

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ข้อมูลองค์ประกอบบางชนิดในกากน้ำตาลที่ใช้ทดลอง

กากน้ำตาลที่มาจากโรงงานสุราบางยี่ขัน 2 มีองค์ประกอบบางชนิดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบต่างๆ ในกากน้ำตาลที่ใช้ในงานวิจัย

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ppm)
Ca ²⁺	13480
SiO ₂	16056
SO ₄ ²⁻	20849
PO ₄ ³⁻	1771
Na ⁺	665
K ⁺	32291
Mg ²⁺	2832

ส่วนปริมาณน้ำตาลในกากน้ำตาลที่ใช้วิเคราะห์ที่มีปริมาณน้ำตาลร้อยละ 53.8

4.2 ผลการทดลองการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะก้น

ตะก้นที่มาจากหอกันของโรงงานสุราบางยี่ขัน 2 วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-Ray Fluorescence) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในตะก้น

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Si	1.09
S	39.16
Cl	2.60
K	0.63
Ca	56.53

จากตารางที่ 4.2 พบว่าองค์ประกอบของธาตุในตะกอนประกอบด้วยธาตุ 2 ชนิดหลักคือ แคลเซียมซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 56 และกำมะถันร้อยละ 39 แสดงว่าตะกอนน่าจะเกิดจาก แคลเซียมซัลเฟตเนื่องจากโดยทั่วไปตะกอนเกิดได้จาก แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซัลเฟต สมบัติของแคลเซียมซัลเฟตละลายน้ำได้พอสมควรและค่าการละลายจะลดลงเมื่อมีเอทิลแอลกอฮอล์ผสมอยู่ดังหัวข้อ 2.3.3

4.3 การศึกษาการกำจัดแคลเซียมโดยการเหวี่ยงแยก

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรของการเหวี่ยงแยก คือ ปริมาณน้ำตาล ความเร็ว การเหวี่ยงแยก และเวลาการเหวี่ยงแยก ต่อการลดลงของปริมาณแคลเซียม เนื่องจากมี 3 ตัวแปร จึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองของ บอกซ์ วิลสัน²⁴ (Box-Wilson Design) หรือ Central Composite Design (CCD) ช่วยลดจำนวนครั้งในการทดลองดังภาคผนวก ข ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 เนื่องจากเป็นการทดลองที่อาศัยหลักการออกแบบการทดลองจึงสามารถนำผลการคำนวณไปวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นได้ดังตารางที่ 4.4

เมื่อ q คือปริมาณน้ำตาล

v คือความเร็วในการเหวี่ยง

t คือเวลาที่ใช้เหวี่ยง

ความหมายของการวิเคราะห์ข้อมูลสรุปได้ดัง

ก) ตัวแปรอิสระทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคลเซียมที่ลดลงค่อนข้างสูงคือ ร้อยละ 99.13 ซึ่งจะพิจารณาว่าตัวแปรอิสระใดควรใช้ในสมการพยากรณ์ต่อไป

ข) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดจะนำมาพยากรณ์ปริมาณแคลเซียมที่ลดลงได้หรือไม่ โดยการตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลง

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลง

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

จากตารางพบว่าค่าสถิติ F ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าสถิติ F ที่เปิดจากตารางแสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 กล่าวคือ ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.3 ผลของปริมาณน้ำตาล ความเร็วการเหวี่ยง และเวลาการเหวี่ยง ต่อการลดปริมาณแคลเซียม

ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 8.0	ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 1735-1775 ppm
ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 13.3	ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 2877-2891 ppm
ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 24.0	ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 4951-5035 ppm
ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 34.7	ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 7671-7772 ppm
ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 40.0	ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 8679-8683-ppm

การทดลอง	ปริมาณน้ำตาล (เปอร์เซ็นต์)	ความเร็วการเหวี่ยง (รอบต่อนาที)	เวลาการเหวี่ยง (นาที)	ปริมาณแคลเซียมหลังการเหวี่ยง (ppm)	การลดลงของแคลเซียม (เปอร์เซ็นต์)
1	13.3	1750	5	2458.55	14.67
2	13.3	2750	13	2399.52	16.80
3	34.7	1750	13	6717.66	13.42
4	34.7	2750	5	6204.47	20.03
5	24.0	2250	9	4609.41	7.21
6	24.0	2250	9	4578.23	7.84
7	24.0	2250	9	4647.07	6.94
8	40.0	2250	9	7853.53	9.54
9	8.0	2250	9	1735.19	3.01
10	24.0	3000	9	4498.87	9.52
11	24.0	1500	9	4721.64	5.03
12	24.0	2250	15	4659.48	6.52
13	24.0	2250	3	4669.84	6.41

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของการกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเหวี่ยงแยก

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9993
R Square	0.9986
Adjusted R Square	0.9914
Standard Error	0.4640
Observations	13

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	299.2573	29.9257	139.0224	0.0072
Residual	2	0.4305	0.2153		
Total	12	299.6878			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	7.3283	0.2679	27.3581	0.0013	6.1758	8.4809	6.1758	8.4809
q	2.1767	0.2187	9.9522	0.0099	1.2356	3.1177	1.2356	3.1177
v	1.4950	0.2187	6.8355	0.0207	0.5540	2.4360	0.5540	2.4360
t	0.0700	0.2187	0.3201	0.7793	-0.8710	1.0110	-0.8710	1.0110
q ²	-0.4681	0.1882	-2.4870	0.1307	-1.2781	0.3418	-1.2781	0.3418
v ²	-0.0248	0.1882	-0.1318	0.9072	-0.8347	0.7851	-0.8347	0.7851
t ²	-0.3637	0.1882	-1.9322	0.1931	-1.1736	0.4462	-1.1736	0.4462
qv	1.1913	0.3188	3.7364	0.0648	-0.1805	2.5630	-0.1805	2.5630
qt	-0.6888	0.3188	-2.1603	0.1633	-2.0605	0.6830	-2.0605	0.6830
vt	1.6829	0.3188	5.2785	0.0341	0.3111	3.0547	0.3111	3.0547
qvt	-9.7546	0.3544	-27.5277	0.0013	-11.2793	-8.2299	-11.2793	-8.2299

ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบค่าสถิติและความน่าจะเป็นของตัวทดสอบ T เพื่อทดสอบว่าควรจะใช้ค่าคงที่ และตัวแปรอิสระใด ในสมการพยากรณ์ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระตัวที่ i ไม่มีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลง

H_1 : ตัวแปรอิสระตัวที่ i มีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลง

การวิเคราะห์หาค่าจากค่าสถิติ T-Stat เทียบกับการเปิดจากตารางสถิติหรือค่าความน่าจะเป็น P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในที่นี้จะวิเคราะห์จากค่าความน่าจะเป็นโดยเลือกค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ สรุปตัวแปรที่นำมาใช้ในสมการพยากรณ์ได้ดังนี้

ตัวแปรอิสระ q มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 2.18

ตัวแปรอิสระ v มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1.50

ตัวแปรอิสระ vt มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1.68

ตัวแปรอิสระ qvt มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ -9.75

จุดตัดมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 7.33

สรุปสมการพยากรณ์ได้ดังนี้ $Ca = 0.22q + 1.5v + 1.68vt - 9.75qvt + 7.33$ (4.1)

เมื่อ Ca คือปริมาณแคลเซียมที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)

4.4 การวิเคราะห์การกำจัดแคลเซียมโดยการเติมสารเคมีและเหวี่ยงแยก

ในตอนนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์และโซเดียมคาร์บอเนต 1 โมลาร์ ต่อการลดลงของแคลเซียม กำหนดปริมาณน้ำตาลร้อยละ 13.3 ความเร็วการเหวี่ยงแยก 1500 รอบต่อนาที และเวลาในการเหวี่ยง 5 นาที ผลการทดลองการกำจัดแคลเซียมโดยการเติมสารเคมีเหวี่ยงแยก สารเคมีที่เติมมี 2 ชนิด คือโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.5 และโซเดียมคาร์บอเนตแสดงดังตารางที่ 4.6 นำไปเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.5 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ต่อการลดลงของแคลเซียม

ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 13.3 ความเร็วการเหวี่ยง 1500 รอบต่อนาที และเวลาการเหวี่ยง 5 นาที ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 2841.66-2870.80 ppm

การทดลอง	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)	ค่าความเป็นกรด-เบส	ปริมาณแคลเซียมหลังการเหวี่ยง (ppm)	การลดลงของแคลเซียม (เปอร์เซ็นต์)
1	0	5.24	-	-
2	2.5	8.41	2678.07	6.70
3	5	9.43	2533.09	11.55
4	7.5	10.40	2277.71	20.62
5	10	10.94	2215.78	22.78
6	15	11.56	1969.48	30.74
7	20	11.99	1813.54	36.22
8	25	12.30	1817.08	36.10
9	30	12.43	1785.40	37.21

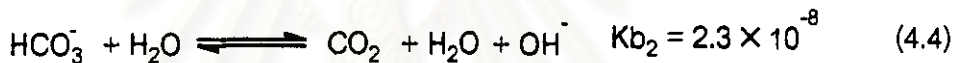
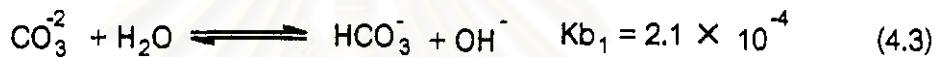
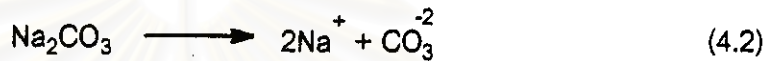
ตารางที่ 4.6 ผลของปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 1 โมลาร์ ต่อการลดลงของแคลเซียม

ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 13.3 ความเร็วการเหวี่ยง 1500 รอบต่อนาที และเวลาการเหวี่ยง 5 นาที ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 2882.34-2913.21 ppm

การทดลอง	ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต (มิลลิลิตร)	ค่าความเป็นกรด-เบส	ปริมาณแคลเซียมหลังเหวี่ยงแยก (ppm)	การลดลงของแคลเซียม (เปอร์เซ็นต์)
1	0	5.28	-	-
2	5	7.86	2272.13	21.59
3	10	9.25	431.09	85.12
4	15	9.95	185.67	93.59
5	20	10.13	165.90	94.28
6	25	10.31	136.60	95.27
7	30	10.14	107.89	96.28

จากรูปที่ 4.1 พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารเคมีมากขึ้น โดยสารเคมีที่เติมได้เลือกใช้สาร 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ค่าความเป็นกรด-เบสกับปริมาณสารเคมีที่เติมเป็นดังนี้

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อเติมลงในกากน้ำตาลมากขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นจนค่าๆ หนึ่งคือ 25 มิลลิลิตรค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มคงที่เท่ากับ 12.4 ส่วนปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตก็เป็นไปทำนองเดียวกันแต่จุดที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มค่าคงที่มีค่าต่ำกว่าของโซเดียมไฮดรอกไซด์คือเท่ากับ 10.1 เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสแก่แตกตัวได้หมด ส่วนโซเดียมคาร์บอเนตเป็นเบสอ่อนที่แตกตัวเป็น 2 ขั้นตอนดังสมการ



และค่าคงที่ของการแตกตัวมีค่าต่ำ

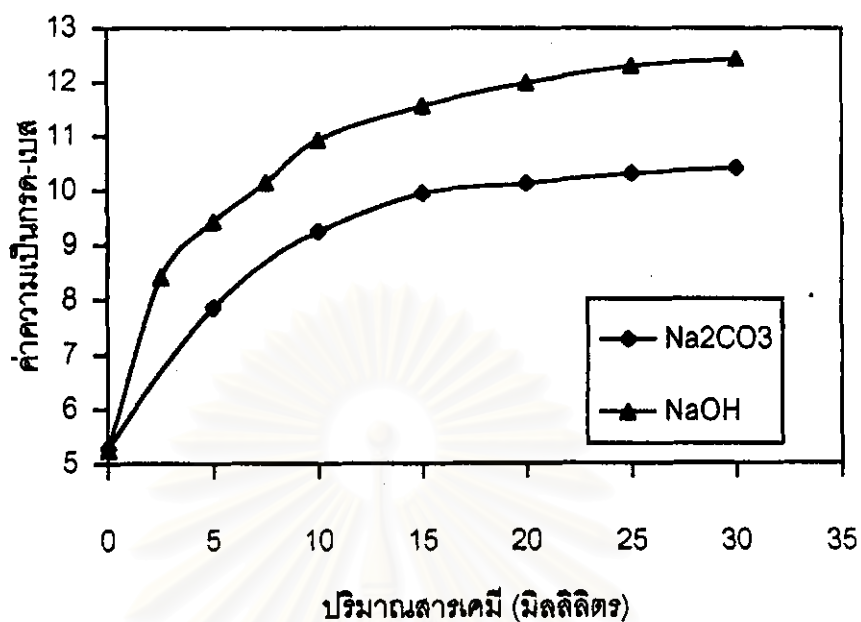
จากรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณแคลเซียมที่ลดลงสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารเคมีมากขึ้น โดยสารเคมีที่เติมได้เลือกใช้สาร 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ค่าปริมาณแคลเซียมที่ลดลงกับปริมาณสารเคมีเป็นดังนี้

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อเติมลงในกากน้ำตาลมากขึ้นทำให้ปริมาณแคลเซียมที่ลดลงสูงขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งคือที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 มิลลิลิตร ปริมาณแคลเซียมที่ลดลงเริ่มมีค่าคงที่เท่ากับร้อยละ 36 ส่วนปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตก็เป็นไปทำนองเดียวกันแต่ปริมาณแคลเซียมที่ลดลงที่เริ่มคงที่มีค่าสูงกว่าการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับร้อยละ 93.5 ที่ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต 15 มิลลิลิตร เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์ไอออนจะจับกับแคลเซียมไอออนในกากน้ำตาลเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ดังสมการ

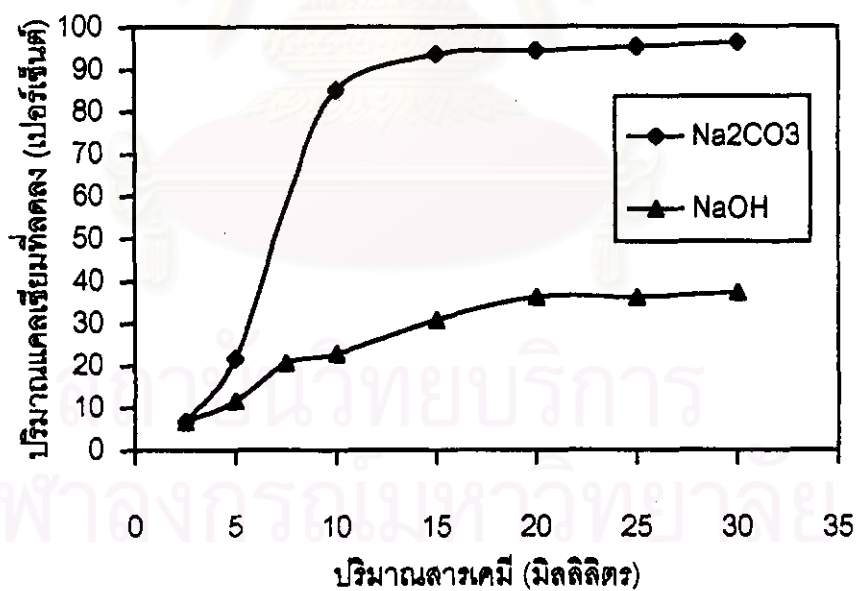


ค่าคงที่ของการละลายของ Ca(OH)_2 เท่ากับ 5.5×10^{-6} ค่าการละลายเท่ากับ 0.185 กรัมในน้ำ 100 กรัม

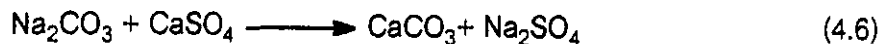
ส่วนการเติมโซเดียมคาร์บอเนต คาร์บอเนตไอออนจะจับกับแคลเซียมไอออนในกากน้ำตาล เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตดังสมการ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบสกับปริมาณสารเคมีที่เติมลงในกากน้ำตาล



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมที่ลดลงกับปริมาณสารเคมี



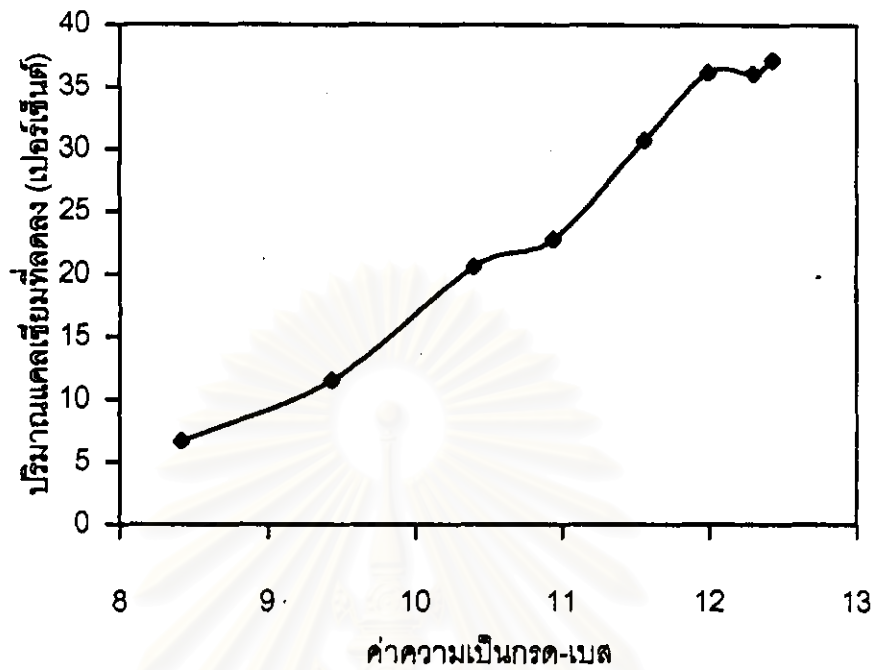
ค่าคงที่ของการละลายของ CaCO_3 เท่ากับ 8.7×10^{-9} ค่าการละลายเท่ากับ 0.0012 กรัม
ในน้ำ 100 กรัม

ด้วยเหตุนี้การเติมโซเดียมคาร์บอเนตจึงลดปริมาณแคลเซียมในกากน้ำตาลได้มากกว่า
การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถึงแม้ว่าการเติมกรดบางชนิด เช่น กรดซัลฟูริกก็สามารถลดปริมาณ
แคลเซียมในกากน้ำตาลได้ดังที่เคยมีผู้วิจัยไว้แต่ต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็น
เวลาถึง 4 ชั่วโมงที่ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 2 เพื่อให้ตกตะกอนในรูปของแคลเซียมซัลเฟต
ดังนั้นการเติมโซเดียมคาร์บอเนตน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า

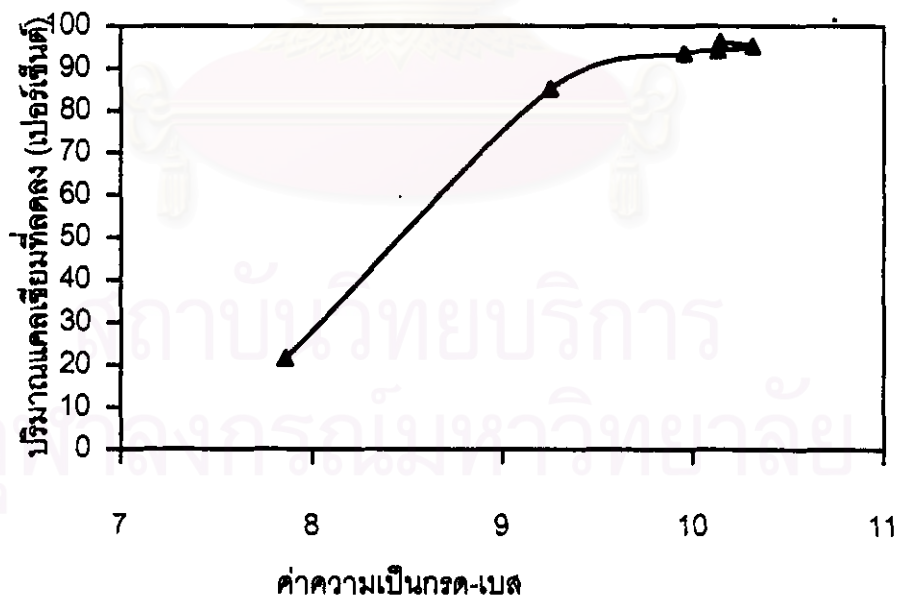
จากกราฟรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าปริมาณแคลเซียมที่ลดลงจะสูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-
เบสสูงขึ้นในกรณีของโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณแคลเซียมที่ลดลงสูงสุดเพียงประมาณร้อยละ 36
ที่ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 12 ส่วนการเติมโซเดียมคาร์บอเนตสามารถลดปริมาณแคลเซียม
ได้ถึงประมาณร้อยละ 90 ที่ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 10 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-เบสที่ต่ำ
กว่าการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และประสิทธิภาพในการกำจัดแคลเซียมสูงกว่า อันเป็นผลดีต่อ
การปรับค่าความเป็นกรด-เบสกลับไปให้เหมาะสมกับการหมัก ดังนั้นการทดลองต่อไปจึงพิจารณา
เฉพาะการเติมโซเดียมคาร์บอเนต

4.5 ผลของปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 1 โมลาร์ ความเร็วการเหวี่ยงและเวลาการ เหวี่ยงต่อการลดลงของแคลเซียม

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7 เนื่องจากเป็นการทดลองที่อาศัยหลักการออกแบบ
การทดลองจึงสามารถนำผลการคำนวณไปวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นแต่เนื่องจาก
ถ้ากำหนดตัวแปรอิสระเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3 จะทำให้สมการที่ได้มีความยุ่งยากดังภาคผนวก ๑
ดังนั้นจึงได้ลดจำนวนตัวแปรอิสระลงได้ผลดังตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมที่ลดลงกับค่าความเป็นกรด-เบสเมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมที่ลดลงกับค่าความเป็นกรด-เบสเมื่อเติมโซเดียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 4.7 ผลของปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 1 โมลาร์ ความเร็วการเหวี่ยง และเวลาการเหวี่ยงต่อการลดลงของแคลเซียม

ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 13.3 ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 2845.27-2936.78 ppm

การทดลอง	ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต (มิลลิกรัม)	ค่าความเป็นกรด-เบส	ความเร็วในการเหวี่ยง (รอบต่อนาที)	เวลาการเหวี่ยง (นาที)	ปริมาณแคลเซียมหลังเหวี่ยงแยก (ppm)	ปริมาณแคลเซียมที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)
1	6.7	8.43	1750	5	1244.26	56.95
2	6.7	8.43	2750	13	921.83	68.68
3	13.3	9.81	1750	13	297.77	89.76
4	13.3	9.81	2750	5	233.05	91.98
5	10.0	9.30	2250	9	373.08	87.13
6	10.0	9.30	2250	9	361.46	87.53
7	10.0	9.30	2250	9	406.60	85.90
8	15.0	9.97	2250	9	202.25	94.98
9	5.0	7.84	2250	9	2238.74	22.02
10	10.0	9.30	3000	9	488.04	83.00
11	10.0	9.30	1500	9	534.92	81.39
12	10.0	9.30	2250	15	444.15	84.53
13	10.0	9.30	2250	3	529.69	81.52

จากตารางที่ 4.8

เมื่อ p คือค่าความเป็นกรด-เบส

v คือความเร็วในการเหวี่ยง

t คือเวลาที่ใช้เหวี่ยง

ความหมายของการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นดังนี้

ตัวแปรอิสระทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคลเซียมที่ลดลงค่อนข้างสูงคือร้อยละ 95.34 ซึ่งจะพิจารณาว่าตัวแปรอิสระใดควรใช้ในสมการพยากรณ์ต่อไป

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของการกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเติมโซเดียมคาร์บอเนตและเหวียงแยก

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9824
R Square	0.9650
Adjusted R Square	0.9534
Standard Error	4.2047
Observations	13

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	3	4391.6498	1463.883	82.799	0.0000
Residual	9	159.1182	17.6798		
Total	12	4550.7680			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	85.3103	1.4974	56.9721	0.0000	81.9229	88.6976	81.9229	88.6976
p	23.6533	1.9821	11.9333	0.0000	19.1694	28.1372	19.1694	28.1372
p ²	-11.2596	1.4365	-7.8380	0.0000	-14.5093	-8.0100	-14.5093	-8.0100
vt	9.6192	2.8894	3.3291	0.0088	3.0828	16.1555	3.0828	16.1555

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดจะนำมาพยากรณ์ ปริมาณแคลเซียมที่ลดลงได้หรือไม่ โดยการตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลง

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลง

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

จากตารางพบว่าค่าสถิติ F ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าสถิติ F ที่เปิดจากตารางแสดง ว่าปฏิเสธสมมติฐาน H_0 กล่าวคือ ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบค่าสถิติและความน่าจะเป็นของตัวทดสอบ T เพื่อทดสอบว่าควรจะใช้ค่าคงที่ และตัวแปรอิสระใด ในสมการพยากรณ์ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระตัวที่ i ไม่มีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลง

H_1 : ตัวแปรอิสระตัวที่ i มีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่ลดลง

การวิเคราะห์อาจดูจากค่าสถิติ T-Stat เทียบกับการเปิดจากตารางสถิติหรือค่าความน่าจะเป็น P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในที่นี้จะวิเคราะห์จากค่าความน่าจะเป็นโดยเลือกค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ สรุปตัวแปรที่นำมาใช้ในสมการพยากรณ์ได้ดังนี้

ตัวแปรอิสระ p มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 23.65

ตัวแปรอิสระ p^2 มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ -11.26

ตัวแปรอิสระ vt มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 9.61

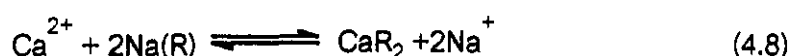
จุดตัดมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 85.31

สรุปสมการพยากรณ์ได้ดังนี้
$$Ca = 23.65p - 11.26p^2 + 9.62vt + 85.31 \quad (4.7)$$

เมื่อ Ca คือปริมาณแคลเซียมที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)

4.6 การกำจัดแคลเซียมโดยการแลกเปลี่ยนไอออน

การทดลองการกำจัดแคลเซียมโดยการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินที่ใช้เป็นเรซินชนิดกรดแก่ มีกลุ่มฟังก์ชันของหมู่ซัลโฟนิกที่อยู่ในรูปของโซเดียมไอออนเกิดปฏิกิริยาดังนี้



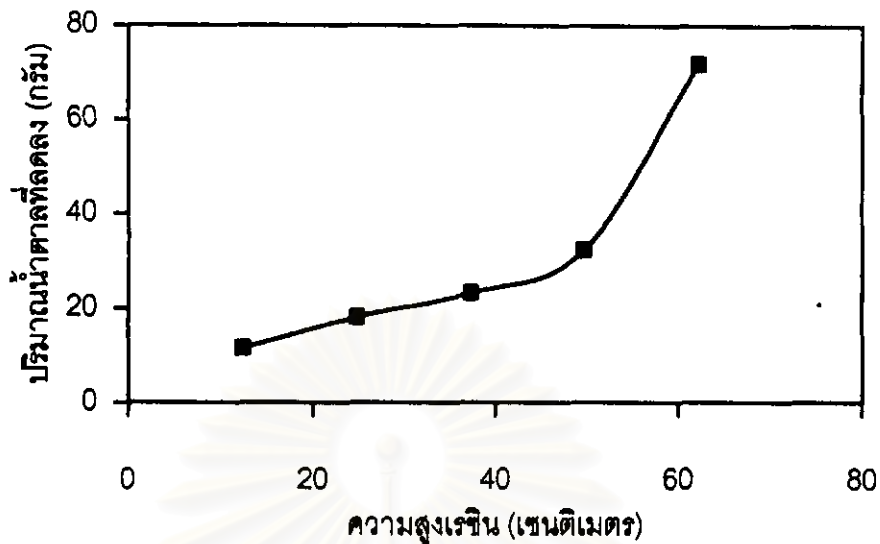
ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9 และ 4.10 นำไปเขียนกราฟได้ดังรูป 4.5

ตารางที่ 4.9 การกำจัดแคลเซียมโดยการแลกเปลี่ยนไอออน
 อัตราการไหลของกากน้ำตาล 30 มิลลิลิตรต่อนาที
 ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 2851.08-2931.36 ppm

ปริมาณเรซิน (มิลลิลิตร)	ความสูงเรซิน (เซนติเมตร)	ปริมาณแคลเซียมที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)			
		5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที
100	12.4	94.54	95.86	95.51	95.24
200	24.8	93.14	95.17	96.55	95.87
300	37.3	95.53	96.56	96.91	96.90
400	49.7	96.91	96.91	96.92	96.91
500	62.2	96.92	96.93	96.90	97.26

ตารางที่ 4.10 ปริมาณน้ำตาลที่ลดลงในการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน
 จากสารละลายกากน้ำตาล 1000 กรัม
 อัตราการไหลของกากน้ำตาล 30 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณ เรซิน (มิลลิลิตร)	ความสูง เรซิน (เซนติเมตร)	ปริมาณน้ำ ตาลก่อนผ่าน เรซิน (กรัม)	ปริมาณน้ำ ตาลหลังผ่าน เรซิน (กรัม)	ปริมาณ น้ำตาล ที่ลดลง (กรัม)	ปริมาณน้ำ ตาลที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)
100	12.4	131.95	120.3	11.65	8.83
200	24.8	130.90	112.7	18.2	13.90
300	37.3	128.30	105.0	23.3	18.16
400	49.7	129.95	97.65	32.3	24.85
500	62.2	129.95	58.05	71.9	55.33



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ลดลงกับความเร็ว

จากตารางที่ 4.9 พบว่าการกำจัดแคลเซียมโดยการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้ปริมาณแคลเซียมลดลงไปร้อยละ 95 ในทุกๆการทดลองถึงแม้ว่าปริมาณเรซินจะเพิ่มขึ้นก็ทำให้ปริมาณแคลเซียมที่ลดลงสูงขึ้นเพียงร้อยละ 1-2 เท่านั้น แต่จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อความเร็วของเรซินมากขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านในภาคน้ำตาลลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มเวลาสัมผัสระหว่างภาคน้ำตาลกับเรซินทำให้ปริมาณน้ำตาลลดลง ในภาคน้ำตาลนี้ใช้อัตราการไหลของภาคน้ำตาล 30 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ทดลองมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์เท่ากับ 9.07 ตารางเซนติเมตร ดังนั้นความเร็วของภาคน้ำตาลที่ผ่านเรซินเท่ากับ 3.3 เซนติเมตรต่อนาที

4.7 การหาอายุการใช้งานเรซิน

การทดลองนี้เป็นการทดลองหาอายุการใช้งานของเรซินว่าเรซินสามารถใช้งานร่วมกับภาคน้ำตาลนานเท่าใดเรซินจึงจะหมดกำลังไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้อีกได้ดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ปริมาณแคลเซียมที่เรซินแลกเปลี่ยนได้ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 77 และลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเรซินไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้อีกแสดง นั่นคือเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาทีควรต้องมีการฟื้นฟูกำลังเรซินเพื่อให้เรซินสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ตามเดิม ถ้าปล่อยให้โดยไม่มีกระบวนการฟื้นฟูกำลังเรซินก็จะทำให้แคลเซียมในภาคน้ำตาลมีปริมาณมากอันอาจเป็นสาเหตุให้เกิดตะกอนได้อีก

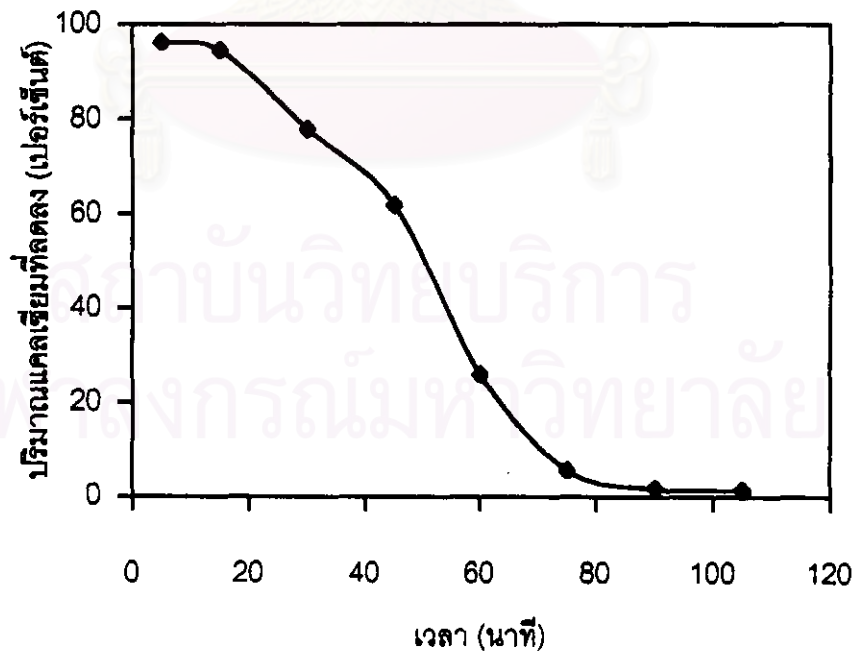
ตารางที่ 4.11 อายุการใช้งานเรซิน

ปริมาณเรซิน 100 มิลลิลิตร ความสูงเรซิน 12.4 เซนติเมตร

อัตราการไหลของกากน้ำตาล 30 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 2863.07-2871.79 ppm

การทดลอง	เวลาหลังกากน้ำตาลผ่านเรซิน (นาที)	ปริมาณแคลเซียมหลังผ่านเรซิน (ppm)	ปริมาณแคลเซียมที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)
1	ก่อน	-	-
2	5	108.47	96.22
3	15	158.62	94.47
4	30	633.25	77.92
5	45	1089.87	61.99
6	60	2123.12	25.97
7	75	2706.20	5.60
8	90	2816.87	1.76
9	105	2828.70	1.35



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมที่ลดลงกับเวลาหลังกากน้ำตาลผ่านเรซิน

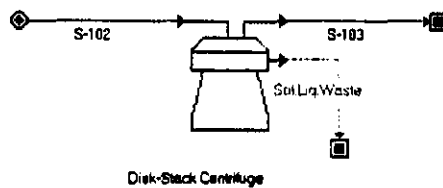
4.8 การจำลองภาวะการณ์การกำจัดแคลเซียมจากกากน้ำตาล

4.8.1 กระบวนการผลิตเอทิลแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล กำหนดให้เวลาปฏิบัติการใน 1 ปี เท่ากับ 7,920 ชั่วโมง เป็นกระบวนการแบบกะ ดังรูป 4.11 โดยใช้กากน้ำตาลจำนวน 800 ตัน ต่อ 1 กะ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียม 10,784 กิโลกรัม และสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ทราซหรือสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ ในกากน้ำตาลประมาณ 63,578 กิโลกรัม เจือจางด้วยน้ำให้มีปริมาณน้ำตาลร้อยละ 16-17 ในหน่วยปฏิบัติการ R-102 แยกตะกอนและสิ่งเจือปนต่างๆ ออก ในหน่วยปฏิบัติการ CF-101 ผ่านการให้ความร้อนเพื่อทำลายแบคทีเรียในหน่วยปฏิบัติการ ST-101 นำเข้าถังหมักพร้อมเติมยีสต์และอากาศที่หน่วยปฏิบัติการ F-101 หมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้เอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 7-8 ที่กระแสด S-112 ผ่านการแยกตะกอนอีกครั้งด้วยการเหวี่ยงแยกแบบจาน (Disk-Stack Centrifuge) เนื่องจากเป็นเครื่องเหวี่ยงแยกที่เหมาะสมกับกระบวนการทางชีวภาพ และโดยทั่วไปใช้กำจัดของแข็งแขวนลอยออกจากสารละลาย เมื่อกากน้ำตาลผ่านเข้าเครื่องเหวี่ยงแยกจะได้เป็น 2 วัฏภาค นำส่วนวัฏภาคเบา (กระแสด S-109) ประกอบด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 348,350 กิโลกรัม น้ำ 3,964,220 และแคลเซียมซัลเฟต 10,589 กิโลกรัม เก็บในถัง V-101 เพื่อกลั่นเป็นเอทิลแอลกอฮอล์แบบต่อเนื่องโดยในส่วนนี้จำลองภาวะการณ์โดยโปรแกรม PRO II ส่วนวัฏภาคหนัก (กระแสด S-121) ประกอบด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 4,468 กิโลกรัม น้ำ 50,853 แคลเซียมซัลเฟต 136 กิโลกรัม ชีวมวล 87,986 กิโลกรัม นำไปกลั่นแบบกะให้ได้เอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 35 ได้ผลการจำลองภาวะการณ์ดังภาคผนวก ข1

ในส่วนการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม PRO II กำหนดสารป้อนจากกระแสด S-106 โดยเป็นการกลั่นแบบต่อเนื่อง จากกระบวนการในระบบกะซึ่งใช้เวลานานที่สุดในถังหมักคือ 72.2 ชั่วโมงดังนั้นปริมาณสารป้อนที่ป้อนเข้าหอกกลั่นจะหารด้วย 72.2 ชั่วโมงเพื่อเข้ากลั่นแบบต่อเนื่อง สารป้อนในหอกกลั่นแบบต่อเนื่องประกอบด้วย น้ำ 3,054 กิโลโมลต่อชั่วโมง และ เอทิลแอลกอฮอล์ 105 กิโลโมลต่อชั่วโมง ใช้หอกกลั่นแบบสูญญากาศ ได้เอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 83.85 โดยโมลหรือร้อยละ 93 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 104.9 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการจำลองภาวะการณ์กำจัดตะกอนและแคลเซียมโดยวิธีการต่างๆ ซึ่งหน่วยปฏิบัติการจะติดตั้งหลังจากการนำสิ่งเจือปนชนิดอื่นๆ ออกไปแล้ว (หลังหน่วยปฏิบัติการ CF-101) ซึ่งถือว่าเป็นต้นกระบวนการของการผลิตเอทิลแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล

4.8.2 การกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเหวี่ยงแยก

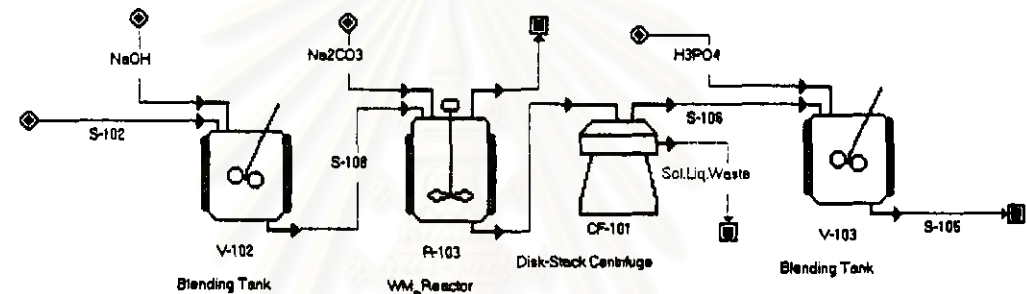


รูปที่ 4.7 การกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเหวี่ยงแยก

จากรูปกระแส S-102 คือกระแสที่ออกจากกากน้ำตาลเจือจางที่ผ่านการแยกของแข็งแขวนลอยออกแล้วจากรูป 4.11 ประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟต 10,725 กิโลกรัม มีความเข้มข้นของน้ำตาลในกากน้ำตาลร้อยละ 16-17 เข้าเครื่องเหวี่ยงแยกแบบจาน กำหนดค่าซิกมาแฟกเตอร์สูงสุด²⁵ (Maximum Sigma Factor) เท่ากับ 94,500 ตารางเมตรหรือความเร็วเท่ากับ 4,620 รอบต่อนาที เวลาในการเหวี่ยง 6.5 นาที จากสมการที่ 4.1 จะกำจัดแคลเซียมได้ร้อยละ 21.55 ซึ่งในโปรแกรมนี้ต้องป้อนข้อมูลปริมาณของสารที่ต้องการเหวี่ยงแยกออกเป็นค่าร้อยละ ดังนั้นจึงต้องป้อนข้อมูลนี้จากพื้นฐานสมการที่ได้จากห้องปฏิบัติการ หลังจากผ่านเครื่องเหวี่ยงแยกได้ 2 วัฏภาค วัฏภาคเบาประกอบด้วย แคลเซียมซัลเฟต 8,414 กิโลกรัม กกลูโคส 812,850 กิโลกรัม และน้ำ 3,921,510 กิโลกรัม ที่จะเข้าสู่กระบวนการตั้งแต่การให้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียต่อไป ส่วนวัฏภาคหนักประกอบด้วย แคลเซียมซัลเฟต 2,311 กิโลกรัม น้ำตาล 95.25 กิโลกรัม และ น้ำ 460 กิโลกรัม การผลการทดลองดังภาคผนวก ข2

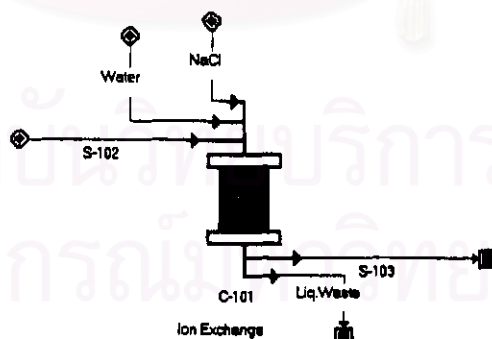
4.8.3 การกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเติมสารเคมีและเหวี่ยงแยก จากรูปที่ 4.8 กระแส S-102 คือกระแสที่ออกจากกากน้ำตาลเจือจางที่ผ่านการแยกของแข็งแขวนลอยออกแล้วจากรูป 4.11 ประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟต 10,725 กิโลกรัม มีความเข้มข้นของน้ำตาลในกากน้ำตาลร้อยละ 16-17 การจำลองภาวะการหมักในส่วนนี้เริ่มจากนำกากน้ำตาลผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 9 จากรูปที่ 4.1 พบว่าต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ 2.8 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.11 กรัม ในกากน้ำตาล 50 มิลลิลิตร ดังนั้นจากปริมาณกากน้ำตาล 4,446,045 ลิตร ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 9,780 กิโลกรัม จากนั้นจึงเติมโซเดียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนของแคลเซียมในกากน้ำตาลต่อโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 1:1.3 เพื่อให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต เหตุที่ต้องทำเช่นนี้เนื่องจากการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 9-10 ถ้าเติมเพียงแต่โซเดียมคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียวจะต้องสิ้นเปลืองสารในปริมาณมาก แต่การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จะช่วยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นได้รวดเร็วกว่าจากปริมาณแคลเซียม 10,725 กิโลกรัม ดังนั้นเติมโซเดียม

คาร์บอนเนต 13,943 กิโลกรัม เข้าเครื่องเหวี่ยงแยกแบบจาน กำหนดค่าซิกม่าแพกเตอร์สูงสุด เท่ากับ 94,500 ตารางเมตร เวลาในการเหวี่ยง 6.5 นาที จากสมการที่ 4.7 จะกำจัดแคลเซียมได้ร้อยละ 85.16 ดังนั้นในการจำลองภาวะการณ์ระบบนี้จึงให้กำจัดแคลเซียมได้ทั้งหมดร้อยละ 85.16 จึงป้อนข้อมูลให้แคลเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอนเนตได้ร้อยละ 85.16 ในหน่วยปฏิบัติการ R-103 และเหวี่ยงแยกแคลเซียมคาร์บอนเนตออกได้ทั้งหมดเพื่อให้ทั้งระบบกำจัดแคลเซียมได้ร้อยละ 85.16 หลังจากเหวี่ยงแยกวัฏภาคเบา (กระแสด S-106) ประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟตเหลือ 1,518 กิโลกรัม ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 17.069 ส่วนวัฏภาคหนักประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟต 73 กิโลกรัม แคลเซียมคาร์บอนเนต 6,715 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 78 จากนั้นนำวัฏภาคเบาปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยกรดฟอสฟอริกดังรูปที่ 4.8 ผลการทดลองดังภาคผนวก ข.3



รูปที่ 4.8 การกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเติมสารเคมีและเหวี่ยงแยก

4.8.4 การกำจัดแคลเซียมโดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน

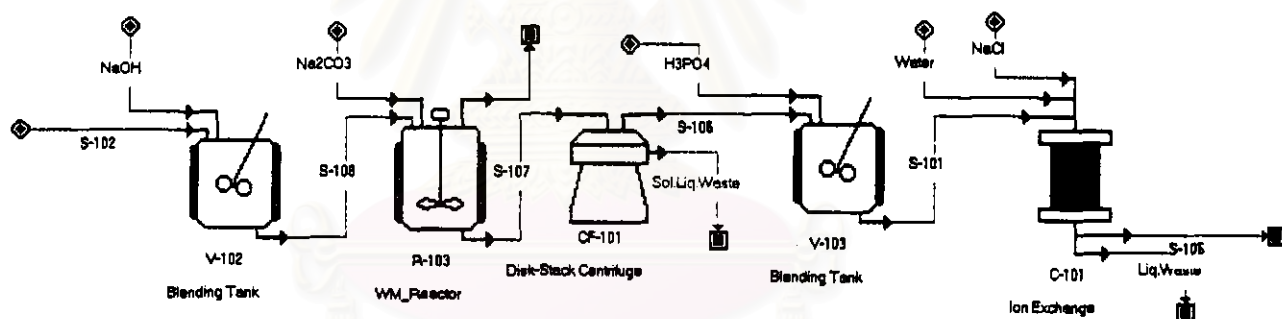


รูปที่ 4.9 การกำจัดแคลเซียมโดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน

จากรูปกระแสด S-102 คือกระแสที่ออกจากกากน้ำตาลเจือจางที่ผ่านการแยกของแข็ง แขนงลอยออกแล้วจากรูป 4.11 ประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟต 10,725 กิโลกรัม มีความเข้มข้นของน้ำตาลในกากน้ำตาลร้อยละ 16-17 การจำลองภาวะการณ์ในส่วนนี้ผ่านกากน้ำตาลเข้าหน่วยแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินที่มีความจุ 2.0 มิลลิกรัมลิตร ผ่านลงในคอลัมน์แลกเปลี่ยน

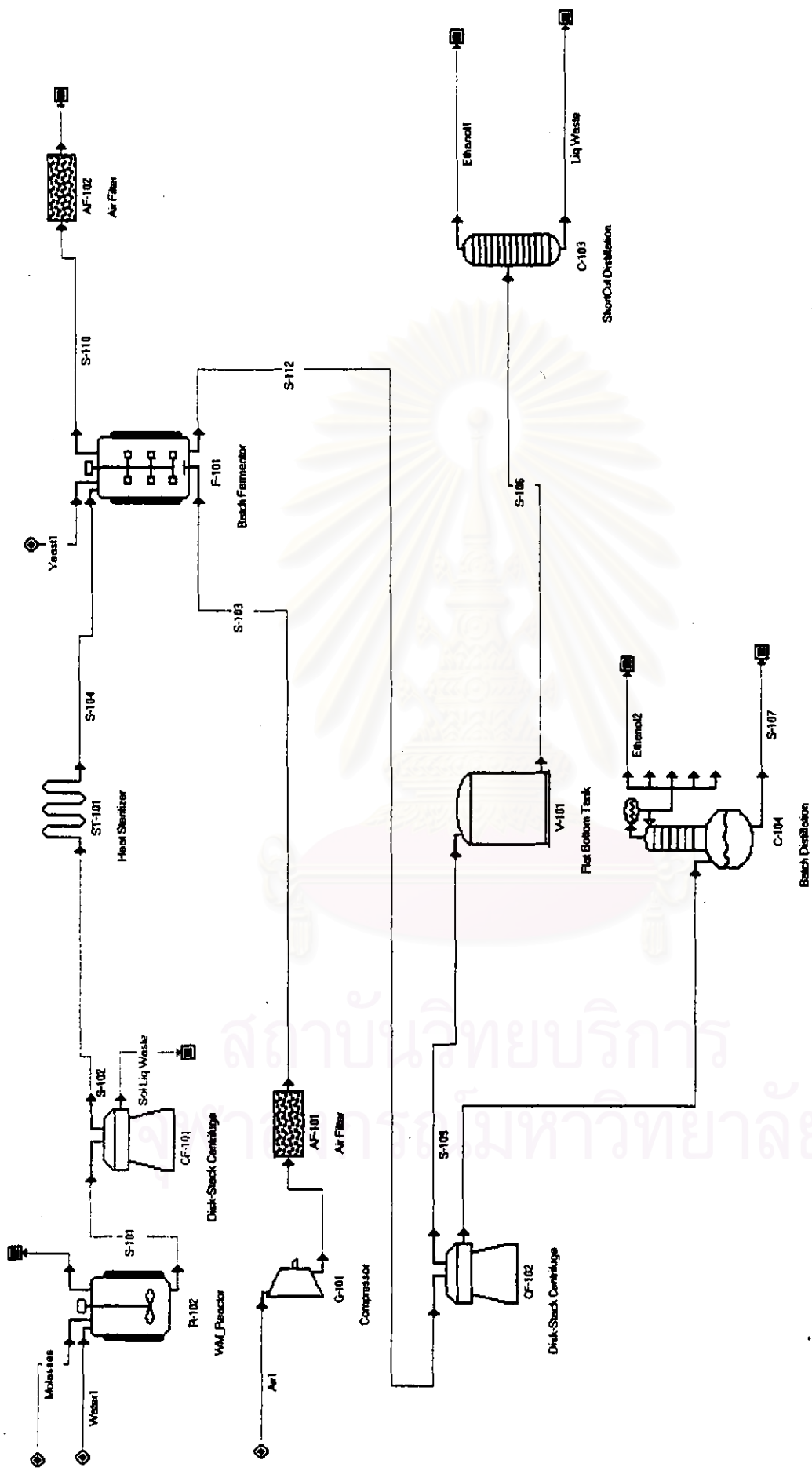
ให้ออนให้เวลาที่กากน้ำตาลอยู่ในเรซินน้อยกว่า 4 นาที ในหน่วยปฏิบัติการนี้โปรแกรมต้องกำหนดร้อยละของแคลเซียมที่เรซินจะแลกเปลี่ยนได้จากการวิจัยในห้องปฏิบัติการพบว่าเรซินสามารถลดปริมาณแคลเซียมได้ประมาณร้อยละ 96 ส่วนปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการฟื้นอำนาจเรซินได้จากการปรับค่าโดยโปรแกรมผลการทดลองดังภาคผนวก ข.4

4.8.5 การกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเติมสารเคมี เหวียงแยก และแลกเปลี่ยนไอออน จากรูป กระแส S-102 คือกระแสที่ออกจากกากน้ำตาลเจือจางที่ผ่านการแยกของแข็งแขวนลอยออกแล้ว จากรูป 4.11 ประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟต 10,725 กิโลกรัม มีความเข้มข้นของน้ำตาลในกากน้ำตาลร้อยละ 16-17 การจำลองภาวะการณ์ในส่วนนี้เริ่มต้นกระบวนการเช่นเดียวกับการกำจัดแคลเซียมโดยการเติมสารเคมีและเหวียงแยกโดยกำหนดให้กระบวนการนี้ลดปริมาณแคลเซียมได้ร้อยละ 85.16 แต่ได้เพิ่มหน่วยการแลกเปลี่ยนไอออนเข้าไปเพื่อให้สามารถกำจัดแคลเซียมได้มากขึ้นโดยกำหนดให้หน่วยปฏิบัติการแลกเปลี่ยนไอออนลดปริมาณแคลเซียมได้ร้อยละ 96 ดังรูปที่ 4.10 ผลการทดลองดังภาคผนวก ข.5



รูปที่ 4.10 การกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเติมสารเคมี เหวียงแยก และแลกเปลี่ยนไอออน

จากผลการจำลองภาวะการณ์สามารถสรุปราคาเครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ได้ดังตารางที่ 4.12 โดยราคาสารเคมีที่ใช้มีราคาดังตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.11 กระบวนการผลิตเอทิลแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล

ตารางที่ 4.12 ราคาอุปกรณ์และสารเคมีจากการจำลองภาวะการมีกำจัดแคลเซียมด้วยวิธีต่างๆ ปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 10784.42 กิโลกรัม

วิธีการ	ราคา อุปกรณ์ (บาท)	ราคาเริ่ม (บาท)	ราคาสารเคมี (บาทต่อปี)				ปริมาณแคลเซียม ที่เหลือเข้าหอกลั่น (กิโลกรัมต่อปี)
			NaOH	Na ₂ CO ₃	H ₃ PO ₄	NaCl	
1. เหวียงแยก	18,981,000	-	-	-	-	-	9.26×10^5
2. เติมสารเคมีและเหวียงแยก	105,820,000	-	8,880,000	8,177,000	32,264,000	-	1.67×10^5
3. แลกเปลี่ยนไอออน	191,475,000	74,000	-	-	-	802,382,000	4.72×10^4
4. เติมสารเคมี เหวียงแยก และแลกเปลี่ยนไอออน	141,636,000	14,615	8,621,000	7,955,000	31,376,000	129,315,000	7.08×10^3

หมายเหตุ: จำนวนจากอัตราแลกเปลี่ยน 1 ดอลลาร์เท่ากับ 37 บาท

ตารางที่ 4.13 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการจำลองภาวะการณ

สารเคมี	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)
โซเดียมไฮดรอกไซด์	3.7
โซเดียมคาร์บอเนต	5.25
กรดฟอสฟอริก	12.21
โซเดียมคลอไรด์	3.3

จากตารางที่ 4.12 พบว่าการกำจัดแคลเซียมโดยวิธีเหวี่ยงแยกเพียงอย่างเดียวไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานเนื่องจากเหลือปริมาณแคลเซียมถึง 9.26×10^5 กิโลกรัมต่อปี ส่วนวิธีการอื่นๆ สามารถลดปริมาณแคลเซียมได้แตกต่างกันไปดังนี้

ให้การจำลองภาวะการณใน 1 ปี มีระบบปฏิบัติการทั้งหมด 7920 ชั่วโมง ในแต่ละกะใช้เวลา 72 ชั่วโมง ดังนั้นใน 1 ปีจะปฏิบัติการทั้งหมด 110 กะ จะได้ปริมาณแคลเซียมที่เหลือเข้าหอกลับและเวลาที่ต้องหยุดปฏิบัติการดังตารางที่ 4.14 ในการหยุดปฏิบัติการแต่ละครั้งต้องทำความสะอาดหอกลับ 2 วัน

ตารางที่ 4.14 จำนวนครั้งที่ต้องหยุดปฏิบัติการในการทำความสะอาดหอกลับที่วิธีการกำจัดแคลเซียมวิธีต่างๆ

วิธีการ	ปริมาณแคลเซียมที่เหลือเข้าหอกลับ (กิโลกรัมต่อปี)	จำนวนที่ต้องหยุดปฏิบัติการ		จำนวนวันที่ใช้ในการทำความสะอาดหอกลับต่อปี
		ครั้งต่อปี	ปีต่อครั้ง	
1. ไม่ใช้กระบวนการกำจัดแคลเซียม	1.18×10^6	12	0.08	24
2. กระบวนการเติมสารเคมีและเหวี่ยงแยก	1.67×10^5	1.7	0.59	4
3. กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	4.72×10^4	0.48	2.08	-
4. กระบวนการเติมสารเคมี เหวี่ยงแยก และแลกเปลี่ยนไอออน	7.08×10^3	0.07	14.29	-

จากตารางที่ 4.12 และ 4.14 พบว่าระบบที่เหมาะสมในการกำจัดแคลเซียมคือ กระบวนการเติมสารเคมีและเหรียญแยกเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องลงทุนสูงมาก และสามารถลดระยะเวลาการหยุดปฏิบัติการได้จาก 12 ครั้งใน 1 ปี เหลือเพียง 2 ครั้งใน 1 ปี ส่วนกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และการเติมสารเคมี เหรียญแยก และแลกเปลี่ยนไอออนถึงแม้จะลดปริมาณแคลเซียมได้มากขึ้นแต่การลงทุนก็สูงขึ้นเช่นกัน แม้ว่าระยะเวลาในการหยุดปฏิบัติการจะยืดไปถึง 2.08 และ 14.29 ปีตามลำดับ เนื่องจากใน 1 ปี ระบบอุตสาหกรรมก็ต้องมีการหยุดปฏิบัติการเพื่อทำความสะอาดและตรวจสภาพของเครื่องมืออุปกรณ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย