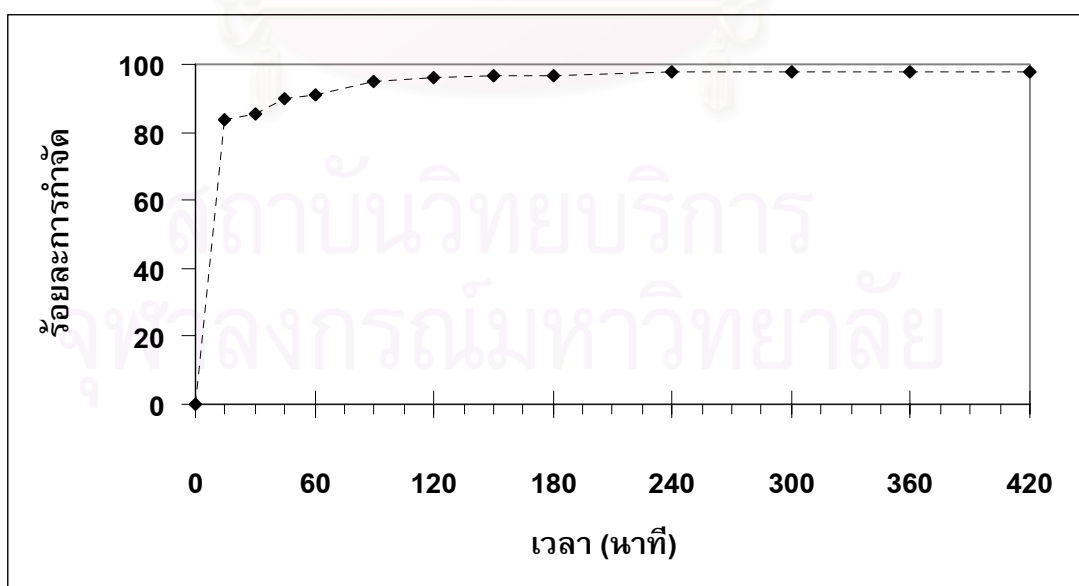


รูปที่ 4.9 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B)

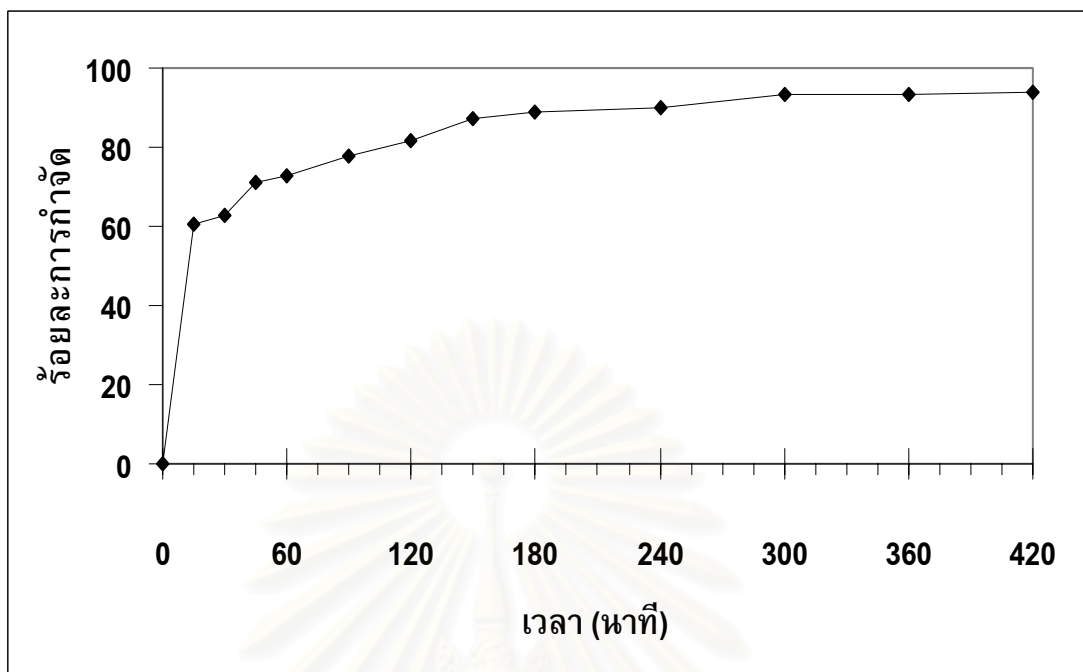
4.2.3 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ

ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 โทนสี โดยจะใช้ความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมที่จากการทดลองที่ 4.1.2 แสดงผลโดยกราฟรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 โดยจะแสดงผลของกราฟในรูปแบบเป็นร้อยละของการกำจัดสีกับเวลา แต่ละกราฟจะแสดงผลของสีย้อมในแต่ละโทนสี และแสดงข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดของถ้ำลอยชานอ้อยเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในภาคผนวก ค ในตารางที่ ค1 ถึง ค3

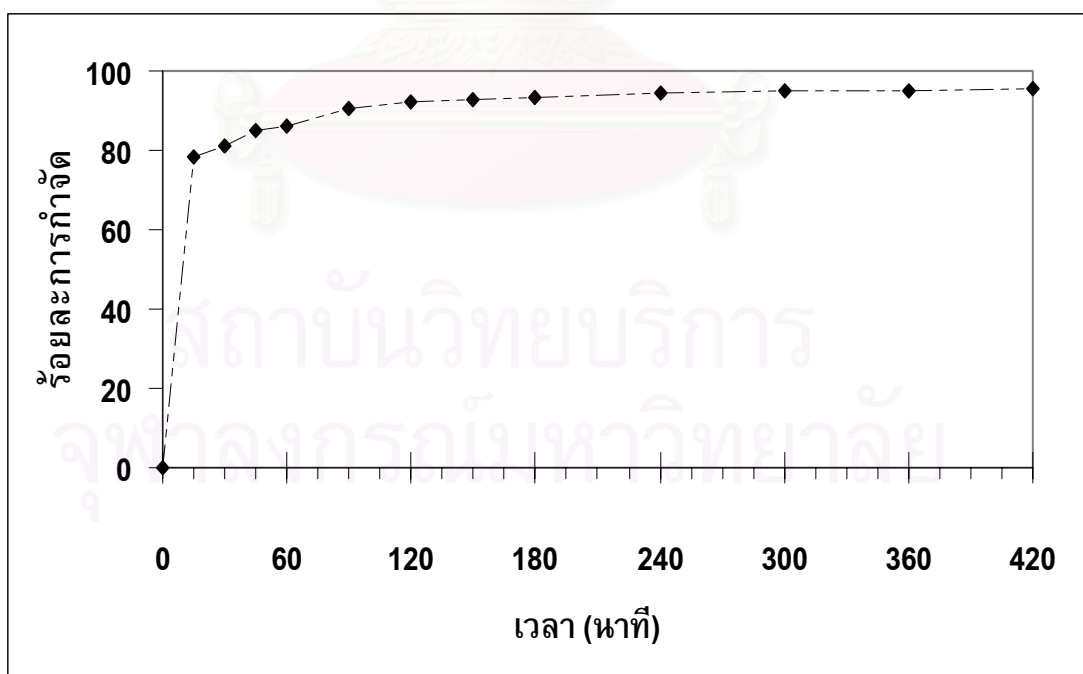
ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมของสีรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ต้องปรับใช้พีเอชเท่ากับ 5.43 ใช้ถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.10 พิจารณาที่ช่วงเวลาต่างๆของการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเล็กน้อยหรือมีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลองที่ 4.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงเวลา 15 นาทีแรกความเข้มข้นลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆช้าลงเมื่อมีเวลามากขึ้น และมีประสิทธิภาพของการกำจัดสูงถึงร้อยละ 83.98 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพของการกำจัดสีก็เพิ่มขึ้นจนเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 240 นาที ผลในรูปแบบร้อยละของการกำจัดสีย้อมปรากฏว่า ถ้ำลอยชานอ้อยมีประสิทธิภาพโดยให้ผลการกำจัดสีย้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 83.98 ถึง 98.00 แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดของสีย้อมโทนสีดำมีค่าการกำจัดร้อยละ 98.00 พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการกำจัดอยู่ช่วงระหว่าง 9.38 ถึง 9.68



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมของสีรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B)



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมของสีย้อมเอกทีฟโทนสีน้ำเงิน
(Remazol Brilliant Blue R)



รูปที่ 4.12 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมของสีย้อมเอกทีฟโทนสีแดง
(Remazol Brilliant Red F3B)

ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมของสีรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ต้องปรับใช้พีเอชเท่ากับ 5.31 ใช้ถ้ำลอยซานอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลาต่างๆของการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเล็กน้อยหรือมีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลองที่ 4.1.1 และประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงเวลา 15 นาทีแรกความเข้มข้นลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆช้าลงเมื่อมีเวลามากขึ้น และมีประสิทธิภาพของการกำจัดสูงถึงร้อยละ 60.71 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพของการกำจัดก็เพิ่มขึ้นจนเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 300 นาที หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาไปเรื่อยๆประสิทธิภาพของการกำจัดก็จะคงที่ ผลในรูปแบบร้อยละของการกำจัดสีย้อมปรากฏว่า ถ้ำลอยซานอ้อยมีประสิทธิภาพโดยให้ผลการกำจัดสีย้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 60.71 ถึง 93.96 แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดของสีย้อมโทนสีดำมีค่าการกำจัดร้อยละ 93.96 พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการกำจัดอยู่ในช่วงระหว่าง 8.76 ถึง 8.96 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่มีค่าค่อนข้างสูงมีแนวโน้มเป็นเบสสูง

ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมของสีรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ต้องปรับใช้พีเอชเท่ากับ 5.59 ใช้ถ้ำลอยซานอ้อย 1 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลาต่างๆของการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเล็กน้อยหรือมีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลองที่ 4.1.1 และประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงเวลา 15 นาทีแรกความเข้มข้นลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆช้าลงเมื่อมีเวลามากขึ้น และมีประสิทธิภาพของการกำจัดสูงถึงร้อยละ 75.52 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพของการกำจัดก็เพิ่มขึ้นจนเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 240 นาที หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาไปเรื่อยๆประสิทธิภาพของการกำจัดก็จะคงที่ ผลในรูปแบบร้อยละของการกำจัดสีย้อมปรากฏว่า ถ้ำลอยซานอ้อยมีประสิทธิภาพโดยให้ผลการกำจัดสีย้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 78.52 ถึง 95.33 แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดของสีย้อมโทนสีแดงมีค่าการกำจัดร้อยละ 95.33 พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการกำจัดอยู่ในช่วงระหว่าง 9.04 ถึง 9.13 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่มีค่าค่อนข้างสูงมีแนวโน้มเป็นเบสสูง

จากผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสีหลังการทดลองพบว่า สีรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B) และ สีรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B) เวลาเหมาะสมเริ่มคงที่ 240 นาที หลังจากเวลา 240 นาที เมื่อเพิ่มเวลาเรื่อยๆประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก แต่ที่เวลาเท่ากันสีรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B) จะมีประสิทธิภาพของการกำจัดดีกว่าสีรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B) และสีรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) เวลาเหมาะสมเริ่มคงที่ 300 นาที หลังจากเวลา 300 นาที เมื่อเพิ่มเวลาขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพของ

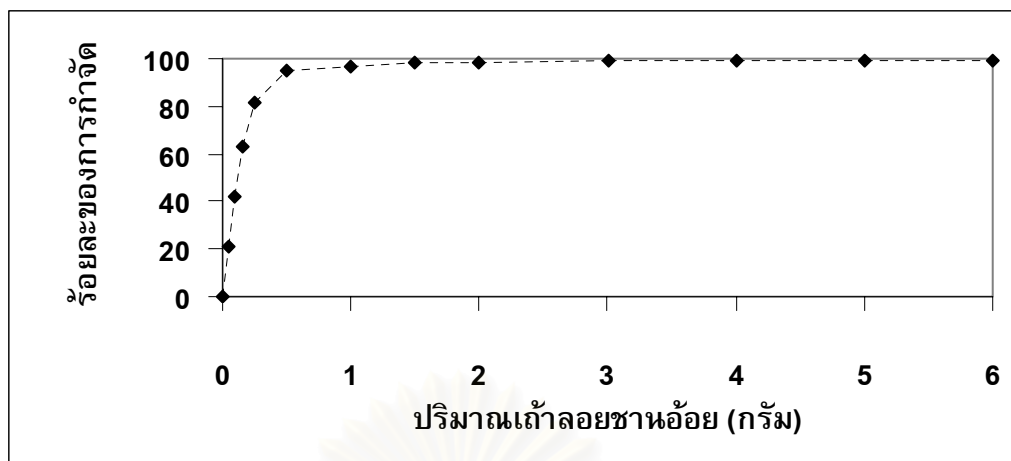
การกำจัดสีย้อมจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากเช่นกัน ถ้าลอยชานอ้อยจะมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B) ได้ดีที่สุด และมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีรีแอกทีฟโทนสีรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) ต่ำที่สุดเมื่อเวลาที่เท่ากัน แต่เมื่อปริมาณถ้าลอยชานอ้อยเพิ่มแนวโน้มที่อาจจะทำให้เวลาลดลง พีเอชที่ได้จากหลังการทดลองของสีรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสีมีแนวโน้มเบสค่อนข้างสูง เนื่องจากถ้าลอยชานอ้อยที่มีความเป็นด่างที่สูง เมื่อถ้าเอาน้ำมาใช้ประโยชน์หรือปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติก็ควรปรับพีเอชให้เป็นกลางเสียก่อน

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าลอยชานอ้อยก็ยังมีคุณสมบัติในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ แม้ว่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมอาจจะไม่ดีเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ และอาจจะใช้เวลาการดูดซับที่นานกว่า แต่ถ้าลอยชานอ้อยเป็นวัสดุที่เศษเหลือไม่มีราคา เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วแอกติเวตเต็ดคาร์บอนผงจะมีราคาแพงกว่ามาก

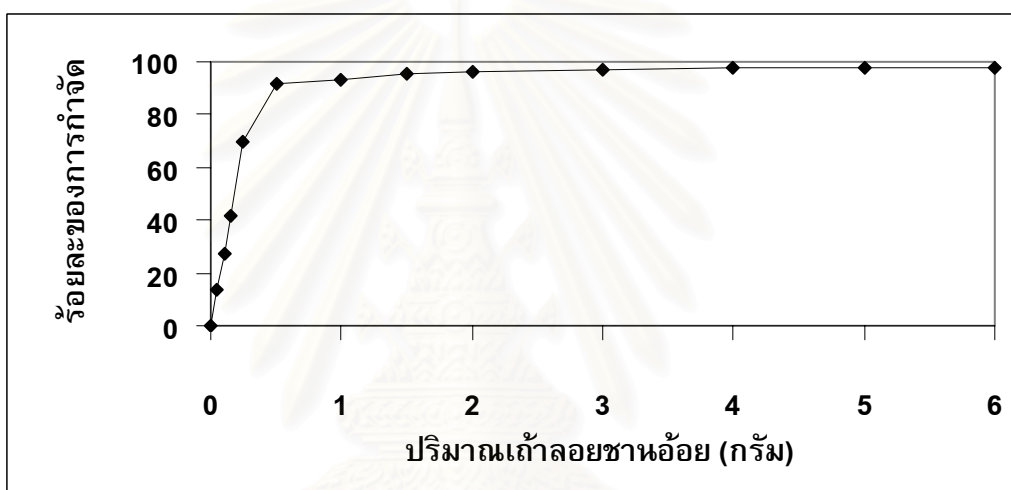
4.2.4 ผลการทดลองปริมาณถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลของการทดลองหาปริมาณถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 โทนสี แสดงผลโดยกราฟรูปที่ 4.13 โดยจะแสดงผลของกราฟในรูปแบบเป็นร้อยละของการกำจัดกับปริมาณถ้าลอยชานอ้อยแต่ละกราฟจะแสดงผลของสีย้อมในแต่ละโทนสี และแสดงข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก ง ในตารางที่ ง1 ถึง ง3

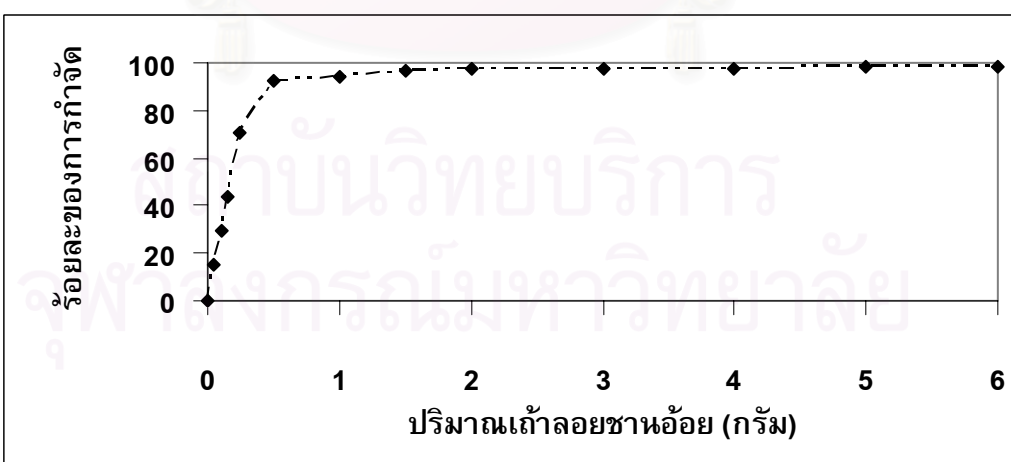
ผลการทดลองหาปริมาณถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 โทนสี ได้แก่สีรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ต้องปรับใช้พีเอชเท่ากับ 5.83 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที ที่เวลา 240 นาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) พิจารณาที่ปริมาณถ้าลอยชานอ้อยที่ต่างๆ พบว่า ถ้าลอยชานอ้อยเริ่มต้นที่ 0.05 กรัม มีประสิทธิภาพของการกำจัดร้อยละ 21.15 เมื่อเพิ่มถ้าลอยชานอ้อยไปเรื่อยๆประสิทธิภาพของการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเช่นกันจนถึงใส่ถ้าลอยชานอ้อย 3 กรัม ประสิทธิภาพของการกำจัดเริ่มคงที่ จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยไม่แตกต่างกันมาก สีรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) ที่ค่าความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ต้องปรับใช้พีเอชเท่ากับ 5.72 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที ที่เวลา 300 นาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.13 (ข) พิจารณาที่ปริมาณถ้าลอยชานอ้อยที่ต่างๆ พบว่า ถ้าลอยชานอ้อยเริ่มต้นที่ 0.05 กรัม มีประสิทธิภาพของการกำจัดร้อยละ 13.95 เมื่อเพิ่มถ้าลอยชานอ้อยไปเรื่อยๆประสิทธิภาพของการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเช่นกันจนถึงใส่ถ้าลอยชานอ้อย 4 กรัม ประสิทธิภาพของการกำจัดเริ่มคงที่ จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยไม่แตกต่างกันมาก และสีรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ต้องปรับใช้พีเอช



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.13 ผลการทดลองหาปริมาณเกลืออลูมิเนียมที่เหมาะสมในการกำจัดสีกำจัดสารละลาย สีย้อมรีแอกทีฟโทน (ก) สีดำ (ข) สีนํ้าเงิน และ(ค) สีแดง

เท่ากับ 5.61 แล้วนำไปขยายที่ความเร็ว 125 รอบต่อวินาที ที่เวลา 240 นาที กราฟแสดงในรูปที่ 4.13(ค) พิจารณาที่ปริมาณแฉ่ำลอยซานอ้อยที่ต่างๆ พบว่า แฉ่ำลอยซานอ้อยเริ่มต้นที่ 0.05 กรัม มีประสิทธิภาพของการกำจัดร้อยละ 14.87 เมื่อเพิ่มแฉ่ำลอยซานอ้อยไปเรื่อยๆ ประสิทธิภาพของการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นกันจนถึงใส่แฉ่ำลอยซานอ้อย 2 กรัม ประสิทธิภาพของการกำจัดเริ่มคงที่ จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยไม่แตกต่างกันมาก ค่าพีเอชหลังการทดลองของโทเนสทั้ง 3 โทเนสมีค่าอยู่ในช่วงพีเอช 8.90-9.55

ผลการทดลองหาปริมาณแฉ่ำลอยซานอ้อยที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 โทเนส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแฉ่ำลอยซานอ้อยไปเรื่อยๆ ประสิทธิภาพของการกำจัดเริ่มคงที่ ทั้ง 3 โทเนสจะใช้ปริมาณแฉ่ำลอยซานอ้อยในปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงร้อยละ 100 โทเนสที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดคือ สีดำ สีแดง และสีน้ำเงิน และความเข้มข้นจะแปรผันตรงกับปริมาณแฉ่ำลอยซานอ้อยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสูงขึ้นอาจใช้ปริมาณแฉ่ำลอยซานอ้อยในปริมาณมากขึ้นด้วยในการกำจัดสีข้อมให้มีประสิทธิภาพสูงเทียบเท่ากับความเข้มข้นเดิมซึ่งจะทำให้เกิดของเสียเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่วนค่าของพีเอชก็มีแนวโน้มที่จะเป็นเบสเช่นเดิม

จากรูปที่ 4.14 สีข้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทเนสได้แก่ สีรีแอกทีฟโทเนสดำ (Remazol Black B) สีรีแอกทีฟโทเนสน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) และสีรีแอกทีฟโทเนสแดง (Remazol Brilliant Red F3B) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) พบว่าหลังการกำจัดสีข้อมจะได้สีออกมาใสดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) ซึ่งไม่เป็นที่น่ารังเกียจและปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้แต่ต้องมีการปรับค่าพีเอชที่มีความเป็นด่างสูงปรับให้เป็นกลางเสียก่อน จึงจะปล่อยออกได้หรือนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบ (ก) สีข้อมก่อนการกำจัด (ข) สีข้อมหลังการกำจัด

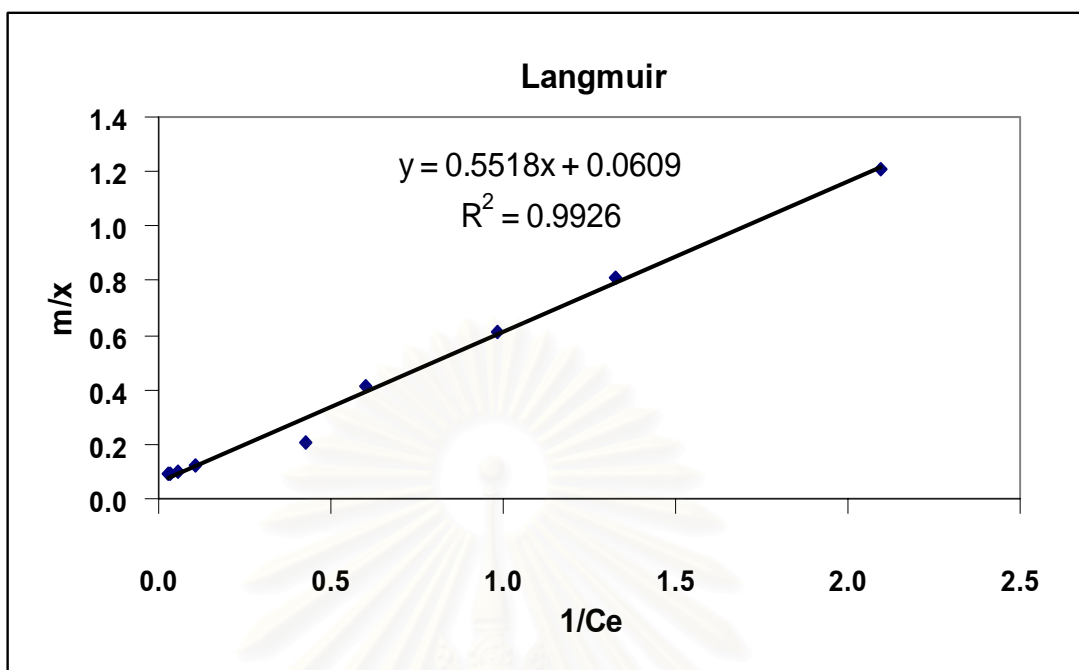
4.2.5 ผลการทดลองศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม

จากผลการทดลองศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสี ได้แก่ สีรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B) สีรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) และสีรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B) ซึ่งจะศึกษาแนวโน้มของการดูดซับ 2 รูปแบบ ได้แก่ ไอโซเทอมของแบบแลงมัวร์และไอโซเทอมของแบบฟรุนดลิช ซึ่งจะแสดงค่าคงที่ไอโซเทอมของแบบแลงมัวร์และไอโซเทอมของแบบฟรุนดลิช ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และค่าสมการของไอโซเทอมแสดงดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.17

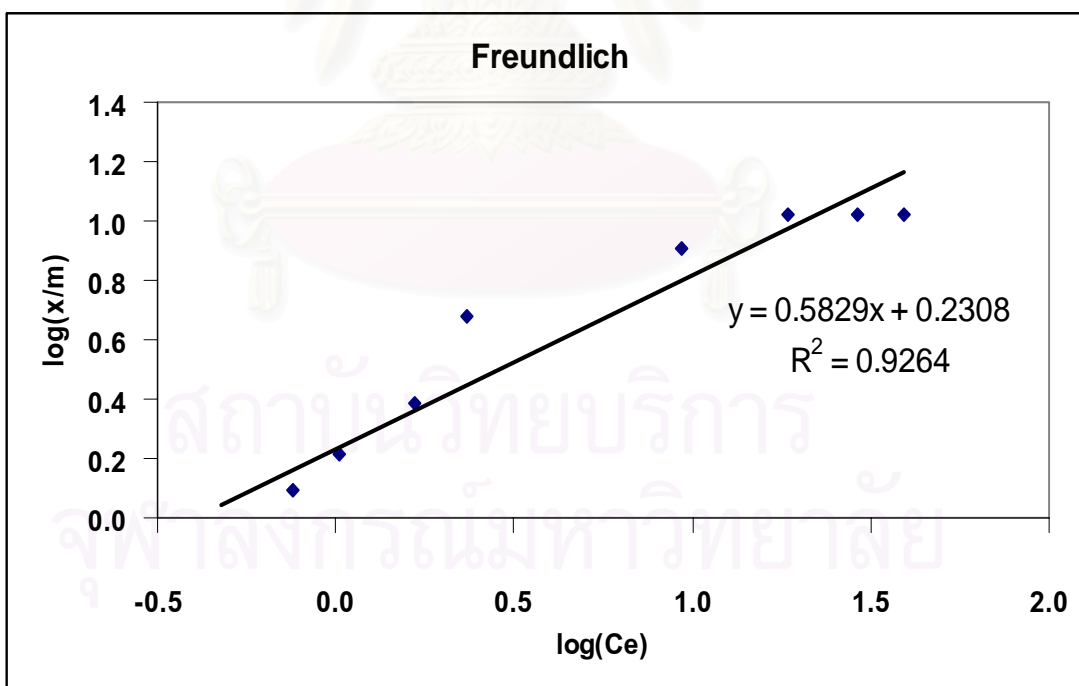
ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ไอโซเทอมของแลงมัวร์และฟรุนดลิชสำหรับการดูดซับสีย้อม 3 โทนสี

โทนสีของ สีย้อมรีแอกทีฟ	ค่าคงที่ของไอโซเทอมแลงมัวร์			ค่าคงที่ของไอโซเทอมฟรุนดลิช		
	Q_{max}	b	R^2	K	n	R^2
โทนสีดำ	16.4204	0.1104	0.9926	1.7014	1.7156	0.9264
โทนสีน้ำเงิน	32.4675	0.0194	0.9062	1.0109	1.7179	0.8334
โทนสีแดง	18.2815	0.0469	0.9657	1.1489	1.7693	0.8798

จากผลการศึกษาหาประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสีย้อมของถ้ำลอยชานอ้อยโดยหาประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสีย้อมทั้งสามโทนสีที่อุณหภูมิห้อง โดยนำค่า R-Square (R^2) มาเปรียบเทียบกันซึ่ง R-Square (R^2) เป็นค่าตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำที่ยอมรับโดยทั่วไป ค่า R-Square (R^2) ที่ใกล้เคียงมากที่สุดจะแสดงผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำมากที่สุด จากผลการทดลองพบว่า ไอโซเทอมของแลงมัวร์และไอโซเทอมของฟรุนดลิช เมื่อนำค่า R-Square (R^2) มาเปรียบเทียบกันดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสีมีแนวโน้มเป็นไปตามไอโซเทอมแบบของแลงมัวร์ซึ่งให้ค่า R-Square (R^2) สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับไอโซเทอมของฟรุนดลิช สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำมีค่า R-Square (R^2) มีแนวโน้มสูงสุดเป็นไปตามไอโซเทอมแบบของแลงมัวร์ รองลงมาคือสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดงและโทนสีน้ำเงิน ตามลำดับ ส่วนความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสีจะพบว่า สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R) มีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมาคือสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B) และโทนสีดำ (Remazol Black B) ตามลำดับ เช่นเดียวกัน ความสามารถในการดูดซับอาจจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวและโครงสร้างของแต่ละโทนสีแสดงดังรูปที่ 3.5 ในการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH) ของถ้ำลอยชานอ้อยกับพันธะในโมเลกุลของสีย้อมรีแอกทีฟ (Ghouti และคณะ, 2003) จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับแต่ละสีมีความแตกต่างกันไป

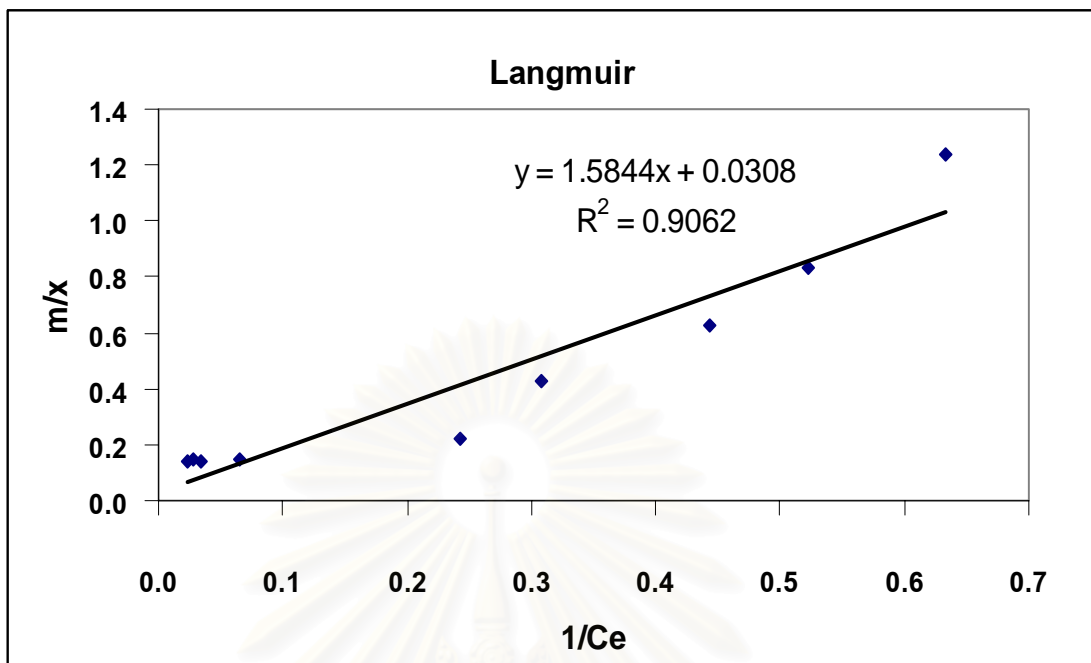


(ก)

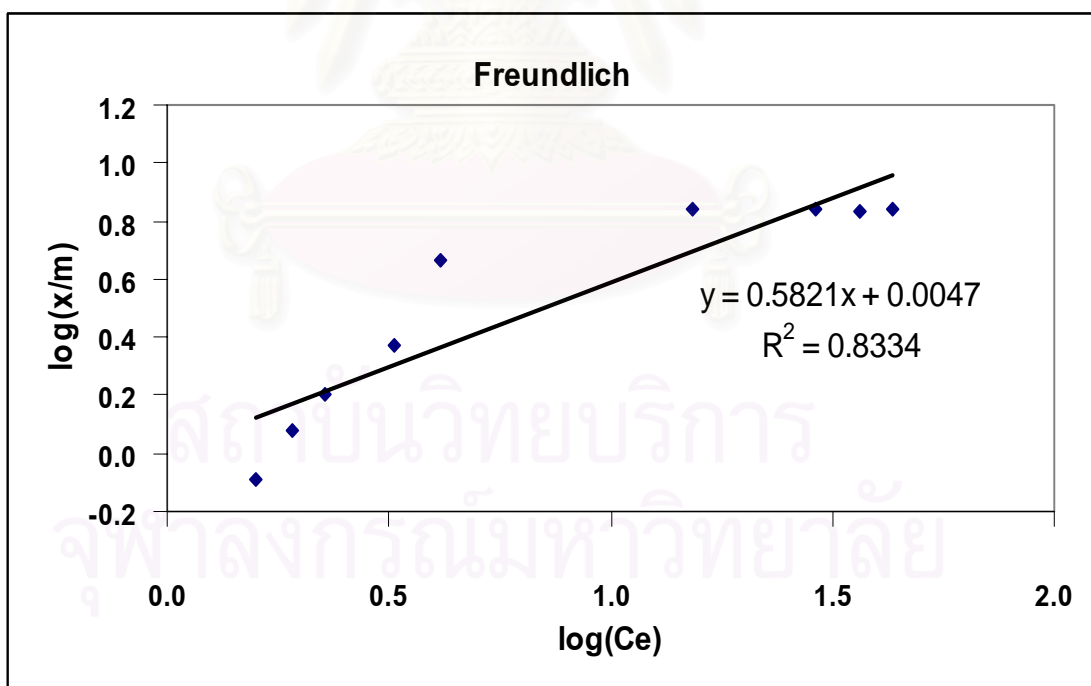


(ข)

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบกราฟไอโซเทอมการดูดซับของ (ก) แลงมัวร์ (ข) ฟรอนด์ลิช ของสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Remazol Black B)

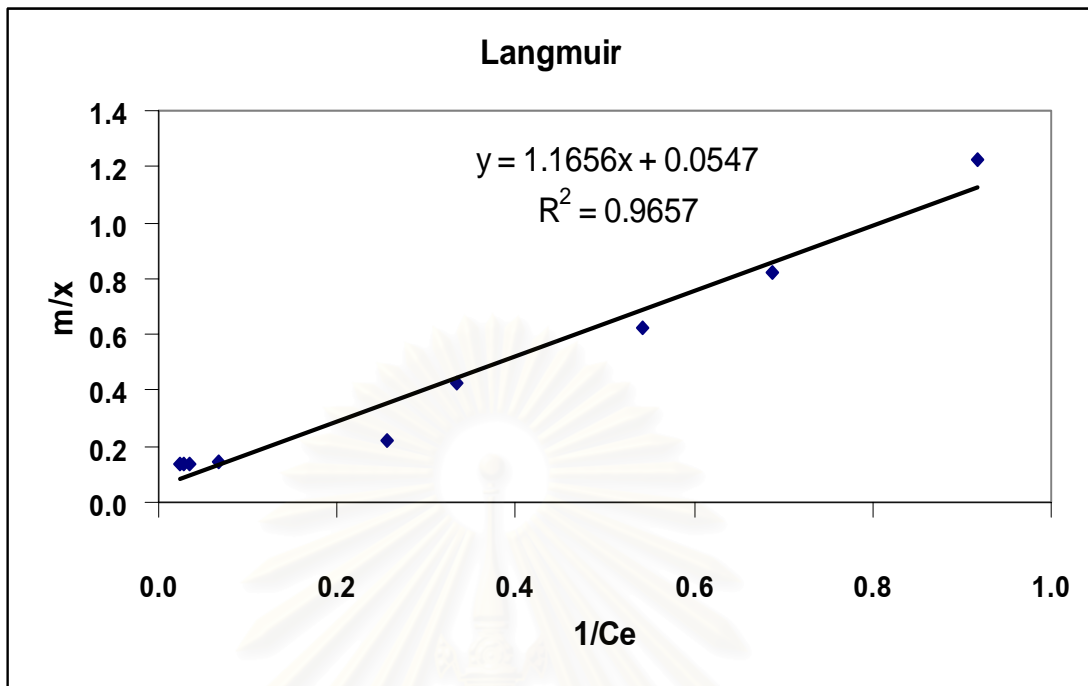


(ก)

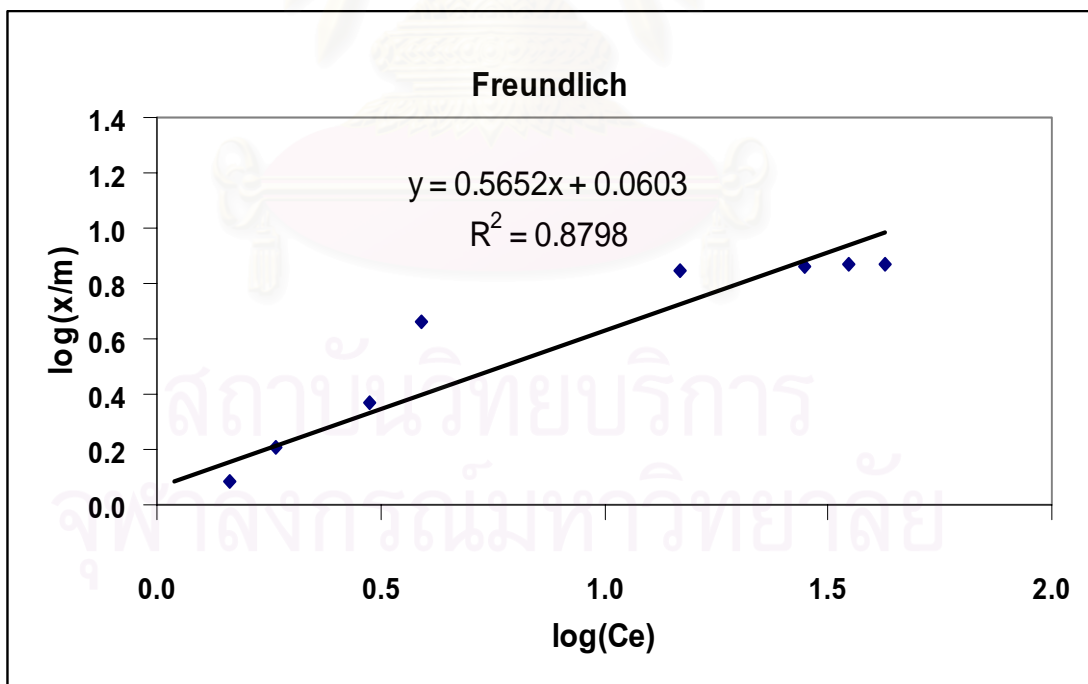


(ข)

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบกราฟไอโซเทอมการดูดซับของ (ก) แลงมัวร์ (ข) ฟรอนด์ลิช ของสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน (Remazol Brilliant Blue R)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบกราฟไอโซเทอมการดูดซับของ (ก) แลงมัวร์ (ข) ฟรอนด์ลิช ของสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง (Remazol Brilliant Red F3B)

4.3 ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

หลังจากผ่านขั้นตอนการดูดซับแล้ว จะทำให้มีของเสียเกิดขึ้นทำให้ต้องกำจัดของเสียที่เกิดจากขั้นตอนการดูดซับของเสียนั้นก็คือ แก้วลอยชานอ้อยที่ใช้กำจัดสีย้อม ซึ่งจะเป็นของเสียของแก้วลอยชานอ้อยที่ใช้กำจัดสีย้อมรวมกันทั้งสามโทนสี แก้วลอยชานอ้อยรวมจะนำไปแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ในการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

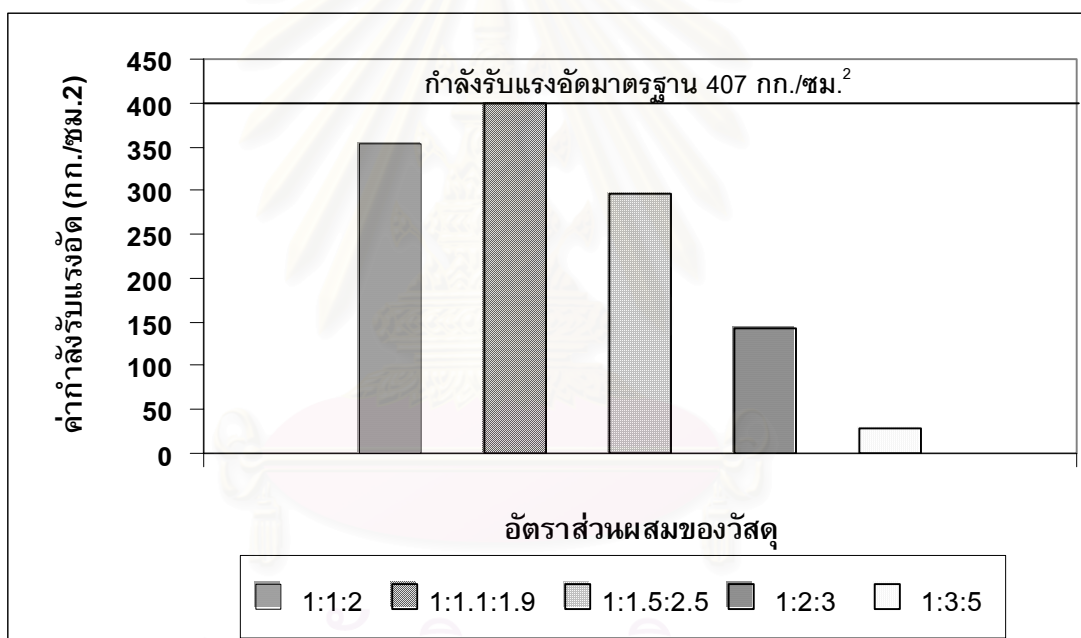
4.3.1 ผลการทดลองศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ผลการทดลองที่ได้ศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ได้แก่ สัดส่วนระหว่างซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด ซึ่งจะให้ได้ใกล้เคียงกับที่ใช้จริงในเชิงอุตสาหกรรม โดยแปรค่าสัดส่วนเป็น 1:1:2 1:1.1:1.9 1:1.5:2.5 1:2:3 และ 1:3:5 โดยคงอัตราส่วนระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบให้อยู่ในช่วง 0.55-0.7 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 และระยะเวลาบ่ม 7 วัน จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.8 และ กราฟแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่ 1:1:2 มีค่ากำลังรับแรงอัดคือ 352.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่ 1:1.1:1.9 มีค่ากำลังรับแรงอัดคือ 399.59 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่ 1:1.5:2.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดคือ 296.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่ 1:2:3 มีค่ากำลังรับแรงอัดคือ 141.37 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ ค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่ 1:3:5 มีค่ากำลังรับแรงอัดคือ 27.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะได้ว่าสัดส่วน 1:1.1:1.9 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันแต่ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม (407 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น) และสามารถเทลงแบบหล่อได้ จึงเลือกค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่ 1:1.1:1.9 เป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปทำคอนกรีตในการทดลองต่อไป

ผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อสัดส่วนของทรายต่อหินเกล็ดเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลง จะสังเกตเห็นได้ว่าสัดส่วนของทรายต่อหินเกล็ดที่มากจะมีลักษณะค่อนข้างแห้งจนยากต่อการเทลงแบบหล่อ ทำให้คอนกรีตในสัดส่วนผสมที่มากมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำและมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก (407 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น) ที่กำหนดมาตรฐานโดยกระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 คอนกรีตและระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆ

ซีเมนต์:ทราย:หินเกล็ด	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ซม. ²)	ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)
1:1:2	7	352.00	34.59
1:1.1:1.9	7	399.59	39.27
1:1.5:2.5	7	296.31	29.12
1:2:3	7	141.37	13.89
1:3:5	7	27.20	2.67



รูปที่ 4.18 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่แปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด

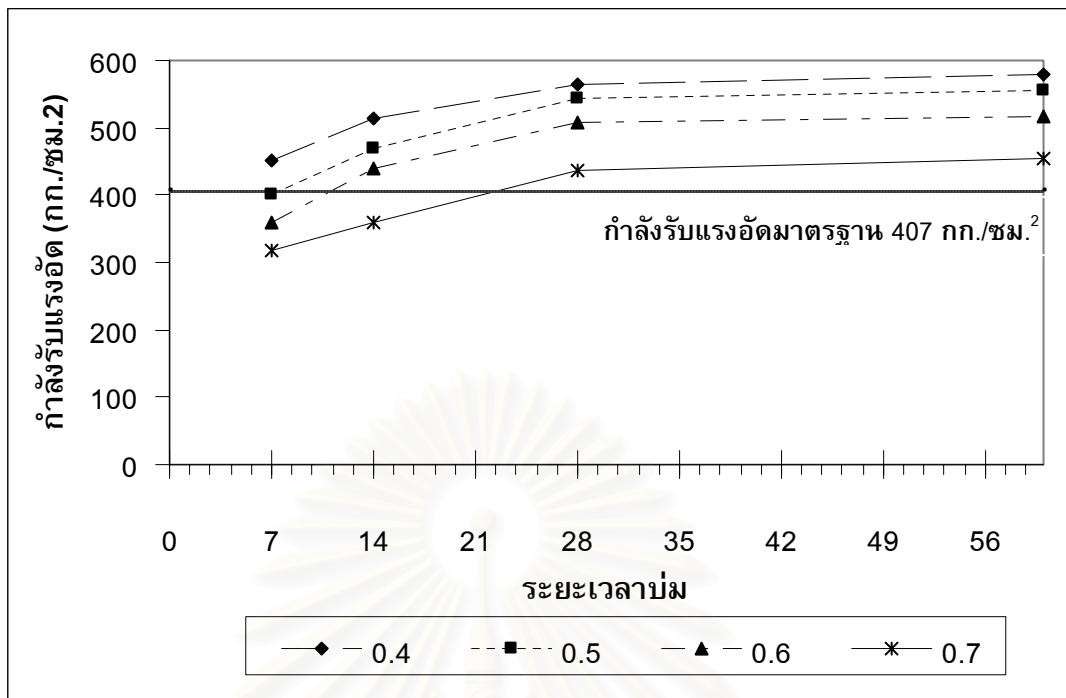
4.3.2 ศึกษาหาอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และการแปรค่าระยะเวลาบ่มที่เหมาะสม

จากการศึกษาสภาวะอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมในการทดลอง ขั้นต้นแล้วจะได้สัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่เหมาะสมคือ 1:1.1:1.9 มาใช้ในการทดลองนี้ซึ่งจะแปรค่า 3 ค่า ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อย และระยะเวลาบ่ม แล้วนำมาทดลองในแบบหล่อขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

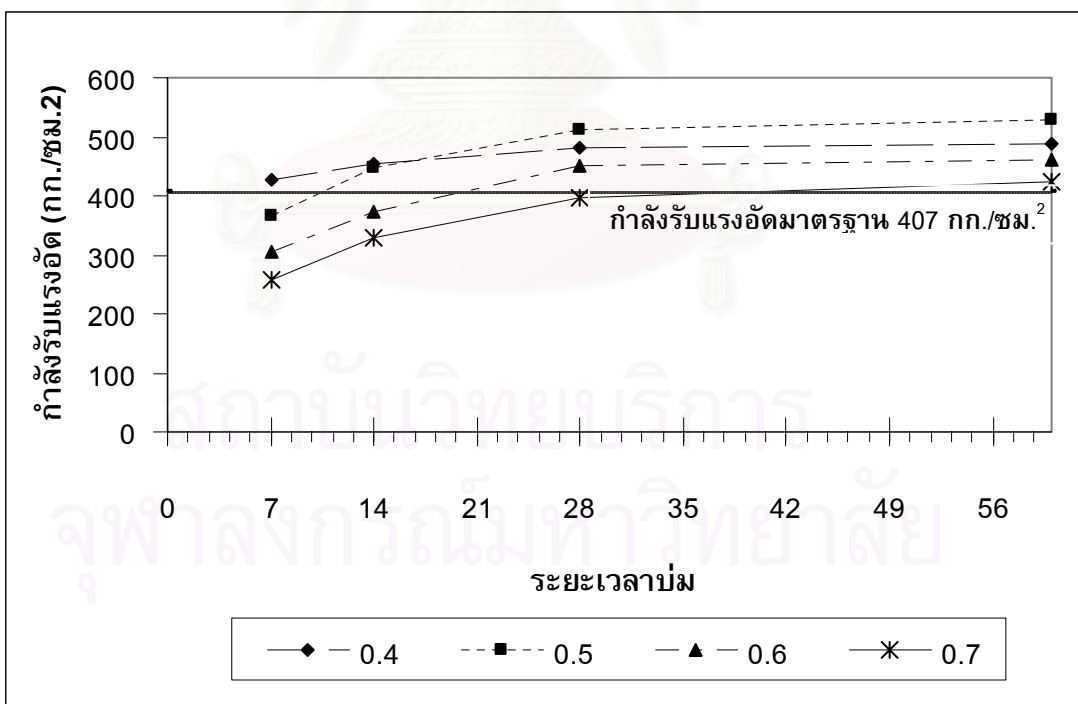
ผลการทดลองหาอัตราส่วนของแก๊สลอยซานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และการแปรค่าระยะเวลาบ่มที่เหมาะสม จะได้ผลดังแสดงกราฟรูปที่ 4.19 ถึง 4.26 และแสดงผลข้อมูลในภาคผนวก จ และภาคผนวก ฉ

จากผลการทดลองดังแสดงกราฟรูปที่ 4.19 ที่อัตราส่วนผสมของแก๊สลอยซานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ที่ไม่ได้ใส่แก๊สลอยซานอ้อย แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ค่า 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 และ แปรค่าระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 60 วัน พบว่าเมื่อไม่มีการแทนที่ซีเมนต์ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.4 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 452.60 515.12 564.05 และ 580.36 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม (407 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น) ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 7 วัน ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 399.59 470.27 543.66 และ 554.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม (407 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น) ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 14 วัน ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.6 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 360.18 441.05 508.33 และ 517.84 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม (407 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น) ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 14 วัน ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.7 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 316.68 360.18 436.29 และ 455.32 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม (407 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น) ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 28 วัน และพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีค่าต่ำให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีค่าสูงตามค่ากล่าวของ (ประณต กุลประสูตร, 2541) ได้กล่าวไว้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

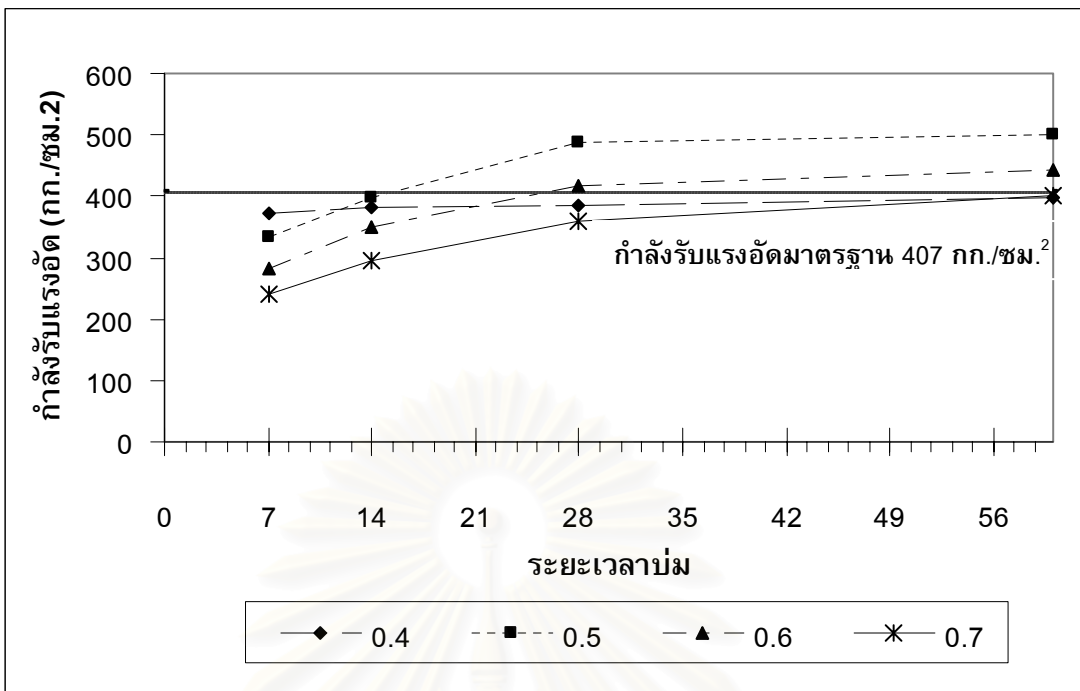
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



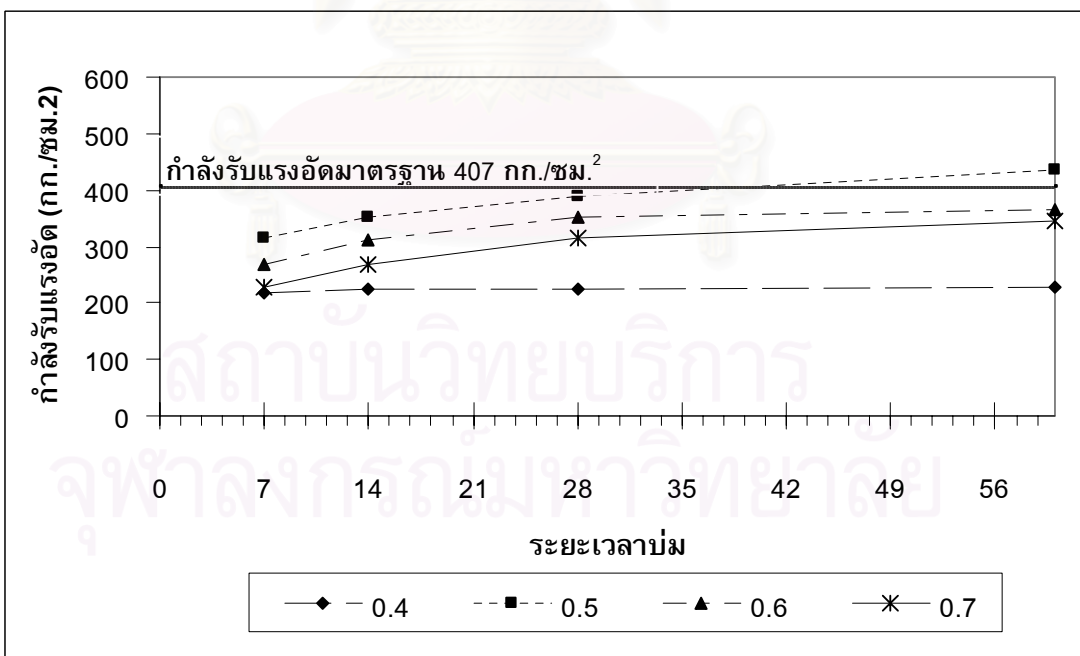
รูปที่ 4.19 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ ที่ไม่ได้ใส่ถ้ำลอยขานอ้อย



รูปที่ 4.20 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ ใส่ถ้ำลอยขานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

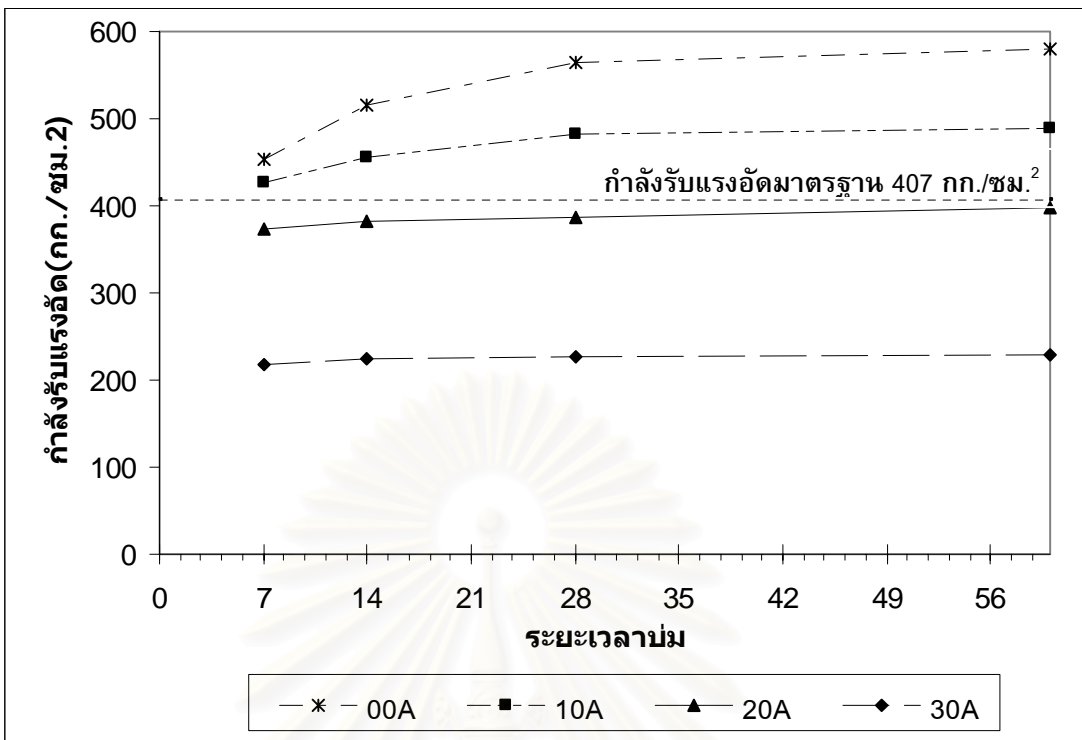


รูปที่ 4.21 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ ใส่แฉ่ำลอยชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

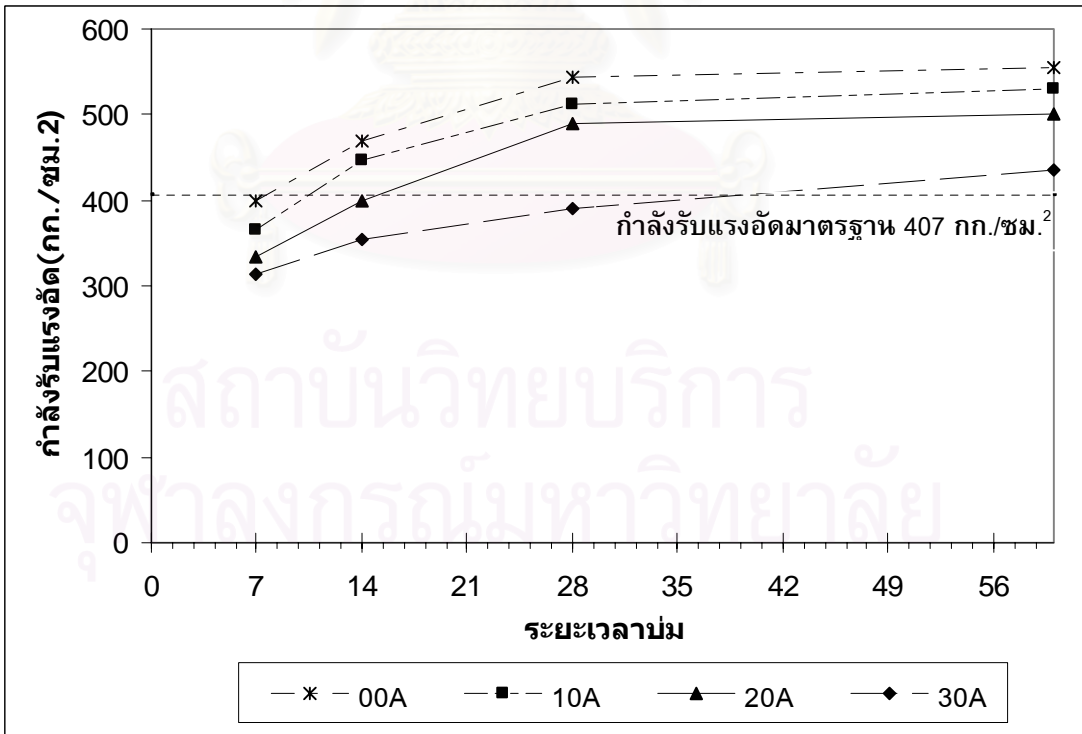


รูปที่ 4.22 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ ใส่แฉ่ำลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

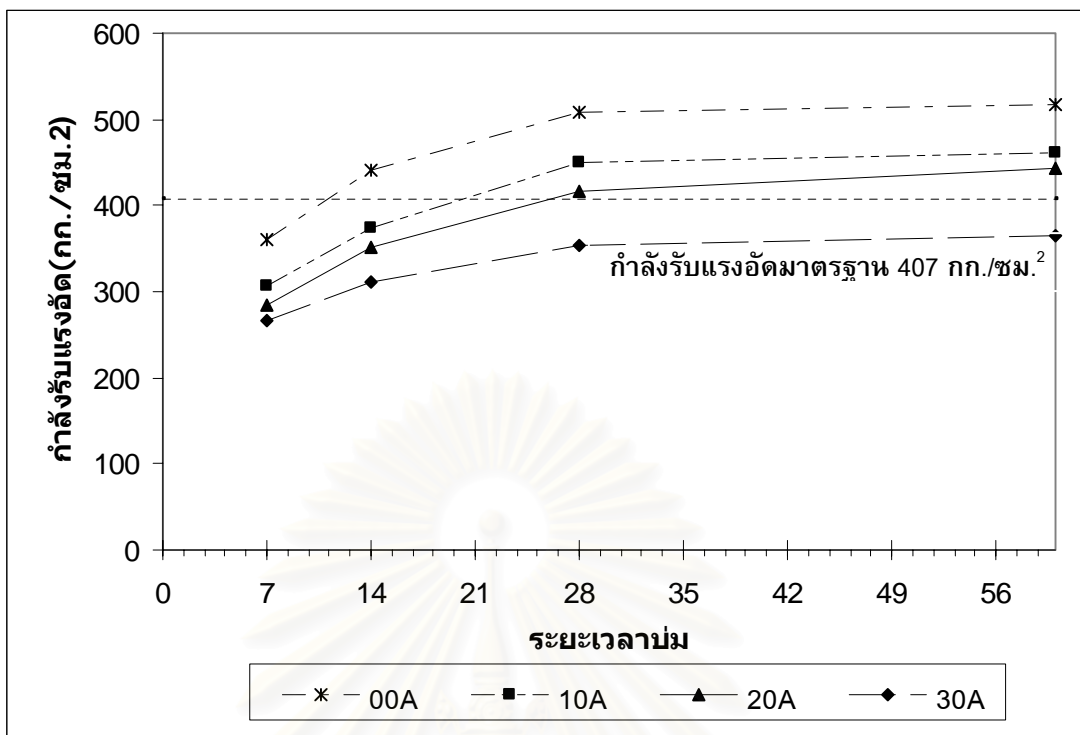
จากผลการทดลองดังแสดงกราฟรูปที่ 4.20 ที่อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ค่า 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 แปรค่าระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 60 วัน พบว่าเมื่อมีการแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อยที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 426.78 455.32 481.14 และ 489.30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 94.3 88.4 85.3 และ 84.3 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่ทว่าสัดส่วนผสมลักษณะค่อนข้างที่จะแห้งแต่ไม่มากสามารถก่อตัวได้เนื่องจากมีน้ำที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 365.75 445.80 512.40 และ 530.07 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 91.5 94.8 94.2 และ 95.6 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 14 วัน แต่เมื่อเปรียบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 กับ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 อาจเป็นได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่เพียงพอจึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดไม่สูงขึ้นมาก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 305.81 373.09 449.88 และ 462.11 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 84.9 84.6 88.5 และ 89.2 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 256.88 330.28 398.23 และ 425.42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 81.1 91.7 91.3 และ 93.4 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 60 วัน จากการทดลองอาจสรุปได้ว่า การแทนที่ของ เถ้าลอยชานอ้อยที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ทั้ง 4 ค่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 เพราะเมื่อดูลักษณะสัดส่วนผสมไม่แห้งจนเกินไปสามารถนำไปเทลงแบบหล่อได้ มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 14 วัน ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 และ 0.7 ปริมาณน้ำมากเกินไปทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำ และผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ระยะเวลาบ่มที่นาน



หมายเหตุ : A คือ เปอร์เซ็นต์การแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อย
 รูปที่ 4.23 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยและระยะเวลาปมค่าต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4

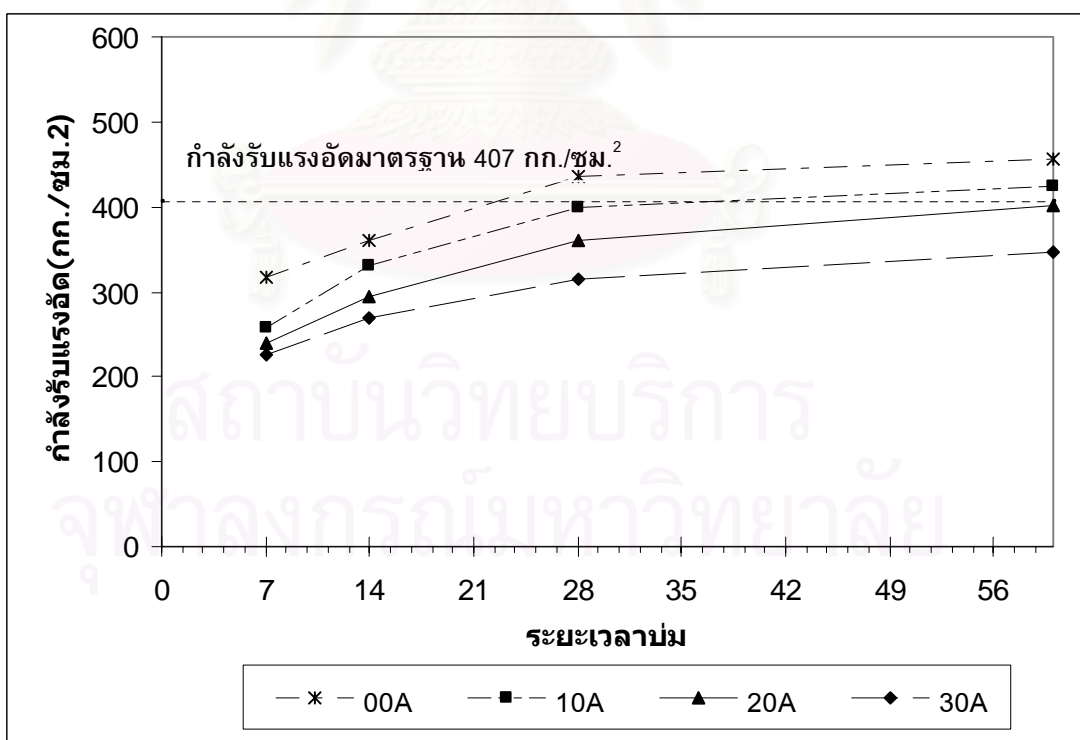


หมายเหตุ : A คือ เปอร์เซ็นต์การแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อย
 รูปที่ 4.24 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยและระยะเวลาปมค่าต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5



หมายเหตุ : A คือ เปอร์เซนต์การแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อย

รูปที่ 4.25 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยและระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6



หมายเหตุ : A คือ เปอร์เซนต์การแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อย

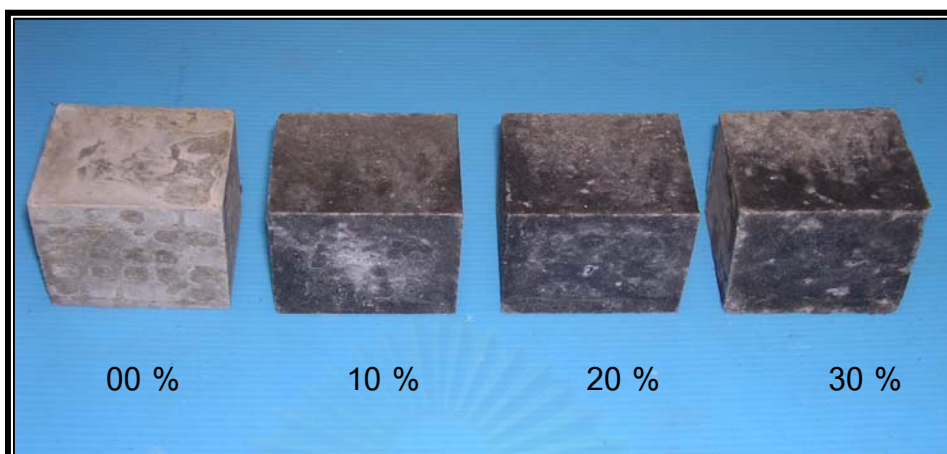
รูปที่ 4.26 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยและระยะเวลาบ่มค่าต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7

จากผลการทดลองดังแสดงกราฟรูปที่ 4.21 ที่อัตราส่วนผสมของแกลลวยที่ถูกใช้ในการ ดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ค่า 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 และ แปรค่าระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 60 วัน พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 กำลังรับแรงอัดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ระยะเวลา บ่มใดๆ เนื่องจากปริมาณน้ำที่จะใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และตัวอย่างที่ผสมได้นั้นจะมี ลักษณะ ร่วน แห้ง เกาะตัวกันไม่ดี ทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ค่า กำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 334.35 398.23 489.30 และ 500.17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 83.7 84.7 90.0 และ 90.2 ที่ ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 283.38 350.66 415.90 และ 443.09 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 78.7 79.5 81.8 และ 85.6 ที่ ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 239.21 294.60 360.86 และ 402.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 75.5 81.8 82.7 และ 88.4 ที่ ระยะเวลาบ่มใดๆ กำลังรับแรงอัดค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวง อุตสาหกรรมเนื่องจากปริมาณแกลลวยชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีปริมาณมาก จนเกินไปทำให้สัดส่วนไปตกตะกอนอยู่ข้างล่างก่อนลูกบาศก์ สัดส่วนผสมมีการกระจายตัวกัน ไม่ทั่วทั้งก่อนลูกบาศก์ทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าค่อนข้างต่ำ จากการทดลองสรุปได้ว่า อัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์มากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าค่อนข้างต่ำ และการแทนที่ ของแกลลวยชานอ้อยที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ทั้ง 4 ค่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 เพราะอัตราส่วนน้ำ ต่อซีเมนต์ 0.4 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 ค่ากำลังรับแรงอัดค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 มีกำลังรับแรงอัด น้อยกว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5

จากผลการทดลองดังแสดงกราฟรูปที่ 4.22 ที่อัตราส่วนผสมของแกลลวยที่ถูกใช้ในการ ดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ค่า 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 และ แปรค่าระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 60 วัน พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 0.6 และ 0.7 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวง อุตสาหกรรม ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ค่ากำลังรับแรงอัดมีอัตราการพัฒนาเพิ่มขึ้น เรื่อยๆ มีค่าเท่ากับ 313.97 353.38 390.08 และ 434.93 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 60 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่

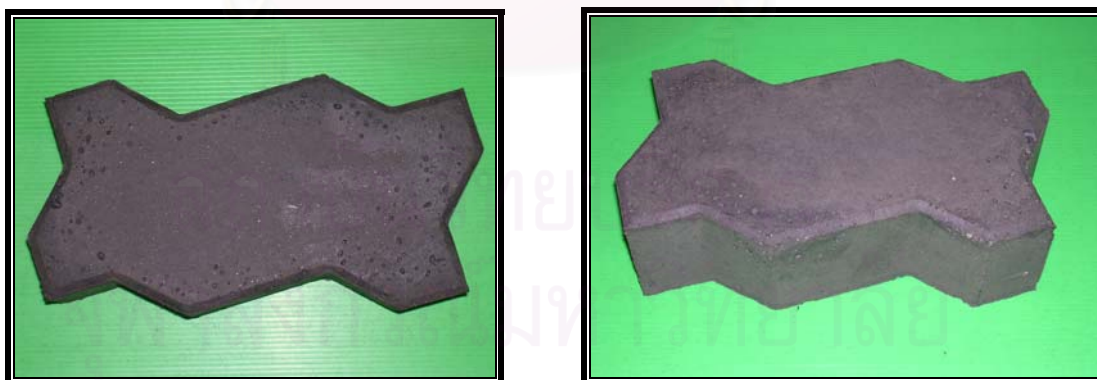
นานมาก ในทางอุตสาหกรรมจริงระยะเวลาที่นานเกินไปสินค้าจะขายออกสู่ตลาดไม่ทันเพราะความต้องการสินค้ามีสูง ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 และ 0.7 สัดส่วนผสมที่ผสมมีลักษณะเป็นน้ำเหลวมาก ถึงแม้จะมีน้ำมากพอให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ตาม แต่ปริมาณน้ำที่มากเกินไปก็ทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีตได้จึงทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงได้ จากการทดลองสรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ไม่มีสัดส่วนของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ได้เลย เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยมีมากเกินไป

จากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดพบว่า อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ร้อยละในค่าต่างๆ โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์จะแปรผกผันกับค่ากำลังรับแรงอัด เนื่องจากการลดสารประกอบที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากการทดลองเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 ดังแสดงกราฟรูปที่ 4.23 ถึง 4.26 เมื่อใช้เถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น ปริมาณน้ำที่ต้องการมีค่าค่อนข้างที่จะสูงขึ้น เนื่องมาจากสาเหตุที่เถ้าลอยชานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนที่ค่อนข้างสูง จากตารางที่ 4.1 ปริมาณคาร์บอนของเถ้าลอยชานอ้อยมีสูงถึงร้อยละ 33.17 ซึ่งคาร์บอนจะดูดน้ำบางส่วนไปเมื่อผสมกันแล้ว ทำให้มีความต้องการน้ำมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปกติ สังเกตเห็นได้จากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.4 เมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 20 และ 30 แสดงจากกราฟรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 และแสดงกราฟรูปที่ 4.23 ถึง 4.26 กราฟกำลังรับแรงอัดจะเริ่มมีค่าลดลง เมื่อการแทนที่เถ้าลอยชานอ้อยในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ลักษณะของส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.4 มีลักษณะร่วนแห้ง เกาะตัวกันไม่ดี ผิวหน้าไม่เรียบ ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.6 และ 0.7 มีปริมาณน้ำที่ส่วนผสมมีลักษณะเหลวค่อนข้างมาก ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 0.5 และมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูง ลักษณะผิวของก้อนตัวอย่างเรียบไม่ค่อยมีรูพรุน เถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้แทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 51.96 มีปริมาณค่อนข้างสูง แต่อยู่ในรูปของควอตซ์ (Quartz) (กฤษณ์ จารุทะวีย์, 2545) จึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อย สรุปในการเลือกอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ 0.5 และระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมที่ 28 วัน เนื่องจากการกำจัดของเสียให้ได้ปริมาณมากๆ จึงใช้วัสดุของเสียที่ใช้ดูดซับสีย้อมในปริมาณที่มากที่สุดต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ลักษณะของก้อนตัวอย่างมีผิวหน้าเรียบ ส่วนผสมไม่ร่วนแห้งเกินไปสามารถเทลงไปในแบบหล่อก้อนตัวอย่างได้ ส่วนระยะเวลาที่ใช้ก่อนนำไปจำหน่ายไม่นานมากเกินไป



รูปที่ 4.27 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแปรค่าอัตราส่วนเถ้าลอยชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับ สีย้อมต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5

เมื่อหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตโดยแทนที่ซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ซึ่งในงานวิจัย นี้เลือกใช้แบบบล็อกประสานปูพื้นที่มีชื่อเรียกทางการค้าว่า “คดกรีซ” ซึ่งมีความกว้าง 11.25 เซนติเมตร ความยาว 22.5 เซนติเมตร ความหนา 6 เซนติเมตร มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 3.20 กิโลกรัม แสดงดังในรูปที่ 4.24 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปคดกรีซนี้มีค่ากำลังรับแรงอัด 501.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สูงกว่าก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ที่มีสัดส่วนเดียวกัน



รูปที่ 4.28 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซโดยอัตราส่วนเถ้าลอยชานอ้อยต่อ ซีเมนต์ร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

4.3.3 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริช

ปัจจุบันการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีการผลิตกันทั่วไปตามบริษัทต่างๆ ซึ่งมีลักษณะหลากหลายรูปแบบ และสีของผิวหน้าต่างๆหลายสีซึ่งราคาก็แตกต่างกันออกไป แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริชสีเทาซึ่งมีราคาในตามตลาดอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผลิตก้อนละ 5.00 บาท (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่มและการขนส่ง) คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริชนำไปใช้ประโยชน์สำหรับปูทางเท้า ลานจอดรถ ลานอเนกประสงค์ พื้นทีลานภายนอกอาคาร หรือพื้นที่บ้านพักอาศัย เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงกรณีการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นภายในบริเวณที่ใกล้กับโรงงานผลิตน้ำตาล จังหวัดสระบุรี ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ถ้าวางโรงงานอ้อยซึ่งค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริชทั้งหมด มีดังนี้

- วัสดุที่มีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริช ได้แก่
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้างใช้ผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซึ่งราคานี้รวมค่าขนส่งแล้ว
 - ทราย ชื่อในแหล่งที่ใกล้กับโรงงานผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซึ่งราคานี้รวมค่าขนส่งแล้ว
 - หินเกล็ด ชื่อในแหล่งที่ใกล้กับโรงงานผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซึ่งราคานี้รวมค่าขนส่งแล้ว
 - น้ำจะใช้ น้ำประปาซึ่งราคาคิดตามการประปานครหลวง
 - ถ้าวางโรงงานอ้อยเป็นวัสดุที่ไม่มีประโยชน์นำไปทิ้งจึงไม่มีค่าใช้จ่ายของวัสดุและไม่มีค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ถ้าวางโรงงานอ้อยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- ค่าใช้จ่ายของวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริช 1 ก้อน แสดง

ดังตารางที่ 4.9

- เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริชมีค่าใช้จ่าย ดังนี้
- เครื่องผสมคอนกรีตคิดค่าใช้จ่ายตามกำลังวัตต์ของเครื่อง โดยคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง
 - ตู้อบใช้อบถ้าวางโรงงานอ้อยคิดค่าใช้จ่ายตามกำลังวัตต์ของเครื่อง โดยคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง
 - เครื่องคัดขนาดใช้คัดขนาดถ้าวางโรงงานอ้อยให้ได้ขนาดตามต้องการ คิดค่าใช้จ่ายตามกำลังวัตต์ของเครื่อง โดยคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง

การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซ ตกราคาก่อนละ 3.34 บาท การลดต้นทุนของวัตถุดิบมีสูงเพราะว่ามีการใช้วัตถุดิบที่เหลือทิ้งที่ไม่เป็นอันตรายมาใช้ในการแทนที่ซีเมนต์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาค่อนข้างสูงมาก การลงทุนใช้วัตถุดิบที่ไม่มีราคาอาจจะคุ้มก็จริงแต่จะมีค่าใช้จ่ายในเรื่องไฟฟ้าของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงกว่าในการผลิตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนๆ แต่ถ้าคิดรวมเกี่ยวกับการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นที่ไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงคุ้มที่จะนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งได้ทั้งผลิตภัณฑ์บล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซแล้วยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมอีก และยังลดของเสียที่เกิดขึ้นได้อีก

ตารางที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายของวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซ 1 ก้อน

วัสดุที่ใช้				คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซ	
ส่วนประกอบ	ราคา (บาท/หน่วย)	น้ำหนัก/ หน่วย (กก.)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	2,320 บาท/ตัน	1,000 กก.	2.32	0.640	1.485
ทราย	275 บาท/ลบ.ม.	2,650 กก.	0.104	0.880	0.092
หินเกล็ด	250 บาท/ลบ.ม.	2,700 กก.	0.093	1.520	0.141
น้ำ	15 บาท/หน่วย	1,000 กก.	0.015	0.424	0.006
เถ้าลอยชานอ้อย	-	-	-	0.160	-
รวมค่าใช้จ่าย	-	-	-	-	1.72

หมายเหตุ : ข้อมูลจากกรมการค้าภายในราคาวัสดุเป็นราคา ณ เดือนธันวาคม พ.ศ.2546

การคิดค่าใช้จ่ายของเครื่องมือในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซ

ข้อมูลพื้นฐาน

- ค่าไฟฟ้าคิดราคาเฉลี่ย 3 บาทต่อหน่วย (อ้างอิงข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง)
- กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์

เครื่องผสม	0.75	กิโลวัตต์
ตุ้บ	1.5	กิโลวัตต์
เครื่องคัดขนาด	0.3	กิโลวัตต์

การคิดราคาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยกิโลกรัม

- เครื่องผสม $(0.75 \text{ กิโลวัตต์}) \times (4/60 \text{ ชั่วโมง}) \times (3 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง}) \times (1/3.2 \text{ ครั้งต่อกิโลกรัม}) = 0.047 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$

- ตู้อบ $(1.0 \text{ กิโลวัตต์}) \times (3 \text{ ชั่วโมง}) \times (3 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง}) \times (1/1 \text{ ครั้งต่อกิโลกรัม}) = 9 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$
- เครื่องคัตขนาด $(0.3 \text{ กิโลวัตต์}) \times (1 \text{ ชั่วโมง}) \times (3 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง}) \times (1/5 \text{ ครั้งต่อกิโลกรัม}) = 0.18 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$

การคิดราคาค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซ

- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซมีน้ำหนักประมาณ 3.2 กิโลกรัม
- ค่าใช้จ่ายต่อก้อนของเครื่องผสม $= (0.047 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}) \times (3.2 \text{ กิโลกรัม}) = 0.15 \text{ บาทต่อก้อน}$
- ค่าใช้จ่ายต่อก้อนของตู้อบ $= (9 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}) \times (0.16 \text{ กิโลกรัม}) = 1.44 \text{ บาทต่อก้อน}$
- ค่าใช้จ่ายต่อก้อนของเครื่องคัตขนาด $= (0.18 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}) \times (0.16 \text{ กิโลกรัม}) = 0.03 \text{ บาทต่อก้อน}$

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกรีซ 1 ก้อน

$$\begin{aligned}
 &= \text{ค่าใช้จ่ายของวัสดุ} + \text{ค่าใช้จ่ายของเครื่องผสม} + \text{ค่าใช้จ่ายของตู้อบ} + \text{ค่าใช้จ่ายของเครื่องคัตขนาด} \\
 &= 1.72 + 0.15 + 1.44 + 0.03 \\
 &= 3.34 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

การจัดการเถาขานอ้อยซึ่งมีอยู่จำนวนมาก โรงงานผลิตน้ำตาล จังหวัดสระบุรี ได้ทำการจัดการเถาขานอ้อยโดยวิธีการนำไปถมที่ การนำไปถมที่นั้นอาจทำให้เกิดปัญหาการชะเอาเถาขานอ้อยซึ่งมีความเป็นต่างสูงลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ แต่ในการจัดการนี้จะมีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้น ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการขนส่งเถาขานอ้อยไปถมที่ ค่าใช้จ่ายของรถตัก เป็นต้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายนี้ลง งานวิจัยนี้ได้นำเอาเถาขานอ้อยมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับสีย้อมและนำมาผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น แม้ว่าใช้ในปริมาณไม่มากเมื่อเทียบกับปริมาณเถาขานอ้อยทั้งหมด แต่ก็ลดปริมาณของเถาขานอ้อยและค่าใช้จ่ายการจัดการลงได้บ้าง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางในการใช้ถั่วลอยชานอ้อยมาบำบัดน้ำเสียสีย้อมแล้วจึงนำไปผลิตคอนกรีตบล็อก การวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการดูดซับ และขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ขั้นตอนการดูดซับ

1.1 จากผลการทดลองหาเวลาเข้าสู่สมดุลของสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสี พบว่ามีเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่แตกต่างกัน โดยสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำกับสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดงเข้าสู่สมดุลที่เวลา 240 นาที และสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงินเข้าสู่สมดุลที่เวลา 300 นาที

1.2 จากผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมของสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสี จากการทดลองพบว่า พีเอชเริ่มต้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมทั้ง 3 โทนสี ความเข้มข้นที่มีค่าน้อยจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าความเข้มข้นที่มีค่ามาก หลังจากการทดลองค่าพีเอชจะมีแนวโน้มที่ค่อนข้างเป็นเบสสูง

1.3 จากผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสี หลังการทดลองพบว่า เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำกับสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดงได้เวลาที่เหมาะสม 240 นาที ส่วนสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดงได้เวลาที่เหมาะสม 300 นาที ฉะนั้นถั่วลอยชานอ้อยก็ยังมีสมบัติในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมอาจจะไม่ดีเท่าแอกติเวทเต็ดคาร์บอนผง และอาจจะใช้เวลาการดูดซับที่นานกว่า แต่ถั่วลอยชานอ้อยเป็นวัสดุที่เศษเหลือไม่มีราคา เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วแอกติเวทเต็ดคาร์บอนผงจะมีราคาที่แพงกว่ามาก

1.4 จากผลการทดลองหาปริมาณถั่วลอยชานอ้อยที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 โทนสี พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณถั่วลอยชานอ้อยไปเรื่อยๆ ประสิทธิภาพของการกำจัดเริ่มคงที่ ทั้ง 3 โทนสีจะใช้ปริมาณของถั่วลอยชานอ้อยในปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกัน คือ สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำใช้ปริมาณถั่วลอยชานอ้อยในปริมาณที่เหมาะสม 3 กรัม สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงินใช้ปริมาณถั่วลอยชานอ้อยในปริมาณที่เหมาะสม 4 กรัม และสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดงใช้ปริมาณถั่วลอยชานอ้อยในปริมาณที่เหมาะสม 2 กรัม ความเข้มข้นจะแปรผันตรงกับปริมาณถั่วลอยชานอ้อย ส่วนค่าของพีเอชก็มีแนวโน้มออกไปทางเบสเช่นเดิม

1.5 ผลการทดลองไอโซเทอมแบบของแลงมาร์และไอโซเทอมแบบของฟรุนดลิช เมื่อนำค่า R-Square (R^2) มาเปรียบเทียบกัน พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมแบบแลงมาร์ประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสี พบว่า สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำมีประสิทธิภาพของการกำจัดได้ดีที่สุด รองลงมาคือสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง และโทนสีน้ำเงิน

2. ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

2.1 จากผลการทดลองที่ได้ศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 และระยะเวลาบ่ม 7 วัน พบว่าอัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่เหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ได้แก่ อัตราส่วนผสม 1:1.1:1.9

2.2 จากการศึกษาหาอัตราส่วนผสมของถ้ำลอยซานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมจะได้ค่าต่างๆดังนี้ คือ อัตราส่วนผสมของถ้ำลอยซานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม 0.5 และ ระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมอย่างน้อย 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่ 1:1.1:1.9

2.3 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีการผลิตแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยซานอ้อยร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 และระยะเวลาบ่ม 28 วัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้บล็อกประสานปูพื้นมีชื่อเรียกทางการค้าว่า “คดกรีซ” ซึ่งมีความกว้าง 11.25 เซนติเมตร ความยาว 22.5 เซนติเมตร ความหนา 6 เซนติเมตร มีน้ำหนักโดยประมาณ 3.20 กิโลกรัม เมื่อนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดได้ 501.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สูงกว่าก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ที่มีสัดส่วนการผสมเดียวกัน

2.4 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นเป็นรูปแบบคดกรีซตรากาต้นทุนก้อนละ 3.34 บาท

งานวิจัยที่ได้ศึกษาในครั้งนี้จะพบว่าได้ความรู้ใหม่ๆ เกิดขึ้นโดยการนำถ้ำลอยซานอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งซึ่งไม่มีประโยชน์มีปริมาณมาก นำไปศึกษาเป็นแนวทางในการใช้วัสดุเหลือทิ้งซึ่งได้แก่ ถ้ำลอยซานอ้อยให้ก่อเกิดประโยชน์โดยนำไปบำบัดน้ำเสียสีย้อมแล้วทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นได้ยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการถ้ำลอยซานอ้อยบางส่วน และเป็นแนวทางศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้กับการบำบัดสีย้อมในโรงงานอุตสาหกรรมจริง จากนั้นยังได้ผลิตภัณท์ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมอีกด้วย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการนำไปใช้หาประสิทธิภาพของการกำจัดสีในน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียจริงโดยใช้ถ้ำลอยซานอ้อย
2. ศึกษากระบวนการดูดซับน้ำเสียสีย้อมเมื่อนำน้ำเสียสีย้อมหลายๆ โทนมสีมารวมกัน
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการทดลองจากการใช้เครื่องเขย่า (Shaker) มาเป็นแบบคอลัมน์เพื่อหาความสามารถในการกำจัดสีเมื่อเปลี่ยนรูปแบบของทดลอง และเพื่อประยุกต์ใช้ในงานจริง
4. เนื่องจากงานวิจัยได้ดำเนินในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีข้อจำกัดมากมาย และมีความแตกต่างกับการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นผลิตภัณฑ์ควรมีการพัฒนาเพื่อเชื่อมโยงการผลิตไปสู่ระดับอุตสาหกรรมให้ได้ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องมือในการขึ้นรูปในระดับโรงงานใช้เครื่องจักรที่มีกำลังสูง ทำให้คอนกรีตสามารถอัดได้แน่น โดยไม่จำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมาก ทำให้สามารถเติมวัสดุผสมได้เพิ่มขึ้น ราคาถูกลงและค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น
5. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ในการอัดผิวหน้าลงแบบหล่อคอนกรีตควรใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นมาก และได้ผิวหน้าที่เรียบได้
6. การทำวิจัยต่อไปจากนี้ควรศึกษาการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กระทรวงอุตสาหกรรม 2544. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 1462 กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กฤษณ์ จารุทะวีย์. 2545. การใช้ถ้ำลอยเส้นใยปาล์มและถ้ำลอยขานอ้อยแทนที่ซีเมนต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, สำนักงาน. 2520. รายงานข้อศึกษาเรื่องน้ำตาล. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ.
- ชวลิต นิตยะ. 2524. การผลิตและการใช้คอนกรีตบล็อกสำหรับสร้างผนัง. โครงการอบรมทางวิชาการภาคฤดูร้อน 2524. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชลธา ไกรวัตนุสรณ์, ลัดดา ยาวีร์ชน และศักดิ์จิตรา ตันสมบุญ. 2538. การผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย. โครงการระดับปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2527. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า (เล่มที่ 1-5). กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล และสถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2528. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แม่เมาะ. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- นภฤกษ์ แสงเงิน และ ฤทธิชัย ดิงชนาธิกุล. 2537. การกำจัดโลหะด้วยวิธีทำแข็งโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประณต กุลประสูตร. 2541. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์อมรินทร์พรินติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- เพชรพงศ์ ชื่นศิริ และ แสงวงสิน เกตุโตประการ. 2540. การนำกากตะกอนของสีน้ำทาบ้านมาเป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- พิภพ สุนทรสมัย. 2530. วัสดุวิศวกรรมการก่อสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรมสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น).

- เมธี เวชรัตน์. Utilization of Fly Ash in Concrete. 2542. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2535. อ้างถึงใน มนตรี นิธิกุล. ผลของขนาดอนุภาค ถ้ำลอยแม่เกาะกับอนุภาคที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ. 2542. การนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วินิต ช่อวิเชียร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิไลพร วณิชชวโรดม. 2528. การบำบัดสีของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอโดยกระบวนการดูดซับด้วย Activated Carbon. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วันเพ็ญ ก้องกิตติไพศาล. 2528. การดูดซับไอระเหยของนอร์มัลบิวทิลอะซิเตตด้วย Activated Carbon. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สถาบันวิจัยพลังงาน. 2541. รายงานการศึกษาเรื่องการใช้และประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาล. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สัญญาวัล อิงคภาคย์. 2539. ประสิทธิภาพของการลดซีไอดี และสีออกจากน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการดูดซับดีฟิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์ ถ่านไม้ และแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์. 2538. การกำจัดสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วยซีเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อัสวิทย์ ปัทมะเวณ. 2540. ตามรอยน้ำตาล. กรุงเทพฯ : ที.พี.พรินท์.
- อุดม หงษ์ประธานพร. 2532. การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอยและซีเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Ahmedna, M., Marshall, W.E., and Rao, R.M. 2000. Production of granular activated carbons from select agricultural by-products and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. Bioresource Technology. 71 : 113-123.
- Ahmed, M.M. and Ram, R.N. 1992. Removal of Basic Dye from Wastewater Using Silica as Adsorbent. Environmental Pollution. vol. 77, NO.1 : 15-30.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for concrete aggregates. C33-93. Annual book of ASTM standard. vol. 04.02, section 4 : 10-16.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. C127-88. Annual book of ASTM standard. vol. 04.02 section 4 : 47-68.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. C128-93. Annual book of ASTM standard. vol. 04.02 section 4 : 69-73.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test methods of sampling and testing concrete masonry units. C140-96. Annual book of ASTM standard. vol. 04.05 section 4 : 91-98.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for Portland cement. C150-95a. Annual book of ASTM standard. vol. 04.01 section 4 : 130-134.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus. C204-96. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.01 section 4 : 163-169.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Concrete. C 618-96. Annual Book of ASTM Standards. 04.02 Section 4 : 293-295.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for coal fly ash or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. C618-96. Annual book of ASTM standard. vol. 04.02 section 4 : 184-190.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for solid concrete interlocking paving units. C936-82. Annual book of ASTM standard. vol. 04.05 section 4 : 596-597.

- Asfour, H.M., Fadali, O.A., Nassar, M.M., and El-Geundi, M.S. 1985. Colour Removal from Textile Effluents Using Hardwood Sawdust as an Adsorbent. Journal of Chemical Technology Biotechnology. 35A : 28-35.
- Damanhuri, E., Munaf, D. R., and Djamal, A. 2000. Heavy metals fixation of ash waste from a steel industry into cement concrete and its utilization as building materials.
- Faust, D.S., and Aly, O.M. 1992. Chemistry of Water Treatment. Boston, Butterworths : 199-216.
- Frias, M., and De Fojas, M.I. Sanchez. 1997. Microstructural Alterations in Fly Ash Mortars : Study on Phenomena Affecting particle and Pore Size. Cement and Concrete Research. 27 : 619-628
- Ghouthi, M.A., Khraisheh, M.A.M., Allen, S.J., Ahmad, M.N. 2003. The Removal of Dyes from Textile Wastewater : a Study of the Physical Characteristics and Adsorption Mechanisms of diatomaceous earth. Journal of Environmental Management. 69 : 229-238.
- Gupta, G.S., Prasad, G., Pandey, K.K. and Singh, V.N. 1988. Removal of Color from Wastewater by Sorption for Water Reuse. Journal of Environmental Science and Health Part A. vol. A23, no.3 : 205-217.
- Gupta, M.P., and Bhattacharya, P.K. 1985. Study on Colour Removal from Bleach Plant Effluent of Kraft Pulp Mill. Journal of Chemical Technology Biotechnology. 35B : 33-42.
- Inthasaro, P. 2002. Utilization of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash as a Partial Cement Replacement. Master's Thesis, Inter-Departmental Program in Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Isaia, G. C., Gastaldini, A. L. G., and Moraes, R. 2003 (January) Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. Cement and concrete composites. vol. 25, no.1 : 69-76.
- Johnson, G.E., Kunka, L.M. and Field, J.H. 1965. Use of Coal and Fly ash Adsorbent for Removing Organic Contaminants from Secondary Municipal Effluents. I&EC Process Design and Development. vol.4, no.3 : 323-327.
- Li, G., and Zhao, Q. 1991. Dyeing Wastewater Treatment by Ash-cinder and Dust/Off Gas. Water Science Technology. vol.24, no.5 : 215-220.
- Maltais, Y. and Marchard, J. 1997. Influence of Curing Temperature on Cement Hydration and Mechanical Strength Development of Fly Ash Mortars. Cement and Concrete Research. 27 : 1009-1020.

- McKay, G., El-Geundi, M., and Nassar, M.M. 1987. Equilibrium Studies During the Removal of Dyestuffs from Aqueous Solutions Using Bagasse Pith. Water Research. vol.21, no.12 : 1513-1520.
- Mokay, G., Catterburn, M.S. and Sweeney, A.G. 1980. The Removal of Color from Effluent Using Various Adsorption Silica : Rate processes. Water Research. vol.14, no.1 : 79-86.
- Noll, K.E., Gounarios, V. and Hou, W. 1992. Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control. Michigan, Lewis : 199-216.
- Nontananandh, S. 1990. Industrial Waste Utilization as Construction Materials by Chemical Stabilization. Doctoral dissertation, Department of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto.
- Rangnekar, D.W. and Singh, P.P. 1980. An Introduction to Synthetic Dyes. Dhanraj: Himalaya Publishing House. : 21-28.
- Shore, J. 1990. Colorants and Auxiliaries Organic Chemistry and Application Properties Vol.1.England : England Society of Dyes and Colorists.
- Shore, John. 1995. Cellulosics Dyeing. Manchester : Society of Dyes and Colourists.
- Wangwichit, K. 1997. Comparative Study on Mortar Containing Fly Ash from Southeast Asia and Japan in Relation to Strength and Durability. Master's Thesis, Tokyo Institute of Technology.
- Weiping, M. and Brown, P.W. 1997. Hydrothermal Reaction of Fly Ash with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Cement and Concrete Research. 27 : 1237-1248.
- Zhang, M. H., and Malhotra, V. M. 1995 (December). Characteristics of thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. Cement and concrete research. vol. 25 no. 8 : 1713-1725.



ภาคผนวก ก

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของเถ้าลอยชานอ้อยที่สภาวะการเตรียมต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก1 ประสิทธิภาพการกำจัดของถ้ำลอยชานอ้อยที่สภาวะการเตรียมต่างๆ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีดำ Remazol Black B ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 7 และปริมาณถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม

เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังจากการทดลอง		ประสิทธิภาพของ การกำจัด (%)
	ความเข้มข้นที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0,0	179.222	7.00	0.000
0,15	27.183	9.47	84.833
0,30	26.173	9.49	85.396
0,45	16.718	9.47	90.672
1,0	16.561	9.50	90.760
1,30	8.402	9.48	95.312
2,0	7.315	9.50	95.918
2,30	6.030	9.49	96.635
3,0	5.850	9.48	96.736
4,0	4.148	9.48	97.686
5,0	3.818	9.49	97.870
6,0	3.808	9.47	97.875
7,0	3.779	9.50	97.891

ตาราง ก2 ประสิทธิภาพการกำจัดของถ้ำลอยชานอ้อยที่สภาวะการเตรียมต่างๆ โดยใช้น้ำเสีย
สังเคราะห์สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 7 และ
ปริมาณถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม


เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังจากการทดลอง		ประสิทธิภาพของ การกำจัด (%)
	ความเข้มข้นที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0,0	107.923	7.00	0.00
0,15	42.409	8.83	60.70
0,30	36.308	8.84	66.36
0,45	30.324	8.85	71.90
1,0	29.825	8.84	72.36
1,30	23.536	8.83	78.19
2,0	19.563	8.83	81.87
2,30	13.748	8.85	87.26
3,0	12.620	8.84	88.31
4,0	10.189	8.83	90.56
5,0	7.540	8.85	93.01
6,0	7.030	8.86	93.49
7,0	6.669	8.83	93.82

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแถ้ลอยซานอ้อยที่สภาวะการเตรียมต่างๆ โดยใช้น้ำเสีย
สังเคราะห์สีแดง Remazol Brilliant Red F3R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 7 และ
ปริมาณแถ้ลอยซานอ้อย 1 กรัม

เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังจากการทดลอง		ประสิทธิภาพของ การกำจัด (%)
	ความเข้มข้นที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0,0	88.189	7.00	0.000
0,15	19.022	9.03	78.430
0,30	17.174	9.01	80.526
0,45	13.178	9.02	85.057
1,0	12.202	9.05	86.164
1,30	8.657	9.03	90.184
2,0	6.755	9.02	92.340
2,30	6.850	9.04	92.233
3,0	5.936	9.03	93.269
4,0	5.499	9.02	93.765
5,0	4.704	9.02	94.666
6,0	4.594	9.04	94.791
7,0	4.295	9.04	95.130

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข
ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข1 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับของถ้ำลอยชานอ้อยที่เวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีดำ Remazol Black B ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล.)	ลักษณะของน้ำเสียก่อนการ ทดลอง		ลักษณะของน้ำเสียหลังการ ทดลอง		ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
	พีเอช	ความเข้มข้นสีก่อนการ กำจัด	พีเอช	ความเข้มข้นสีหลังการ กำจัด	
50	5	182.857	9.50	5.397	97.05
	7	181.975	9.49	4.796	97.36
	9	182.474	9.50	3.598	98.03
100	5	323.409	9.48	30.498	90.57
	7	321.009	9.49	30.938	90.36
	9	323.311	9.52	22.499	93.04
150	5	406.448	9.49	90.276	77.79
	7	407.565	9.51	91.179	77.63
	9	406.779	9.50	89.330	78.04
200	5	467.093	9.48	191.943	58.91
	7	477.963	9.48	198.470	58.48
	9	468.728	9.51	191.949	59.05

ตาราง ข2 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับของถ้ำลอยชานอ้อยที่เวลา 5 ชั่วโมง ปริมาณถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล.)	ลักษณะของน้ำเสียก่อนการ ทดลอง		ลักษณะของน้ำเสียหลังการ ทดลอง		ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
	พีเอช	ความเข้มข้นสีก่อนการ กำจัด	พีเอช	ความเข้มข้นสีหลังการ กำจัด	
50	5	111.460	8.84	7.968	92.85
	7	108.241	8.83	7.415	93.15
	9	110.215	8.84	7.201	93.47
100	5	204.773	8.84	61.055	70.18
	7	203.209	8.85	60.244	70.35
	9	204.178	8.86	61.009	70.12
150	5	285.043	8.87	122.182	57.14
	7	285.364	8.89	123.755	56.63
	9	286.229	8.86	122.626	57.16
200	5	358.569	8.87	191.570	46.57
	7	357.985	8.88	192.769	46.15
	9	358.642	8.87	190.390	46.91

ตาราง ข3 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับของถ้ำลอยชานอ้อยที่เวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณ ถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง Remazol Brilliant Red F3R ที่ ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล.)	ลักษณะของน้ำเสียก่อนการ ทดลอง		ลักษณะของน้ำเสียหลังการ ทดลอง		ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
	พีเอช	ความเข้มข้นสีก่อนการ กำจัด	พีเอช	ความเข้มข้นสีหลังการ กำจัด	
50	5	89.538	9.02	5.076	94.33
	7	89.448	9.03	4.829	94.60
	9	90.271	9.03	5.177	94.27
100	5	170.861	9.03	34.781	79.64
	7	178.445	9.04	36.538	79.52
	9	173.572	9.03	33.762	80.55
150	5	237.992	9.02	91.009	61.76
	7	237.520	9.04	91.363	61.53
	9	235.989	9.03	86.496	63.35
200	5	282.695	9.01	148.505	47.47
	7	284.463	9.03	152.751	46.30
	9	284.457	9.03	149.714	47.37



ภาคผนวก ค

ประสิทธิภาพการกำจัดของเถาลอยชานอ้อยเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค1 ประสิทธิภาพการกำจัดของถ้ำลอยชานอ้อยเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสีย
สังเคราะห์สีดำ Remazol Black B ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.43 และปริมาณ
ถ้ำลอยชานอ้อย 1 กรัม

เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังจากการทดลอง		ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
	ความขุ่นสีที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0,0	180.387	5.43	0.00
0,15	28.904	9.38	83.98
0,30	26.239	9.55	85.45
0,45	17.988	9.48	90.03
1,0	16.129	9.50	91.06
1,30	9.086	9.49	94.96
2,0	7.297	9.68	95.96
2,30	7.998	9.57	95.57
3,0	5.036	9.50	97.21
4,0	4.123	9.47	97.71
5,0	3.769	9.49	97.91
6,0	3.616	9.51	98.00
7,0	3.687	9.57	97.97

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค2 ประสิทธิภาพการกำจัดของแถ้ลอยชานอ้อยเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสีย
สังเคราะห์สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.31 และ
ปริมาณแถ้ลอยชานอ้อย 1 กรัม


เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
	ความเข้มข้นที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0,0	109.052	5.31	0.00
0,15	42.843	8.85	60.71
0,30	40.324	8.96	63.02
0,45	31.348	8.85	71.25
1,0	32.667	8.84	70.04
1,30	24.336	8.95	77.68
2,0	20.824	8.76	80.90
2,30	16.114	8.84	85.22
3,0	12.998	8.77	88.08
4,0	11.003	8.85	89.91
5,0	7.558	8.79	93.07
6,0	7.099	8.88	93.49
7,0	6.591	8.91	93.96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค3 ประสิทธิภาพการกำจัดของถ้ำลอยซานอ้อยเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสีย
สังเคราะห์สีแดง Remazol Brilliant Red F3R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.59 และ
ปริมาณถ้ำลอยซานอ้อย 1 กรัม

เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังจากการทดลอง		ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
	ความเข้มข้นที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0,0	90.187	5.59	0.00
0,15	19.376	9.04	78.52
0,30	16.790	9.13	81.38
0,45	13.348	9.06	85.20
1,0	12.345	9.01	86.31
1,30	12.685	9.06	85.94
2,0	8.489	9.07	90.59
2,30	7.051	9.09	92.18
3,0	6.635	9.05	92.64
4,0	5.136	9.11	94.31
5,0	4.711	9.05	94.78
6,0	4.426	9.10	95.09
7,0	4.212	9.06	95.33

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง
ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในปริมาณต่ำลอยชานอ้อยต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง1 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับที่ปริมาณแถาลอยชานอ้อยต่างๆ โดยใช้น้ำเสีย
สังเคราะห์สีดำ Remazol Black B ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.83

ปริมาณแถาลอย ชานอ้อย (กรัม)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ประสิทธิภาพของ การกำจัด (%)
	ความขุ่นสีที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0	187.376	5.83	0.00
0.05	147.738	9.54	21.15
0.1	108.925	9.53	41.87
0.15	69.843	9.55	62.73
0.25	34.919	9.56	81.36
0.5	8.732	9.52	95.34
1	6.235	9.54	96.66
1.5	3.814	9.53	97.96
2	2.829	9.55	98.49
3	1.789	9.54	99.05
4	1.740	9.53	99.07
5	1.720	9.55	99.08
6	1.680	9.54	99.10

ตาราง ง2 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับที่ปริมาณแถาลอยชานอ้อยต่างๆ โดยใช้น้ำเสีย
สังเคราะห์สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.72

ปริมาณแถาลอย ชานอ้อย (กรัม)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ประสิทธิภาพของ การกำจัด (%)
	ความเข้มสีที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0	114.979	5.72	0.00
0.05	98.939	8.91	13.95
0.1	83.491	8.90	27.39
0.15	66.775	8.93	41.92
0.25	35.193	8.91	69.39
0.5	9.481	8.92	91.75
1	7.453	8.91	93.52
1.5	5.196	8.90	95.48
2	4.402	8.90	96.17
3	3.624	8.93	96.85
4	2.619	8.92	97.72
5	2.524	8.90	97.80
6	2.492	8.91	97.83

ตาราง ง3 ประสิทธิภาพการกำจัดในการดูดซับที่ปริมาณถ้ำลอยชานอ้อยต่างๆ โดยใช้น้ำเสีย
สังเคราะห์สีแดง Remazol Brilliant Red F3R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.61

ปริมาณถ้ำลอย ชานอ้อย (กรัม)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ประสิทธิภาพของ การกำจัด (%)
	ความเข้มสีที่เหลือหลังการกำจัด	พีเอช	
0	93.115	5.61	0.00
0.05	79.273	9.08	14.87
0.1	65.672	9.09	29.47
0.15	52.372	9.08	43.76
0.25	27.564	9.08	70.40
0.5	7.254	9.09	92.21
1	5.580	9.07	94.32
1.5	3.431	9.07	96.32
2	2.707	9.08	97.09
3	2.030	9.07	97.82
4	1.976	9.09	97.88
5	1.928	9.08	97.93
6	1.696	9.07	98.18



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ1 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 คอนกรีตและระยะเวลาป่ม 7 วัน ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆ

สัดส่วนผสม	ระยะเวลาป่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวตัน)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย
		ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
1:1:2	7	89	84	86	86.33	362.89	342.51	350.66	352.00	34.59	35.20
1:1.1:1.9	7	96	97	101	98.00	391.44	395.51	411.82	399.59	39.27	39.96
1:1.5:2.5	7	76	77	65	72.67	309.89	313.96	265.04	296.31	29.12	29.63
1:2:3	7	35	35	34	34.67	142.71	142.71	138.63	141.37	13.89	14.14
1:3:5	7	7	6	7	6.67	28.54	24.46	28.54	27.20	2.67	2.72

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ2 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมที่ไม่ได้ใส่ถ้ำลอยซานอ้อย และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
7	102	114	117	111.00	415.90	464.83	477.06	452.60	44.48	45.26
14	120	130	129	126.33	489.30	530.07	525.99	515.12	50.62	51.51
28	137	138	140	138.33	558.61	562.69	570.85	564.05	55.43	56.41
60	138	143	146	142.33	562.69	583.08	595.31	580.36	57.04	58.04

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

ตารางที่ จ3 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	102	114	117	111.00	428.14	452.60	399.59	426.78	41.94	42.68
14	108.5	106.5	120	111.67	442.41	434.25	489.30	455.32	44.75	45.53
28	111	122	121	118.00	452.60	497.45	493.37	481.14	47.29	48.11
60	121	120	119	120.00	493.37	489.30	485.22	489.30	48.09	48.93

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

ตารางที่ จ4 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
7	91	94	89	91.33	317.05	383.28	362.90	372.41	36.60	37.24
14	96.5	93	92	93.83	393.48	279.21	375.13	382.60	37.60	38.26
28	100	89	95	94.67	407.75	362.90	387.36	386.00	37.94	38.60
60	95	98	99	97.33	387.36	399.59	403.67	396.87	39.00	39.69

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ5 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
7	50	54	56	53.33	203.87	220.18	228.34	217.47	21.37	21.75
14	56	54	46	36.67	228.34	220.18	187.56*	224.26	22.04	22.43
28	53	54	59	55.33	216.11	220.18	240.57	225.62	22.17	22.56
60	57	56	55.5	56.17	232.42	228.34	226.30	229.02	22.51	22.90

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ6 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมที่ไม่ได้ใส่ถ้ำลอยซานอ้อย และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
7	97	99	98	98.00	395.52	403.67	399.59	399.59	39.27	39.96
14	112	116	118	115.33	456.68	472.99	481.14	470.27	46.22	47.03
28	132	137	131	133.33	538.23	558.61	534.15	543.66	53.43	54.37
60	133	140	135	136.00	542.30	570.85	550.46	554.54	54.50	55.45

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

ตารางที่ จ7 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	89	91	90	90.00	362.90	367.38	366.97	365.75	35.95	36.58
14	115	109	104	109.33	468.91	444.44	424.06	445.80	43.81	44.58
28	128	125	124	125.67	521.92	509.68	505.61	512.40	50.35	51.24
60	126	135	129	130.00	513.76	550.46	525.99	530.07	52.09	53.01

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ8 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
7	70.5	80	84	82.00	287.46*	326.20	342.51	334.35	32.86	33.44
14	100	95	98	97.67	407.75	387.36	399.59	398.23	39.14	39.82
28	124	122	114	120.00	505.61	497.45	464.83	489.30	48.09	48.93
60	121	123	124	122.67	493.37	501.53	505.61	500.17	49.16	50.02

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ9 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	73	75	83	77.00	297.66	305.81	338.43	313.97	30.86	31.40
14	79	91	90	86.67	322.12	371.05	366.97	353.38	34.73	35.34
28	98	92	97	95.67	399.59	375.13	395.52	390.08	38.34	39.01
60	110	104	106	106.67	448.52	424.06	432.21	434.93	42.74	43.49

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ10 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมที่ไม่ได้ใส่ถ้ำลอยขานอ้อย และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	86	89	90	88.33	350.66	362.90	366.97	360.18	35.40	36.02
14	105	111	108.5	108.17	428.14	452.60	442.41	441.05	43.35	44.11
28	122	124	128	124.67	497.45	505.61	521.92	508.33	49.96	50.83
60	127	130	124	127.00	517.84	530.07	505.61	517.84	50.89	51.78

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ11 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของถ้ำลอยซานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวตัน)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	76	74	75	75.00	309.89	301.73	305.81	305.81	30.06	30.58
14	93	75	90	91.50	379.21	305.81*	366.97	373.09	36.67	37.31
28	110	109	112	110.33	448.52	444.44	456.68	449.88	44.21	44.99
60	113	115	112	113.33	460.75	468.91	456.68	462.11	45.42	46.21

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ12 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของถ้ำลอยซานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	81.5	69	70	69.50	332.31*	281.35	285.42	283.38	27.85	28.34
14	83	81	94	86.00	338.43	330.28	383.28	350.66	34.46	35.07
28	104	102	100	102.00	424.06	415.90	407.75	415.90	40.87	41.59
60	109	108	109	108.67	444.44	440.37	444.44	443.09	43.55	44.31

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ13 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	65	66	52	61.00	265.04	269.11	212.03	267.07	26.25	26.71
14	78	77	74	76.33	318.04	313.97	301.73	311.25	30.60	31.13
28	82	94	84	86.67	334.35	383.28	342.52	353.38	34.73	35.34
60	90	87	92	89.67	366.97	354.74	375.13	365.61	35.93	36.56

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ14 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมที่ไม่ได้ใส่เถ้าลอยขาน้อย และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวตัน)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	76	79	78	77.67	309.89	322.12	318.04	316.68	31.12	31.67
14	88	90	87	88.33	358.82	366.97	354.74	360.18	35.40	36.02
28	110	107	104	107.00	448.52	436.29	424.06	436.29	42.88	43.63
60	111	109	115	111.67	452.60	444.44	468.91	455.32	44.75	45.53

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ15 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	65	53	61	63.00	265.04	216.11*	248.73	256.88	25.25	25.69
14	81	82	80	81.00	330.28	334.35	326.20	330.28	32.46	33.03
28	100	98	95	97.67	407.75	399.59	387.36	398.23	39.14	39.82
60	106	95	112	104.33	432.21	387.36	456.68	425.42	41.81	42.54

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ16 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของถ้ำลอยซานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวัตน์)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	58	59	59	58.67	236.49	240.57	240.57	239.21	23.51	23.92
14	73.5	88	71	72.25	299.69	358.82*	289.50	294.60	28.95	29.46
28	90	87	69	88.50	366.97	354.74	281.35*	360.86	35.47	36.09
60	95	98	103	98.67	387.36	399.59	419.98	402.31	39.54	40.23

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ17 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยโดยอัตราส่วนผสมของถ้ำลอยซานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมนิวตัน)				กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10 เปอร์เซนต์ ค่าเฉลี่ย
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	
7	56	47	55	55.5	228.34	191.64*	224.26	226.30	22.24	22.63
14	64.5	68	65	65.83	262.99	277.27	265.04	268.43	26.38	26.84
28	78	77	76	77.00	318.04	313.97	309.89	313.97	30.86	31.40
60	85	80	90	85.00	346.59	326.20	366.97	346.59	34.06	34.66

หมายเหตุ : xxx.xx* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่อยู่ในช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ
ข้อมูลร้อยละกำลังรับแรงอัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑1 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆและระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ

ปริมาณ การ แทนที่ (%)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)			
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)				ระยะเวลาบ่ม (วัน)			
	7	14	28	60	7	14	28	60
00	452.60	515.12	564.05	580.36	100	100	100	100
10	426.78	455.32	481.14	489.30	94.3	88.4	85.3	84.3
20	372.41	382.60	386.00	396.87	82.3	74.3	68.4	68.4
30	217.47	224.26	225.62	229.02	48.1	43.5	40.0	39.5

ตารางที่ ๑2 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆและระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ

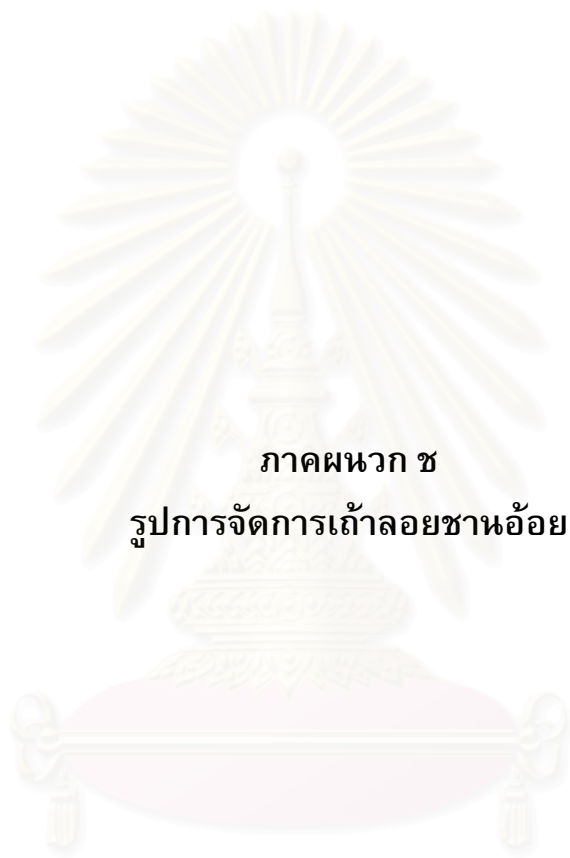
ปริมาณ การ แทนที่ (%)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)			
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)				ระยะเวลาบ่ม (วัน)			
	7	14	28	60	7	14	28	60
00	399.59	470.27	543.66	554.54	100	100	100	100
10	365.75	445.80	512.40	530.07	91.5	94.8	94.2	95.6
20	334.35	398.23	489.30	500.17	83.7	84.7	90.0	90.2
30	313.97	353.38	390.08	434.93	78.6	75.1	71.8	78.4

ตารางที่ ๓3 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆและระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ

ปริมาณ การ แทนที่ (%)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)			
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)				ระยะเวลาบ่ม (วัน)			
	7	14	28	60	7	14	28	60
00	360.18	441.05	508.32	517.84	100	100	100	100
10	305.81	373.09	449.88	462.11	84.9	84.6	88.5	89.2
20	283.38	350.66	415.90	443.09	78.7	79.5	81.8	85.6
30	267.07	311.25	353.38	365.61	74.2	70.6	69.5	70.6

ตารางที่ ๓4 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆและระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ

ปริมาณ การ แทนที่ (%)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)			
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)				ระยะเวลาบ่ม (วัน)			
	7	14	28	60	7	14	28	60
00	316.68	360.18	436.29	455.32	100	100	100	100
10	256.88	330.28	398.23	425.42	81.1	91.7	91.3	93.4
20	239.21	294.60	360.86	402.31	75.5	81.8	82.7	88.4
30	226.30	268.43	313.97	346.59	71.5	74.5	71.9	76.1



ภาคผนวก ช
รูปการจัดการถ้ำลอยซานอ้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ช1 กองขานอ้อยที่ได้จากการหีบ



รูปที่ ช2 ถ้ำลอยขานอ้อยที่นำไปถมในบ่อ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุเมธ เตชะกุลวิโรจน์ เกิดวันที่ 9 มีนาคม 2522 ที่จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2543 เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย