



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องต้นแบบผลิตไคติน-โคโตซานเพื่อใช้ในการแพทย์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร.ชเนศ รัตนวิไล

รศ.ดร.สัณห์ชัย กลิ่นพิกุล

ผศ.ดร.อุตสาห์ จันท์อำไพ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้ประเภททั่วไป
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบเครื่องต้นแบบและปรับปรุง กระบวนการผลิตโคโคซาน จากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกซึ่งเป็นเศษเหลือทิ้งของโรงงานผลิตอาหารทะเลแช่แข็งด้วยต้นทุนต่ำ โดยมุ่งเน้นการนำผลิตผลไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตวัสดุทางการแพทย์ โดยเริ่มศึกษาเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมจากห้องปฏิบัติการแล้วทำการออกแบบเครื่องต้นแบบขนาด 30 ลิตร โดยเริ่มจากการเตรียมเปลือกกุ้งเพื่อนำมากำจัดเกลือแร่ (Demineralization) ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 M สัดส่วน 15:190 (น้ำหนัก:ปริมาตร) จากนั้นกำจัดโปรตีน (Deproteinization) ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 M สัดส่วน 1:13 (น้ำหนัก:ปริมาตร) นำโคโคซานที่ได้ไปทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิติก (Deacetylation) ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 50% (น้ำหนัก:ปริมาตร) ส่วนกระดองปลาหมึกไม่มีการกำจัดเกลือแร่ ผลการศึกษาพบว่าได้โคโคซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกจากเครื่องต้นแบบประมาณ 15.8 และ 22.0 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโคโคซานเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบตามลำดับ ใช้เวลาในการผลิต 15 ชั่วโมงสามารถผลิตโคโคซานได้ 1 กิโลกรัม โดยพบว่าผลผลิตจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกมีน้ำหนักโมเลกุล 2.33×10^6 และ 5.07×10^6 คาลคัลตามลำดับ ระดับการกำจัดหมู่อะซิติก 98.5 และ 96.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีปริมาณเถ้า 0.24 และ 0.28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะตกค้างพบว่ามีส่วนประกอบของนิกเกิล (Ni) 2.91 และ 5.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โครเมียม (Cr) 13.88 และ 12.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดสำหรับใช้งานทางการแพทย์พบว่าคุณลักษณะของผลผลิตจากเครื่องต้นแบบมีมาตรฐานใกล้เคียงกัน โดยมีราคาประมาณ 1,600 บาทต่อกิโลกรัม และสามารถนำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ได้อีก 2 ครั้ง ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง ต้นทุนการแปรรูปประมาณ 350 บาทต่อกิโลกรัมโคโคซานและสารเคมีที่เหลือจากการกำจัดโปรตีนและการกำจัดหมู่อะซิติก เมื่อนำมาปรับสภาพให้เป็นกลางจะมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม 0.42, 3.23, 2.15 และ 0.03, 6.26, 3.33 กรัมในสารละลาย 100 มิลลิลิตร ตามลำดับซึ่งสามารถนำไปจำหน่ายเป็นปุ๋ยน้ำเคมีได้ สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุนพบว่าใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น 370,000 บาท มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 2,261,857 บาท อัตราผลตอบแทนการลงทุน (IRR) เท่ากับ 217 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าค่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่กำหนดไว้ (MARR) ซึ่งเท่ากับผลรวมของอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (15%) อัตราเงินเฟ้อ (5%) และค่าเสี่ยง (10%) รวมเท่ากับ 25% และมีระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period) 6 เดือน จึงสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะสร้างถึงปฏิกรณ์ผลิตโคโคซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกเพื่อเพิ่มมูลค่าในเชิงพาณิชย์ได้

Abstract

This study was the designing of a prototype reactor to produce a superior quality chitosan from prawn shells and squid pens which were by-products of frozen food industries. The chitosan produced could be used as a raw material for medical use to reduce production cost. The laboratory experiment was conducted to achieve the most appropriate method in order to design a prototype reactor with a production capacity of 30 litres. 1 M of hydrochloric acid was used for prawn shells-decalcification with the ratio of weight:volume at 15:190. Deproteinization was subsequently conducted using 1 M of potassium hydroxide with the ratio of weight:volume at 1:13. The chitin was continued to deacetylate using 50% of potassium hydroxide with the ratio of weight:volume at 1:15. Similar method without decalcification was repeated on squid pens. Percent yields from a prototype reactor from prawn shells and squid pens were 15.8 and 22.0, respectively. The total reaction time to produce 1 kilogram of chitosan was 15 hours. The quality of chitosan produced was acceptable for medical use. The average molecular weights of chitosan from prawn shells and squid pens were 2.33×10^6 and 5.07×10^6 daltons, degree of deacetylation were 98.5 and 96.7 %, heavy metals such as nickel (Ni) were 2.91 and 5.89 milligrams per kilogram ; chromium (Cr) were 13.88 and 12.90 milligrams per kilogram, respectively. The market selling price of the chitosan was approximately 1,600 Baht per kilogram and also the potassium hydroxide could be reused twice resulting to reduce cost. The unit variable cost was 350 Bath per kilogram of chitosan. Residual chemical from deproteinization and deacetylation after neutralization consisted of 0.42, 3.23, 2.15 and 0.03, 6.26, 3.33 grams of nitrogen, phosphorus and potassium in 100 milliliters, respectively. Therefore, the residuals could be sold or used as chemical liquid fertilizer. The prototype reactor was designed and constructed with a production capacity of 30 litres per batch. The capital investment of the reactor was 370,000 Baht. The net present value (NPV) was 2,261,877 Baht. The internal rate of return (IRR) was 217 % whereas the minimum attractive rate of return (MARR) approximately 25% including interest rate 15%, inflation rate 5%, and risk 10%. Payback period was about 6 months. Finally, it could be concluded that there was a very high possibility to produce a medical-grade chitosan from prawn shells and squid pens at industrial scale.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(5)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(10)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เทคโนโลยีการผลิตไคตินและไคโตซาน	8
2.2 การใช้ไคโตซานในทางการแพทย์	13
2.3 การผลิตไคโตซานในงานวิจัย	14
2.4 รูปแบบเครื่องจักรกล	15
2.5 ขั้นตอนการออกแบบ	21
2.6 ขั้นตอนการกำหนดรูปทรงและขนาดเครื่องจักรกล	24
2.7 การออกแบบเพื่อทนอุณหภูมิสูง	26
2.8 การออกแบบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน	31
3 วิธีการวิจัย	37
3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ NaOH และ KOH ในขั้นตอนการสกัด โปรตีนและปฏิกิริยา Deacetylation เพื่อการเตรียมไคโตซานจากเปลือก กุ้งและกระดองปลาหมึก	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ประเมินและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้ซ้ำ	42
3.3 ประเมินและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือไปใช้ประโยชน์ต่อเนื่อง (ทำปุ๋ยน้ำ)	42
3.4 ศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของไคตินและไคโตซานที่ผลิตด้วยเครื่องผลิต	42
4 การออกแบบและสร้างเครื่องผลิต ไคติน-ไคโตซาน	45
4.1 การออกแบบรูปทรงและขนาดของเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน	45
4.2 การออกแบบชุดกวนของเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน	47
4.3 การออกแบบระบบการให้ความร้อน	57
4.4 การสร้างแบบแปลนเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน	61
4.5 การประเมินราคาและสร้างเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน	65
5 ผลการทดลองและบทวิจารณ์	67
5.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ NaOH และ KOH	67
5.2 ประเมินและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้ซ้ำ	69
5.3 ประเมินและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือไปใช้ประโยชน์ต่อเนื่อง (ทำปุ๋ยน้ำ)	72
5.4 ศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของไคตินและไคโตซานที่ผลิตด้วยเครื่องผลิต	74
6 การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ	79
6.1 ประมาณการเงินลงทุนของโครงการ	82
6.2 การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก	99
ภาคผนวก ข	100
ภาคผนวก ค	101
ภาคผนวก ง	102
ภาคผนวก จ	103
ภาคผนวก ฉ	104

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
2-1	แหล่งวัตถุดิบสำคัญของไคติน	5
4-1	ปริมาณ $N_{p(re)}n$ สำหรับใบพัดแบบต่างๆ	48
4-2	ตัวประกอบความถี่	54
4-3	แสดงรายละเอียดแบบเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน	63
4-4	แสดงรายละเอียดส่วนประกอบภายในของเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน (exploded drawing)	65
5-1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไคโตซานด้วย NaOH และ KOH	67
5-2	เปรียบเทียบคุณภาพของไคโตซานที่ผลิตด้วย NaOH และ KOH	68
5-3	เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนจากสารละลายที่ใช้แล้ว	69
5-4	เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้แล้ว	69
5-5	สมบัติของไคติน ไคโตซานจากกระดองปลาหมึกที่ผลิตในระดับ ห้องปฏิบัติการ	71
5-6	สมบัติของไคติน ไคโตซานจากเปลือกกุ้งที่ผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ	72
5-7	ผลผลิตการสกัดไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกที่ผลิต ด้วยเครื่องผลิต	75
5-8	ปริมาณแฉะของไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกที่ผลิต ด้วยเครื่องผลิต	75
5-9	ปริมาณไนโตรเจนของไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดอง ปลาหมึกที่ผลิตด้วยเครื่องผลิต	76
5-10	น้ำหนักโมเลกุลและระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานจากเปลือกกุ้ง และกระดองปลาหมึกที่ผลิตด้วยเครื่องผลิต	76
5-11	ปริมาณนิกเกิล (Ni) และโครเมียม (Cr) ในไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดอง ปลาหมึกที่ผลิตด้วยเครื่องผลิต	78
6-1	แสดงการประมาณการกระแสเงินสด ตั้งแต่ปีแรกจนถึงสิ้นสุดโครงการ	85

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
6-2	แสดงการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ	87
6-3	แสดงการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนการลงทุน	89

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า	
2-1	โครงสร้างของเซลล์ลูโลส	6
2-2	โครงสร้างของไคติน	6
2-3	โครงสร้างของไคโตซาน	7
2-4	การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในช่วงเวลาต่างๆ	16
2-5	การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องของแบบท่อไหลและแบบ ถังกวนอูคมติ	17
2-6	การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเฟดแบทช์ในช่วงเวลาต่างๆ	17
2-7	ถังและชุดกวนผสมแบบแนวตั้งทรงกระบอก (Vertical, Cylindrical Vessel)	19
2-8	ถังและชุดกวนผสมแบบเคลื่อนย้ายได้ (Portable)	19
2-9	ถังและชุดกวนผสมแบบกวนด้านข้างถึง (Side-entering Mixers)	20
2-10	แบบมาตรฐานถังกวนผสม	20
2-11	แผนภาพเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกักร้อนของเหล็กกล้าสเตนเลส	35
4-1	เพลลาอยู่ภายใต้แรงต่างๆ	51
4-2	เพลลาที่ออกแบบภายใต้แรงต่างๆ	55
4-3	แสดงแบบเครื่องต้นแบบผลิตไคโตซาน	62
4-4	แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องต้นแบบผลิตไคโตซาน (exploded drawing)	64
4-5	เครื่องต้นแบบผลิตไคโตซาน	66
5-1	กราฟแสดงเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดหมู่อะซิติก (%DD) ของไคโตซานที่ผลิตด้วยสารละลาย KOH ใหม่และ KOH ที่ใช้ซ้ำ หนึ่งครั้ง ที่เวลาต่างๆ	70
5-2	กราฟแสดงระดับการกำจัดหมู่อะซิติก (%DD) ของไคโตซาน โดยใช้สารละลาย KOH ซ้ำหลายๆครั้ง	71

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
5-3	ไคโตซานที่ผลิตจากกระดองปลาหมึกด้วยเครื่องผลิต	77
5-4	ไคโตซานที่ผลิตจากเปลือกกุ้งด้วยเครื่องผลิต	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นผู้นำด้านการผลิตอาหารของโลก มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศอยู่ไม่น้อย โดยเฉพาะการแปรรูปสัตว์น้ำอันได้แก่ ปลา กุ้ง ปู ปลาหมึก โดยส่งออกกุ้งประมาณ 350,000-500,000 ตันต่อปี คิดเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณสัตว์น้ำทั้งหมด สร้างมูลค่าประมาณปีละ 54,000-74,000 ล้านบาทต่อปี ส่งออกปลาหมึกประมาณ 150,000-180,000 ตันต่อปี คิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณสัตว์น้ำทั้งหมด สร้างมูลค่าประมาณปีละ 9,000-10,000 ล้านบาทต่อปี (กรมประมง, 2548) ในกระบวนการแปรรูปกุ้งจะเกิดเศษเหลือจากส่วนหัว เปลือกหลังและเศษหางกุ้ง เช่น กุ้งเค็ดหัวจะเกิดเศษเหลือ 38 เปอร์เซ็นต์ กุ้งเนื้อไว้หางจะเกิดเศษเหลือ 45 เปอร์เซ็นต์ กุ้งเนื้อจะเกิดเศษเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักตัว และปลาหมึกจะเกิดเศษเหลือจากส่วนกระดองและทางเดินอาหารประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ (สุพจน์ หารหนองบัว และคณะ, 2546) แม้ว่าสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์แต่ก็นับว่ามีมูลค่าต่ำ ทั้งยังก่อให้เกิดมลภาวะถ้ามีการจัดการไม่เหมาะสม ดังนั้นการแปรรูปเศษเหลือเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้มากกว่านี้ก็จะเป็แนวทางสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษเหลือจากกระบวนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง

เปลือกกุ้งมีส่วนประกอบสำคัญเป็นโปรตีนประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เกลือแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตเรียกว่า ไคติน (chitin) ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ แกนปลาหมึกมีส่วนประกอบเป็นโปรตีนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ไคตินประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ ไชมันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์และเถ้าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ (Kurita *et al.*, 1979) ซึ่งไคตินทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันอันตรายให้กับกุ้ง และเป็นแกนร่างให้กับปลาหมึกและเนื่องจากเป็นสารที่มีอยู่และเกิดขึ้นในธรรมชาติ ไคตินจึงเป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมในรูปของสารที่ไม่ย่อยสลาย ซึ่งเป็นข้อดีหากจะมีการนำมาประยุกต์ใช้ในรูปของเครื่องอุปโภคบริโภค หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามการนำไคตินมาใช้ประโยชน์นั้นทำได้ยากเนื่องจากไคตินไม่สามารถละลายในสารละลายทั่วไป ดังนั้นจึงควรนำไคตินมากำจัดหมู่อะซิติก (acetyl) ออกจากโมเลกุลได้อนุพันธ์ที่เรียกว่าไคโตซาน (chitosan) ซึ่งสามารถละลายในสารละลายได้หลายชนิด เช่น

กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิโนอิก กรดออกซาลิก กรดมาโลนิก กรดแลกติก กรดไพรูวิก (สุทรวัฒน์ เบญจกุล, 2533)

โคโคซานมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์เฉพาะตัวหลากหลายขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 3 ประการ คือ ขนาดหรือน้ำหนักของโมเลกุล (molecular weight, MW) ระดับการกำจัดหมู่อะซิติกจากโมเลกุลของโคติน (presence degree of deacetylation, %DD) และแหล่งที่มาของโคตินตั้งต้น จากความหลากหลายดังกล่าวจึงมีผู้ศึกษาเพื่อนำโคโคซานไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่น ในทางการแพทย์ใช้เป็นวัสดุปิดบาดแผลเร่งการสมานแผล (wound healing) และเร่งการหยุดไหลของเลือด (haemostasis) (มณฑา จำริญรักษ์, 2544) ในด้านการเกษตรใช้เป็นสารการกระตุ้นการเจริญเติบโต สารต้านทานโรค สารยึดอายุการเก็บรักษาผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว (ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์, 2545) ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ และในโรงงานอุตสาหกรรมใช้เป็นสารเร่งการตกตะกอนน้ำเสีย (สุธี รัตนะ, 2545) เป็นต้น

ดังนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพในการใช้โคโคซาน และให้มีการประยุกต์ใช้ให้ขยายตัวออกเป็นวงกว้างมากยิ่งขึ้น การผลิตโคโคซานให้ได้ปริมาณมาก มีคุณภาพ และต้นทุนต่ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำการวิจัยศึกษา โดยต้องทำการศึกษาระบวนการในการผลิตโคโคซานในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นแนวคิดในการออกแบบ แล้วจึงสร้างเครื่องต้นแบบในการผลิตโคโคซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกเพื่อประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

การผลิตโคโคซานสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ การผลิตโดยเอ็นไซม์ การผลิตจากจุลินทรีย์และการผลิตทางเคมี ซึ่งพบว่าการผลิตทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด โดยสารเคมีที่ใช้ในการผลิตหลักคือด่าง (alkali solution) โดยเฉพาะ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะใช้ปริมาณมากจึงมีผลทำให้ต้นทุนด้านการผลิตสูงและต้องทำให้มีสภาพเป็นกลาง (neutralization) ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการเลือกใช้สารเคมีที่สามารถลดต้นทุนและใช้ประโยชน์จากของเสียได้จึงเป็นสิ่งจำเป็นจะต้องศึกษา จากการค้นคว้าพบว่า โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ก็มีการนำมาใช้ในการผลิต และสารเคมีที่ใช้แล้วมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาทำเป็นปุ๋ยน้ำได้ ดังนั้นจึงได้ทดลองเปรียบเทียบการผลิตโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ว่าจะสามารถให้คุณสมบัติของโคโคซานเช่นเดียวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือไม่ จากนั้นจะศึกษาการนำสารเคมีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ส่วนที่ไม่สามารถใช้อีกจะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาทำเป็นปุ๋ย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการผลิตโคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกให้มีคุณภาพสูง
- 1.2.2 ศึกษาการใช้ประโยชน์สารเคมีในกระบวนการผลิตโคโตซานอย่างต่อเนื่อง
- 1.2.3 ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบผลิตโคโตซานขนาด 30 ลิตรต่อรอบการผลิต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษากระบวนการผลิตโคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกด้วยวิธีทางเคมีในระดับห้องปฏิบัติการที่สามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ซ้ำและสารเคมีที่เหลือใช้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อเนื้อได้ นำสภาวะกระบวนการผลิตที่ได้มาออกแบบและสร้างเครื่องผลิตโคติน-โคโตซาน ขนาดการผลิตโคโตซาน 1 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต ที่มีคุณภาพสูงและมีความคงที่ของขนาดโมเลกุล (molecular weight) และระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (degree of deacetylation, % DD) เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตโคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึก
- 1.4.2 ทดสอบการผลิตด้วยวิธีการผลิตทางเคมีในระดับห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบการผลิตโดยใช้สารละลายต่าง ๆ ทั่วไปคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับสารละลายต่าง ๆ ที่มีความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือไปใช้ประโยชน์ต่อเนื้อ คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยศึกษาการใช้สารละลายซ้ำ และประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นป้อน้ำ
- 1.4.3 นำสภาวะการผลิตโคโตซานในระดับห้องปฏิบัติการมาใช้ในการกำหนดลักษณะจำเพาะของเครื่องผลิตโคติน-โคโตซาน ศึกษารายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็น ออกแบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 2.0 และส่งแบบเครื่องต้นแบบเพื่อทำการประเมินราคาจากผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องผลิต
- 1.4.4 ส่งแบบให้ผู้ประกอบการเพื่อสร้างเครื่อง

1.4.5 ทดสอบการผลิตไคโตซานด้วยเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซานตามสภาวะการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ ตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ไคโตซานที่ผลิตได้แก่ เปอร์เซ็นต์ผลผลิต ปริมาณเด้า ปริมาณไนโตรเจน น้ำหนักโมเลกุล ระดับการกำจัดหมู่อะซิติก และปริมาณโลหะหนักที่ตกค้างในไคโตซาน

1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย รวมทั้งข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 สามารถลดปริมาณของเสียจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำ

1.5.2 เพิ่มมูลค่าวัสดุเศษเหลือจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำ

1.5.3 สามารถผลิตไคโตซานคุณภาพสูงเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น ด้านการแพทย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นพบไคตินเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1811 โดย Henri Braconnot ค้นพบไคตินในส่วนที่เหลือจากการสกัดราด้วยน้ำและให้ชื่อว่า “fugine” ต่อมาในปี ค.ศ. 1823 Antoine Odier ได้แยกสารจากส่วน elytra ของแมลงและให้ชื่อว่า “chitine” หรือ “chitin” และพบว่าสารนี้เป็นรูปแบบหนึ่งของเซลลูโลสและไม่พบในโตรเจน ในปีเดียวกัน Lassaign และ Payen ได้ตรวจพบไนโตรเจนในไคติน ต่อมาในปี ค.ศ. 1859 Rought ได้นำไคตินมากำจัดหมู่อะซิติลได้โคโตซาน (Muzzarelli, 1985)

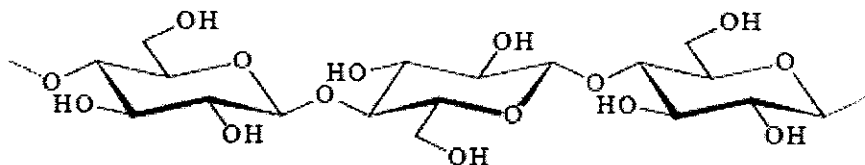
ไคตินเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่พบได้ในสัตว์ เป็นแหล่งวัสดุชีวภาพหลัก พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (cellulose) หรือพอลิแซคคาไรด์จากพืช โดยสามารถแยกสกัดได้จากเปลือกของสัตว์ที่มีปล้องในตระกูล crustacean จำพวกกุ้ง ปู ปลาหมึก เป็นต้น โดยพบเป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างภายนอก เช่น เปลือกกุ้ง กระดองปู และแกนปลาหมึก คิดเป็นประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ ต่อน้ำหนักตัวแห้ง (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2546) นอกจากนี้ ไคตินยังพบเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างหลักของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง แมลง และจุลินทรีย์ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แหล่งวัตถุดิบสำคัญของไคติน

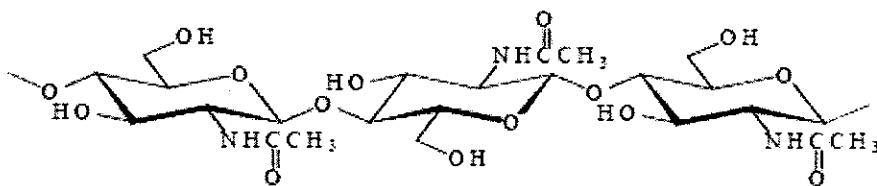
สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ประเภทมีข้อปล้อง (arthropods)	แมลง (insect)	จุลินทรีย์ (microorganisms)
หนอนทะเล (annelida)	แมลงป่อง	สาหร่ายสีเขียว
หอย (molluska)	แมงมุม	ยีสต์
crustaceans	มด	เชื้อรา (ผนังเซลล์)
กุ้งก้ามกราม (lobster)	แมลงสาบ	ก้านชีสปอร์ของ <i>penicillium</i>
กุ้ง (shrimp)	แมลงปีกแข็ง	สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน
กุ้งนาง (prawn)		<i>blastocladiaceae</i>
ปู (crab)		<i>Ascomydes</i>

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (2546)

ไคติน มีชื่อทางเคมีว่า Poly [β -(1 \rightarrow 4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucopyranose] เป็นสารชีวภาพที่มีโครงสร้างคล้ายกับเซลลูโลส แต่จะต่างกันที่ตำแหน่ง C-2 โดยเซลลูโลสจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-1 ส่วนไคตินจะประกอบด้วยหมู่อะซิแทมิโด (acetamido group) (-NHCOCH₃) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-2



ภาพประกอบ 2-1 โครงสร้างของเซลลูโลส

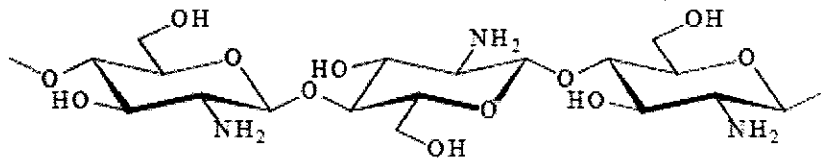


ภาพประกอบ 2-2 โครงสร้างของไคติน

เมื่อพิจารณาสูตร โครงสร้างของไคติน พบว่าไคตินเป็นสาร โมเลกุลยาวที่ไร้ประจุ (nonelectrolytic polymer) ซึ่งทำให้ไคตินไม่สามารถละลายในสารละลายทั่วไปโดยง่าย เพราะสารละลายส่วนใหญ่เป็นสาร โมเลกุลที่มีประจุ (electrolytic molecule) ทำให้การใช้ประโยชน์จากไคตินไม่แพร่หลาย อย่างไรก็ตามเราสามารถดัดแปลงไคตินด้วยวิธีทางเคมีเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานมากขึ้น โดยการผลิตเป็นไคโตซาน

ไคโตซานหรืออนุพันธ์ของไคติน ได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทิลของไคติน (-COCH₃) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยา deacetylation โดยแช่ไคตินในสารละลายด่างเข้มข้น ซึ่งไคโตซานที่ได้นี้ มีชื่อทางเคมีว่า poly [β -(1 \rightarrow 4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose] เป็นการไฮโดรไลซ์หมู่อะซิทิลเอมีน เกิดเป็นหมู่เอมีโนอิสระ (-NH₂) กลายเป็นสาร โมเลกุลที่มีประจุซึ่งสามารถรับโปรตอน (ประจุบวก) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-3 ด้วยเหตุนี้ไคโตซานจึงมีคุณสมบัติที่ละลายได้

ในสารละลายหลายชนิดที่มี pH ในช่วงที่กรดต่ำกว่า 5.5 และทำให้การใช้ประโยชน์โคโตซานสูงกว่าไคติน (สืบศักดิ์ กลิ่นสอน, 2539)



ภาพประกอบ 2-3 โครงสร้างของโคโตซาน

วัตถุดิบที่นิยมใช้ในการผลิตไคตินและโคโตซานในทางอุตสาหกรรม คือ เปลือกของสัตว์จำพวกกุ้ง (crustacean) เช่น กุ้ง ปู และกั้ง เนื่องจากเป็นของเสียที่ได้จากการแปรรูปเพื่อเป็นอาหาร ปริมาณไคตินที่พบแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบเมื่อเทียบจากน้ำหนักแห้ง Ashford *et al.* (1977) รายงานว่ามีไคตินในเศษกุ้งและปูในช่วง 14-27 เปอร์เซ็นต์ และ 13-15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนในกระดองปลาหมึกมีไคตินในช่วง 5-20 เปอร์เซ็นต์ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2546)

Somprasit (1997) รายงานว่าโคโตซานที่ผลิตจากเปลือกกุ้ง ซึ่งมีโครงสร้างเชิงผลึกเป็นแบบแอลฟา (α) และกระดองปลาหมึกซึ่งมีโครงสร้างเชิงผลึกเป็นแบบเบต้า (β) มีคุณสมบัติต่างกันหลายด้าน เช่นความสามารถในการดูดซับน้ำ การดูดซับโลหะ รวมทั้งอัตราเร็วในการถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ไคตินเนสและโคโตไบเอส

กรรมวิธีการผลิตไคตินและโคโตซานมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ ซึ่งในระดับอุตสาหกรรมมักจะใช้วิธีทางเคมี และวัตถุดิบส่วนใหญ่มาจากกากของเหลือในอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็ง อาทิ เปลือก หัวกุ้ง กระดองปู และแกนปลาหมึก โดยสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของไคตินและโคโตซานที่ได้มีความหลากหลาย ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ (species) ของสัตว์เหล่านี้ รวมถึงกรรมวิธีการผลิต

2.1 เทคโนโลยีการผลิตไคตินและไคโตซาน

จากการค้นคว้าพบว่าการการผลิตไคตินและไคโตซาน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ การผลิตโดยใช้เอนไซม์ การผลิตจากจุลินทรีย์และการผลิตทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 การผลิตโดยใช้เอนไซม์

เอนไซม์ในธรรมชาติที่สามารถย่อยไคตินและไคโตซาน ได้แก่ ไคตินเนส (chitinase) จะตัดสายไคตินได้จากทั้งปลายสายและในสายได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ หรือ สามโมเลกุลต่อกัน เฮกซามินิเดส (hexosaminidase or N-acetylhexosaminidase) จะตัดสายไคตินจากปลายทีละหนึ่งหน่วย ไคโตซานเนส (chitosanase) จะตัดเฉพาะไคโตซานไม่ตัดไคติน และให้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและคู่ ตัดได้ทั้งจากปลายและในสาย เป็นต้น (สุทธวัฒน์ เบญจกุล, 2533)

Wang *et al.* (2001) นำเอนไซม์ไคตินเนสและโปรตีนเอสที่ผลิตจากเชื้อ *Bacillus cereus* มาตรึงกับ hydroxypropyl methylcellulose acetate succinate เพื่อผลิตไคตินจากกระดองปู และแกนปลาหมึก พบว่าสามารถย่อยโปรตีนได้ 62 เปอร์เซ็นต์ และย่อยไคตินได้ 71 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณโปรตีนและไคตินทั้งหมด ในกระดองปูและแกนปลาหมึก

อย่างไรก็ตามการใช้เอนไซม์ก็มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น เอนไซม์ส่วนใหญ่ย่อยไคตินโดยตรงจากธรรมชาติได้ไม่ดีโดยเฉพาะ อัลฟาไคติน จะต้องมีการทำลายโครงสร้างของไคตินก่อน โดยการบด ใช้ความดันหรือไอน้ำ นอกจากนี้เอนไซม์ยังหาซื้อได้ไม่ถ่ย่ายนัก และมีราคาสูง (สุทธวัฒน์ เบญจกุล, 2533)

2.1.2 การผลิตจากจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการผลิต ได้แก่ เชื้อราจำพวก *Mucoraceae* และ *Rhizopus* เนื่องจากมีไคโตซานเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ Shimahara *et al* (1989) ได้ศึกษาปริมาณไคโต

ขานในราจำพวก *Mucoraceae* จำนวน 125 สายพันธุ์ พบว่ามีค่า 65-900 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนไคโตขานในราจำพวก *Rhizopus* จำนวน 32 สายพันธุ์ มีค่า 330-645 มิลลิกรัม/ลิตร

Hang (1990) ได้เลี้ยง *Rhizopus oryzae* ในอาหารที่มีข้าวโพดและข้าวเป็นองค์ประกอบ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าให้ปริมาณไคโตขานสูงสุดคือ 406 และ 700 มิลลิกรัม/ลิตร ในอาหารสูตรข้าวโพด และอาหารสูตรข้าวตามลำดับ

ข้อเสียของการผลิตจากสิ่งมีชีวิต คือ ใช้รอบเวลาในการผลิตยาวนาน เซลล์ของสิ่งมีชีวิตมีองค์ประกอบต่างๆหลายอย่าง เช่น โปรตีน ไขมัน โพลีเอสเตอร์ สารประกอบไกลโคไซด์ กลีโคไซด์ของกรดโอเลอิกและกรดไขมันชนิดอื่น ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการกำจัดสารเหล่านี้ออกก่อนสกัดไคโตขาน นอกจากนี้เซลล์ที่นำมาสกัดไคโตขานจะต้องมีความบริสุทธิ์เพียงพอ (สุทธวัฒน์เบญจกุล, 2534)

2.1.3 การผลิตทางเคมี

การผลิตทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในระดับอุตสาหกรรม แต่ข้อเสียของวิธีทางเคมีได้แก่ คุณภาพในการผลิตจะควบคุมยาก เครื่องมือที่ใช้ถูกกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารเคมีที่เข้มข้นและประการสำคัญคือเรื่องสิ่งแวดล้อม (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2546) มีขั้นตอนพื้นฐานอยู่ 3 ขั้นตอนคือ การเตรียมวัตถุดิบ การเตรียมไคตินและการเตรียมไคโตขาน

2.1.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ไคตินอาจสกัดจากเปลือกกุ้งสด (Madhavan และ Ramachandrannair, 1978) หรือเปลือกกุ้งที่ผ่านการตากแห้งและบด แต่วัตถุดิบที่นำมาใช้ควรผ่านการทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆที่ปะปนมา Bough *et al.* (1978) ได้เตรียมเปลือกกุ้งสำหรับผลิตไคโตขาน โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เวลา 20 ชั่วโมงแล้วบดให้มีขนาด 1.0 มิลลิเมตร ส่วน Chandumpai *et al.* (2004) ทำความสะอาดวัตถุดิบด้วยน้ำหลายครั้งแล้วทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง บดแล้วกรองผ่านตะแกรงที่มีขนาด 0.75 มิลลิเมตร

2.1.3.2 การเตรียมไคติน

เนื่องจากไคตินในธรรมชาติอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน โดยมีโปรตีนและแร่ธาตุเป็นส่วนประกอบสำคัญ ดังนั้นการสกัดด้วยวิธีทางเคมีจึงต้องผ่าน 2 ขั้นตอนสำคัญคือ การกำจัดแร่ธาตุ (demineralization) โดยใช้สารละลายกรด และกำจัดโปรตีน (deproteinization) โดยใช้สารละลายด่าง และเมื่อใช้สภาวะของปฏิกิริยาในกระบวนการสกัดที่แตกต่างกันจึงมีผลให้คุณสมบัติและคุณภาพของไคตินที่สกัดได้จะแตกต่างกัน (มณฑา จำริญรักษ์, 2544)

การกำจัดแร่ธาตุอาจกระทำก่อนหรือหลังการกำจัด โปรตีน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และผลพลอยได้ ถ้าต้องการ โปรตีนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นต่อไป ก็ควรกำจัดโปรตีนก่อนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารละลายในการกำจัดแร่ธาตุ (สุทธรวัฒน์ เบญจกุล, 2533)

การกำจัดแร่ธาตุ

เปลือกนอกของสัตว์ในวงศ์ crustaceans มีแร่ธาตุเป็นส่วนประกอบประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบส่วนใหญ่คือแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดแก่ เช่น HCl (กรดไฮโดรคลอริก) ก็จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ จึงสามารถแยกออกจากของผสมโดยการกรองหรือตกตะกอน ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของไคตินที่ผลิตได้คือ ชนิดและความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา (Johnson และ Peniston, 1982) สภาวะของปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการกำจัดแร่ธาตुरวบรวมไว้ รวมทั้งงานวิจัยระยะต่อมาสรุปได้ดังนี้

Hackman (1954) สกัดไคตินจากเปลือกกุ้งก้ามกราม (lobster) อบแห้งปริมาณ 220 กรัม แช่ในสารละลาย 2 M HCl ปริมาตร 21 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ล้างและอบแห้งแล้วบดให้ละเอียด นำส่วนที่บดละเอียดปริมาณ 91 กรัม แช่ในสารละลาย 2 M HCl ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน โดยเขย่าเป็นครั้งคราว พบว่าไคตินที่ได้มีเถ้า (ash) เป็นองค์ประกอบน้อยมากจนตรวจวัดไม่ได้

Horowitz *et al.* (1957) ใช้เปลือกกุ้งมังกรที่ผ่านการกำจัดแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีของ Hackman ปริมาณ 10 กรัม มาสกัดแร่ธาตุโดยใช้สารละลายกรดฟอรั่มิกเข้มข้นร้อยละ 90 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องแล้วล้างให้เป็นกลาง

Takeda (1978) กำจัดแร่ธาตุในกระดองปู (king crab) โดยใช้สารละลาย EDTA (ethylene diamine tetraacetic acid) pH 10 ที่อุณหภูมิห้อง

Broussignac (1968) กำจัดแร่ธาตุในกระดองปูโดยใช้ 1.37 M HCl ปริมาณมากเกินไป ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าผลผลิตประกอบด้วยได้ 0.4 – 0.5 เปอร์เซ็นต์

สุทรวัดน์ เบญจกุล (2533) กำจัดแร่ธาตุจากเปลือกกุ้งแชบ๊วย (*Penaeus indicus*) ที่ผ่านการกำจัดโปรตีนแล้วด้วย 1.25 M HCl ที่อุณหภูมิห้อง (27-30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกกุ้งและสารละลายกรด 1:10 (น้ำหนัก:ปริมาตร) พบว่าไคตินประกอบด้วยได้ 0.18 เปอร์เซ็นต์

Somprasit (1997) พบว่ากระดองปลาหมึกสองสายพันธ์ (*L. lessoniana* และ *L. formosana*) อบแห้งมีปริมาณได้น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการกำจัดแร่ธาตุ

Chandumpai et al. (2004) กำจัดแร่ธาตุจากเปลือกกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ด้วย 1M HCl ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกกุ้งและสารละลายกรด 15:190 (น้ำหนัก:ปริมาตร)

การกำจัดโปรตีน

ไคตินมักอยู่รวมกับโปรตีนโดยจับกันอย่างหลวมๆ เช่น พันธะไฮโดรเจน หรือจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยหมู่กลูโคซามีนจับกับหมู่แอสพาทิล และหมู่ฮิสติดีลของโปรตีน เกิดเป็นสารประกอบไกลโคโปรตีน (Conrad, 1965) อัตราส่วนระหว่างไคตินและโปรตีนแตกต่างกันอยู่กับชนิดของวัตถุดิบตั้งแต่ 1:1 ถึง 20:1 เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างและองค์ประกอบ เป็นเหตุให้ความยากต่อการกำจัดโปรตีนแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยจากความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิและระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา (Somprasit, 1997)

การแยกโปรตีนที่รวมอยู่กับไคตินส่วนใหญ่ดำเนินการได้ 2 วิธีคือ สกัดโปรตีนออกด้วยสารละลายต่างและย่อยสลายด้วยเอนไซม์ สภาวะของปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการกำจัดโปรตีนรวบรวมไว้รวมทั้งงานวิจัยระยะต่อมาสรุปลงได้ดังนี้

Hackman (1954) นำเปลือกกุ้งที่กำจัดแร่ธาตุแล้ว แช่ในสารละลาย 1 M NaOH ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยมีการคนเป็นครั้งคราว กระทำขั้นตอนดังกล่าว 4 ครั้งหรือมากกว่า ล้างให้เป็นกลางด้วยน้ำ แล้วล้างไคตินด้วยแอลกอฮอล์และอีเทอร์แล้วทำแห้ง ปริมาณผลผลิตที่ได้เท่ากับ 17 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุแล้ว มีไนโตรเจน 6.8 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีเถ้า

Horowitz *et al.* (1957) แช่เปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุแล้วในสารละลาย NaOH เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง บนอ่างไอน้ำ ล้างด้วยแอลกอฮอล์และอีเทอร์ แล้วทำแห้งโดยลดความดัน ปริมาณผลผลิตที่ได้เท่ากับ 60-70 เปอร์เซ็นต์ มีไนโตรเจน 6.95 เปอร์เซ็นต์

Takeda (1978) ทำการย่อยโปรตีนจากกระดองปูด้วยเอนไซม์ proteinase จากปลาทูน่าที่ pH 8.6 ที่อุณหภูมิ 37.5 องศาเซลเซียส เอนไซม์ papain ที่ pH 5.5-6.0 ที่อุณหภูมิ 37.5 องศาเซลเซียส และเอนไซม์ proteinase จากแบคทีเรีย ที่ pH 7.0 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยเอนไซม์ทั้งสามชนิดให้ประสิทธิภาพการกำจัดโปรตีนใกล้เคียงกัน ผลิตภัณฑ์ไคตินมีปริมาณโปรตีนเหลือ 5 เปอร์เซ็นต์

Broussignac (1968) ทำการย่อยโปรตีนจากกระดองปู ที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุแล้วด้วยเอนไซม์ papain pepsin trypsin เพื่อป้องกันการสูญเสียหมู่อะมิโน แต่ถ้าต้องการผลิตไคโตซาน การกำจัดโปรตีนจะแช่กระดองปูที่กำจัดแร่ธาตุแล้วในสารละลาย NaOH เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที แล้วล้างน้ำให้เป็นกลาง

สุทรววัฒน์ เบญจกุล (2533) กำจัดโปรตีนด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (0.5 M) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้อัตราระหว่างเปลือกกุ้งและสารละลายต่าง 1:10 (น้ำหนัก:ปริมาตร)

Chandumpai *et al.* (2004) กำจัด โปรตีนจากเปลือกกุ้ง และ Sornprasit (1997) กำจัดโปรตีนจากกระดองปลาหมึกด้วย 1 M NaOH ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกกุ้งหรือกระดองปลาหมึกและสารละลายต่างเท่ากับ 1:13 (น้ำหนัก:ปริมาตร) แล้วล้างน้ำให้เป็นกลาง พบว่าได้ไคตินประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์

2.1.3.3 การเตรียมไคโตซาน

เนื่องจากคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของไคตินประกอบด้วยกลุ่มอะซิติลเอมีน (-NHCOCH₃) โดยอะซิติลจับกับเอมีน เพื่อให้ได้สารไคโตซานจำเป็นต้องกำจัดหมู่อะซิติลออก (-COCH₃) กระบวนการนี้เรียกว่า deacetylation ซึ่งวิธีทางเคมีทำได้โดยการนำไคตินไปทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40-45 เปอร์เซ็นต์ (10-12.5 M) ที่อุณหภูมิสูง (สุทธวัฒน์ เบญจกุล, 2533)

2.2 การใช้ไคโตซานในทางการแพทย์

ผลการทดลองจากหลายคณะแสดงให้เห็นว่าไคตินและไคโตซานมีคุณสมบัติเร่งการสมานแผล (wound healing) Balassa และ Prudden (1978) ทดสอบคุณสมบัติการใช้ผ้ากอซปิดแผลที่เคลือบด้วย regenerated chitin จากเปลือกกรอบหุ้มของพวก crustacean หรือจาก fungal mycelia สามารถเร่งการสมานแผลได้เร็วขึ้น Maleti และ Kuma (2000) แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ไหมซึ่งเคลือบด้วยไคโตซานเพื่อเย็บแผลผ่าตัดเส้นเลือดในสุนัขทำให้แผลหายเร็วขึ้น

ผลการทดสอบในหนูทดลองพบว่าตัวอย่างสารละลายไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึก สามารถเร่งให้เลือดจากการเจาะเส้นเลือดที่หางหยุดไหลได้เร็วขึ้น ตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือสารละลายที่เตรียมจากเปลือกกุ้งความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งเร่งให้เลือดหยุดไหลได้เร็วขึ้น 52% (มณฑา จำริญรักษ์, 2544)

ไคโตซานถูกนำมาใช้เป็นสารลดปริมาณซีรัมคลอเลสเทอรอล (serum cholesterol) โดยให้ 3-8 กรัม/วัน เป็นเวลา 2 อาทิตย์ สามารถลดลงอย่างมีนัยสำคัญ 177-188 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ลดการเกิดฝีหนองของแผลที่เกิดจากการติดเชื้อ *Staphylococcus aureus* (Koide, 1998) ตรงกับผลทดลองของ Stone *et al.* (2000) ซึ่งทดสอบกับผู้ป่วยที่เกิดแผลที่ผิวหนัง พบว่าแผลไม่มีการติดเชื้อและไม่เกิดรอยแผลเป็น ไคโตซาน 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ใน 0.2 เปอร์เซ็นต์ กรดอะซิติลมีความสามารถในการปลูกถ่ายกระดูก (osteogenesis) เมื่อทดสอบในหลอดทดลอง (in vitro) กับ stem cell ที่ได้จากหนูทดลอง

นอกจากนี้ยังมีการใช้สารอื่นกับไคโตซานเพื่อให้การใช้งานกว้างขึ้น เช่น การเตรียมไคโตซานที่ละลายน้ำได้ (water-soluble chitosan) เตรียมจากไคโตซานน้ำหนักโมเลกุล 2.0×10^5 , DD 90 เปอร์เซนต์ ผสมกับสาร heparin แล้วทำให้อยู่ในรูปครีม (ointment) ทำให้แผ่นที่ผิวหนังหลุดลอกไม่เกิดรอยแผลเป็น (Kweona *et al.*, 2003) เยื่อแผ่นไคโตซาน (chitosan based membranes) ที่เตรียมจากการผสมไคโตซานน้ำหนักโมเลกุล 1.45×10^5 คาลตัน, DD 85 เปอร์เซนต์ กับ acrylic acid และ 2-hydroxyethyl methacrylate ใช้เป็นแผ่นปิดแผล พบว่าสามารถใช้ในระบบการขนส่งยา (drug delivery system) ได้ดี (Santos *et al.*, 2006) ไคโตซานไมโครคาร์เรียร์ (chitosan microcarriers) ที่เตรียมจากไคโตซานน้ำหนักโมเลกุล 4.8×10^5 คาลตัน, DD 90 เปอร์เซนต์ พบว่าสามารถเข้ากันได้กับเซลล์ (biocompatibility) และไม่เป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity) (Chen *et al.*, 2006) Hexa-N-acetylchitohexaose และ chitohexaose สามารถยับยั้งการเจริญของมะเร็งได้ 85 เปอร์เซนต์ และ 93 เปอร์เซนต์ เมื่อนิดเข้าเส้นเลือดดำของหนูทดลองปริมาณ 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน (Koide, 1998)

2.3 การผลิตไคโตซานในงานวิจัย

การเตรียมไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึก ในการผลิตนี้จะดำเนินการตามสภาวะที่แนะนำโดย Chandumpai *et al.* (2004) เนื่องจากผลิตภัณฑ์ไคติน ไคโตซานที่ได้เมื่อนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่อการห้ามเลือด การสมานแผล และความปลอดภัยในการนำไปใช้โดย มณฑา จำริญรักษ์ (2544) พบว่าสามารถนำไปใช้ในทางการแพทย์ได้

ผลการศึกษาความปลอดภัยของการใช้ไคโตซานที่ผลิตตามสภาวะที่แนะนำโดย Chandumpai *et al.* (2004) กับสัตว์ทดลอง โดยการฉีดสารละลายไคโตซานเข้าใต้ผิวหนังของหนูทดลองพบว่า เนื้อเยื่อจะปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยสลายอย่างช้าๆ และถูกดูดซึมในที่สุดโดยไม่ทำให้หนูทดลองเกิดอาการ ไข้ และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัว (มณฑา จำริญรักษ์, 2544)

มณฑา จำริญรักษ์ (2544) ศึกษาผลของการใช้สารละลายไคติน ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกต่อการสมานแผลที่เกิดจากการผ่าตัดบริเวณหลังของหนูข้างซ้ายและขวา จะเห็นว่า 3 วันแผลจะมีขนาดเล็กลง จากนั้นแผลจะตกสะเก็ดและหลุดออกไปเมื่อครบ 10 วัน และหลังจากการผ่าตัด 21 วัน พบว่าปากแผลเชื่อมติดกันสนิท โดยไคโตซานจากกระดองปลาหมึกในรูปผงที่ละลายใน 1 เปอร์เซนต์ กรดอะซิติก จากกระดองปลาหมึกในรูปสปันจ์ที่ละลายใน 0.9

เปอร์เซ็นต์ NaCl มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการสมานแผลที่ดีที่สุด และรองลงมา ตามลำดับ ซึ่งแผลที่ใช้ 0.9 เปอร์เซ็นต์ NaCl, 1 เปอร์เซ็นต์ กรดอะซิติก และแผลที่ไม่ใช้สารใดเลยไม่มีความแตกต่างกัน ลักษณะทางเนื้อเยื่อวิทยาที่บ่งบอกถึงการสมานแผลที่ดีกว่าคือ คอลลาเจนไฟเบอร์เรียงตัวเป็นมัดชัดเจนกว่า และในชั้น epidermis เซลล์มีความบางใกล้เคียงกับผิวหนังปกติที่ไม่ทำการผ่าตัดและยังพบว่าเซลล์ lymphocyte และ macrophage มีปริมาณน้อยกว่า

จากสภาวะการผลิตที่แนะนำโดย Chandumpai et al. (2004) ทำให้การออกแบบเครื่องต้นแบบผลิตไคโตซานจะต้องมีคุณลักษณะสำคัญคือ สามารถควบคุมระหว่างวัตถุดิบกับสารละลายตลอดระยะเวลาทำปฏิกิริยา วัสดุที่ใช้ทำตัวถังจะต้องทนอุณหภูมิสูงและทนต่อการกัดกร่อนของกรดและด่างเข้มข้น มีชุดควบคุมเวลา อุณหภูมิ และความเร็วในการกวน

2.4 รูปแบบเครื่องจักรกล

เครื่องจักรต่างๆมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันได้หลายอย่าง ดังนั้นการออกแบบเพื่อจะบรรลุหน้าที่ที่ต้องการจะต้องอาศัยเกณฑ์การออกแบบเครื่องจักรกลเป็นปัจจัยหลัก เช่น เครื่องจักรกลที่มีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งของโครงสร้างเป็นสำคัญจะต้องศึกษาเรื่องการเลือกและกำหนดขนาดในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนเข้าด้วยกันเป็นพิเศษ เครื่องจักรกลชนิดที่มีการส่งต่อกำลังผ่านแกนหมุนจะต้องพิจารณาเรื่องแรงบิดที่ส่งผ่าน โมเมนต์ความเฉื่อย ความเร็วรอบและการสั่นเนื่องจากความไม่สมดุลของวัตถุที่หมุนเป็นสำคัญ เครื่องจักรกลที่ควบคุมและขับเคลื่อนตามเส้นทางควรให้ความสำคัญเรื่องการเลือกลักษณะการทำงานและอุปกรณ์ตรวจวัด เครื่องจักรกลชนิดที่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมเป็นการทำงานที่เกี่ยวข้องกับของไหล การออกแบบวงจรจะต้องออกแบบให้ระบบสามารถทนต่อความดัน อุณหภูมิสูงและการกัดกร่อนของของไหลที่ใช้งานได้ (วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา, 2544)

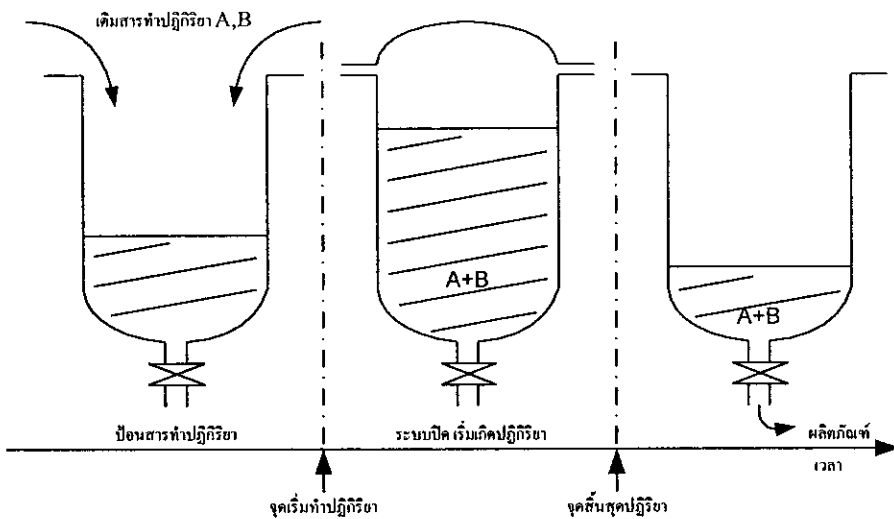
จะพบว่าเครื่องผลิตไคโตซานควรเป็นเครื่องจักรกลที่มีการผสมวัตถุดิบภายใต้สภาวะการเกิดปฏิกิริยา โดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน เป็นลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีรูปแบบการทำงานแบบต่างๆ ดังนี้

2.4.1 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ (type of reactors)

วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา (2544) กล่าวว่าโครงสร้างการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมเคมีมีมากมายหลายชนิด สามารถแยกประเภทเครื่องปฏิกรณ์ตามลักษณะการทำงานแบ่งออกเป็น แบบกะ (batch) แบบไหลต่อเนื่อง (continuous) และแบบเฟดเบทช์ (fed batch)

2.4.1.1 การทำงานแบบกะ (batch operation)

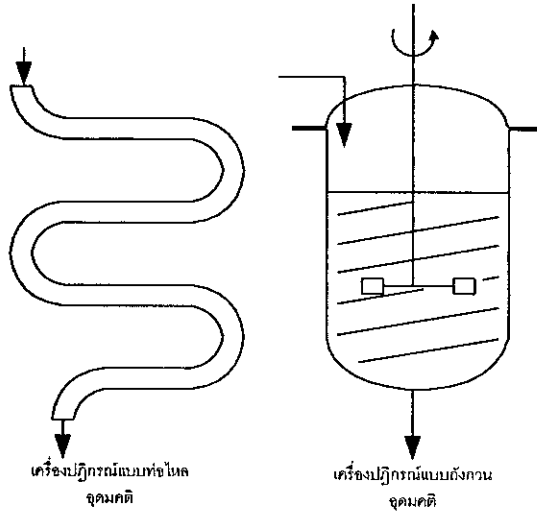
สารทำปฏิกิริยาทั้งหมดถูกป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ตั้งไว้ก่อน แล้วเริ่มปฏิกิริยาเมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดจึงนำสารผสม (สารทำปฏิกิริยาที่ยังเหลืออยู่และผลิตภัณฑ์) ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ดังแสดงในภาพประกอบ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในช่วงเวลาต่างๆ

2.4.1.2 การทำงานแบบไหลต่อเนื่อง (continuous operation)

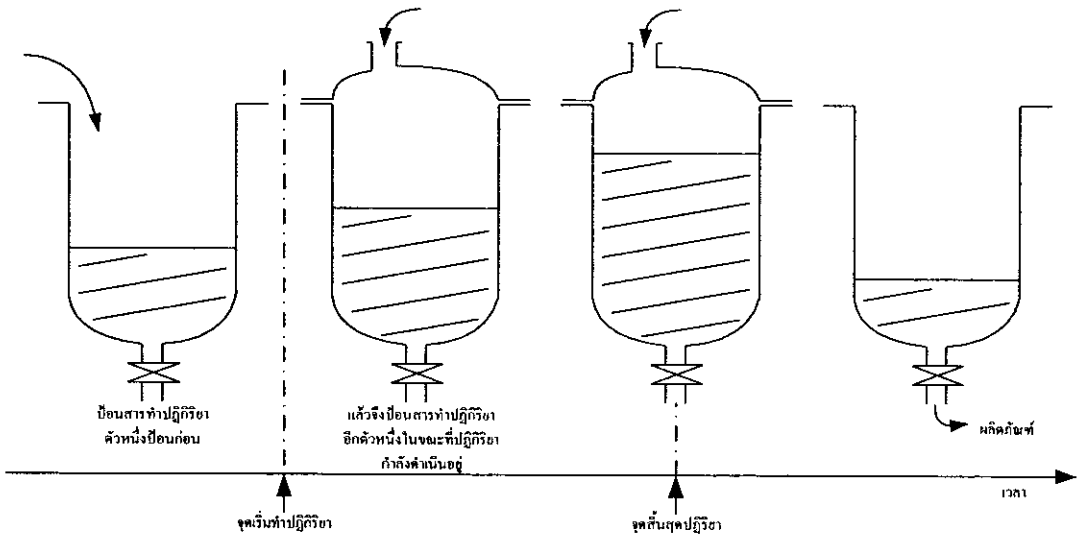
สารทำปฏิกิริยาป้อนเข้าที่ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกมาที่ทางออก ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีทั้งแบบถังกวนและแบบท่อไหล ดังแสดงในภาพประกอบ 2-5



ภาพประกอบ 2-5 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องของแบบท่อไหล และแบบถังกวนจุดมคติ

2.4.1.3 การทำงานแบบเฟดแบทช์ (fed-batch operation) หรือ เซมิแบทช์ (semi-batch operation)

มีลักษณะการทำงานก้ำกึ่งระหว่างแบบกะและแบบต่อเนื่อง กล่าวคือ สารทำปฏิกิริยาตัวหนึ่ง ป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ก่อน แล้วจึงป้อนสารทำปฏิกิริยาอีกตัวหนึ่งเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง หรือป้อนเป็นระยะๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-6

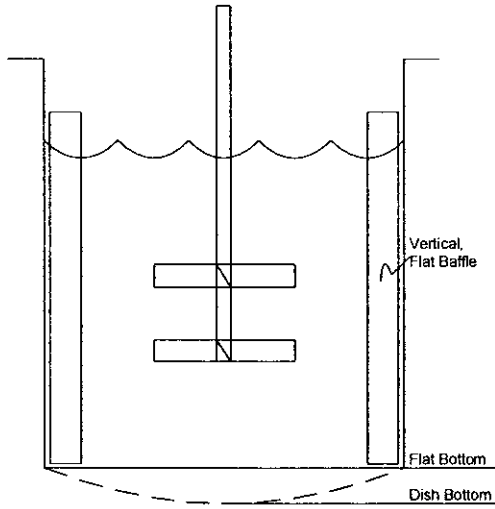


ภาพประกอบ 2-6 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเฟดแบทช์ในช่วงเวลาต่างๆ

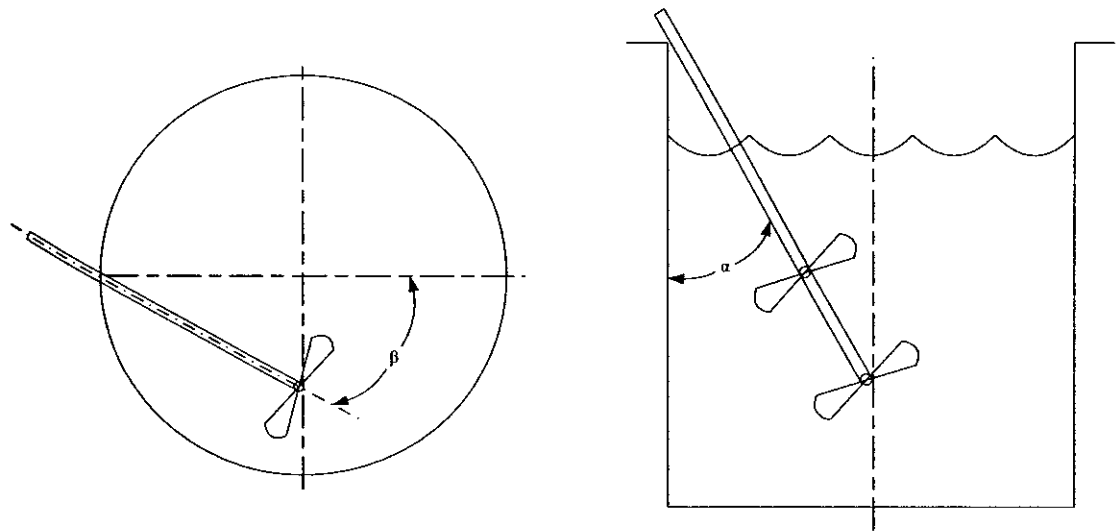
โดยทั่วไป โรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมากๆ มักใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่ในสถานะคงตัว (steady state) ทำให้การควบคุมงานทำได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังช่วยลดขั้นตอนการถ่ายเทสารทำปฏิกิริยาเข้า-ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งต้องทำในกรณีแบบกะออกไปได้ จึงประหยัดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน ในทางตรงกันข้าม อุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมผลิตยา ปริมาณการผลิตมีไม่มากในขณะที่ชนิดของยามีมาก เครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสมจึงเป็นแบบกะหรือแบบเฟดแบทช์ และถ้ามีเชื้อจุลินทรีย์เกี่ยวข้องกับการผลิต เช่น การหมัก ไม่ค่อยพบเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง เพราะระยะเวลาของการทำงานที่ยาวนาน มีผลทำให้เชื้อจุลินทรีย์ก็ตายพันธุ์ และมีปัญหาการปนเปื้อนซึ่งป้องกันได้ยากถ้าทำงานเป็นระยะเวลานานแบบต่อเนื่อง (วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, 2544) ดังนั้นเครื่องต้นแบบผลิตโคโคซานจึงควรมีลักษณะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการผลิตมีความคงที่ และวัตถุดิบสามารถควบคุมให้ทำปฏิกิริยาได้ตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งจะส่งผลต่อความคงที่ของคุณภาพของโคโคซานที่ได้ นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ออกแบบควรมีอุปกรณ์สำหรับการกวนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.2 ประเภทของอุปกรณ์การกวนผสม

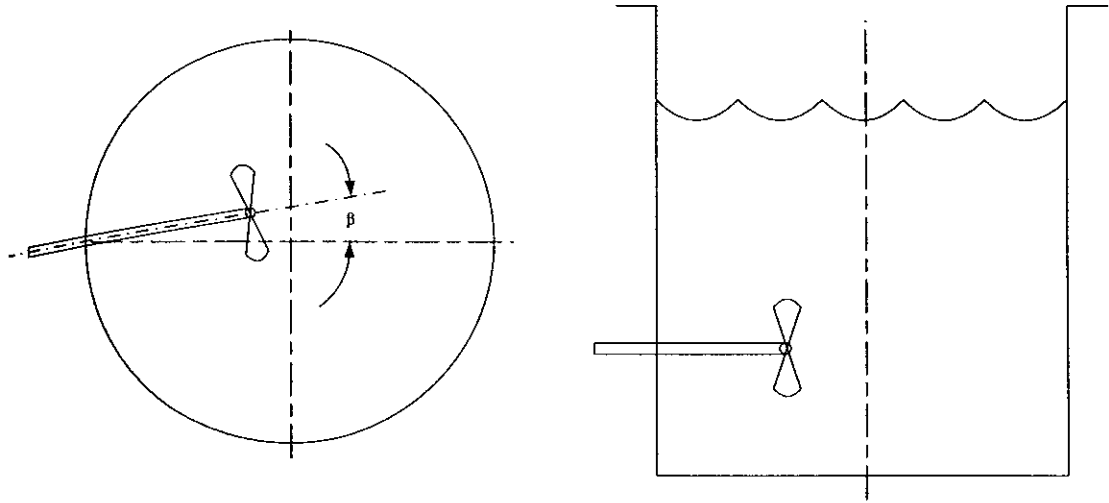
ธนกร ณ พัทลุง (2549) กล่าวว่า การผสมของไหลต่างๆ เข้าด้วยกันนั้นเป็นหัวใจในกระบวนการผลิตสารเคมีและอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย เช่น ผลิตอาหาร ปีโตรเลียม ผลิตยา ผลิตกระดาษ กระบวนการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น ซึ่งการผสมก็มีด้วยกันหลายวิธี โดยวิธีการทั่วไปที่ใช้ก็คือใช้ถังกวนผสม (mixing tank) โดยการออกแบบจะต้องเริ่มจากการใช้หลักพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ในการประยุกต์ของใบกวนผสม และระบบถังกวนต่างๆ สำหรับการติดตั้งใบกวนที่ติดกับเพลลาหมุนที่ใช้กับของไหลที่มีความหนืด แบบพื้นฐานของถังกวนผสมและถังกวนมี 3 แบบ โดยมีรูปร่างลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 2-7 ถึง 2-9



ภาพประกอบ 2-7 ถังและชุดกวนผสมแบบแนวตั้งทรงกระบอก (vertical, cylindrical vessel)



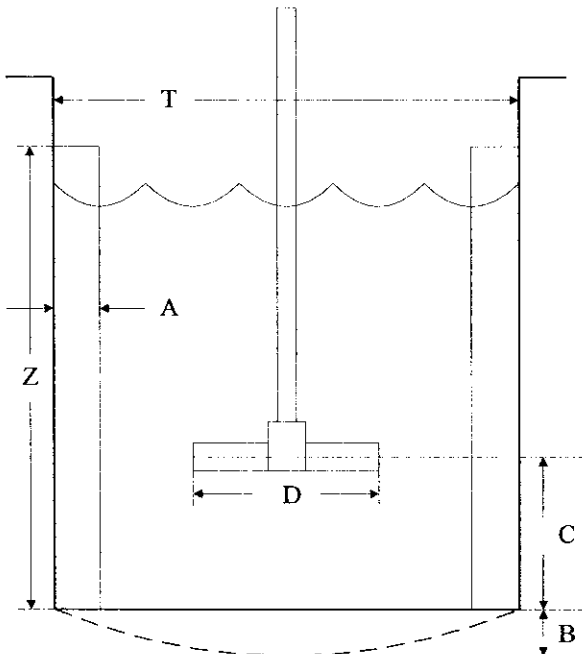
ภาพประกอบ 2-8 ถังและชุดกวนผสมแบบเคลื่อนย้ายได้ (portable)



ภาพประกอบ 2-9 ถังและชุดกวนผสมแบบกวนด้านข้างถัง (side-entering mixers)

2.4.3 แบบมาตรฐานของเครื่องกวนผสม

เครื่องต้นแบบผลิตโคโคซานควรมีถังและชุดกวนผสมแบบแนวตั้งทรงกระบอก (vertical, cylindrical vessel) ซึ่งมีแบบมาตรฐานกำหนดสัดส่วนต่างๆของอุปกรณ์ในเครื่องกวนผสม (Vincent, 1967) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-10



ภาพประกอบ 2-10 แบบมาตรฐานถังกวนผสม

โดยที่

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนผสม	= T
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (D)	= T/3
ความสูงของบัพเฟิลหรือใบต้านการไหล (Z)	= T
ระยะห่างของใบพัดจากกันถึง (C)	= T/3
ความลึกของก้นถังโค้ง (B)	= T/12
ความกว้างของบัพเฟิลหรือใบต้านการไหล (A)	= T/12

2.5 ขั้นตอนการออกแบบ

วิธีที่ ๑ อิงภาครณ และชาญ ถนัดงาน (2541) กล่าวว่า การสร้างเครื่องจักรกลจะต้องมีกระบวนการออกแบบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่จะต้องคำนึงถึงรายละเอียดต่างๆ ของเครื่องจักรกลที่จะสร้าง เช่น กำหนดหน้าที่พื้นฐาน พิจารณาถึงกลไกการทำงานและโครงสร้างที่จำเป็น นอกจากนี้ยังต้องกำหนดรูปทรงรายละเอียดพื้นฐาน ขนาด วัสดุ ผลที่ได้จากการออกแบบคือ แบบวาดที่พร้อมสำหรับการสร้าง โดยสิ่งที่ต้องพิจารณาก่อนการออกแบบแบ่งได้เป็นขั้นตอนดังนี้

2.5.1 รับรู้ความต้องการ

การออกแบบเริ่มต้นขึ้นจากการที่วิศวกรได้รับรู้ความต้องการและตัดสินใจที่จะทำอะไรบางอย่างบางอย่างขึ้น หรืออาจได้รับข้อมูลจากลูกค้าที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ในด้านการใช้งาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจเป็นแรงผลักดันให้มีการออกแบบขึ้นได้ การแข่งขันกันทางด้านธุรกิจและอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความต้องการในการออกแบบอุปกรณ์ กระบวนการ และเครื่องกลใหม่ๆ สิ่งสำคัญก็คือต้องยอมรับรู้ว่าเกิดความต้องการขึ้นแล้ว ใช้ประสบการณ์พื้นฐานที่มีอยู่ทำความเข้าใจกับความต้องการนั้นให้ถ่องแท้

2.5.2 ลักษณะจำเพาะ

รวบรวมรายละเอียดของสิ่งที่ต้องการออกแบบให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งอาจประกอบไปด้วย คุณลักษณะ ขนาด ราคา จำนวนที่ต้องการผลิต อายุการใช้งาน อุณหภูมิใช้งาน และสิ่งที่คาดว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงได้บ้าง เช่น น้ำหนัก ขนาดต่างๆ พร้อมทั้งบางสิ่งบางอย่างที่เกิดขึ้น

เนื่องมาจากการออกแบบ เช่น กรรมวิธีการผลิต ความชำนาญของช่าง และการแข่งขันทางด้านตลาด เป็นต้น การออกแบบงานบางประเภทต้องทำตามเกณฑ์ เช่น หม้อไอน้ำ ภาชนะความดัน ก็จำเป็นจะต้องศึกษาเกณฑ์นั้นให้ทราบถึงสิ่งสำคัญต่างๆที่เป็นข้อควรระวังและปฏิบัติตาม

2.5.3 ศึกษารายละเอียด

เมื่อได้ลักษณะจำเพาะต่างๆแล้วขั้นต่อไปก็คือศึกษารายละเอียด ทั้งนี้ก็เพื่อแยกแยะถึงสิ่งที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายหรือความล้มเหลว ทั้งทางด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์ โดยปกติแล้วผู้ที่รับผิดชอบในการศึกษารายละเอียดมักจะเป็นวิศวกรที่ผ่านงานออกแบบมาแล้วอย่างมาก มีความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ต่างๆเป็นอย่างดี รู้วิธีการเลือกใช้วัสดุ รู้วิธีการผลิตและความต้องการของแผนกขาย ผู้ที่ทำการศึกษารายละเอียดมักจะเป็นผู้รับผิดชอบ โครงการทั้งหมดมีบ่อยครั้งที่ผลจากการศึกษารายละเอียดจะทำให้ลักษณะจำเพาะต้องเปลี่ยนไปเพื่อความสำเร็จของโครงการ

2.5.4 สังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบ

เมื่อศึกษารายละเอียดแล้ว ต่อไปก็จะถึงขั้นการสังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ทำทนายและน่าสนใจที่สุดในการออกแบบ เพราะถ้าไม่มีสิ่งขีดจำกัดอันใดแล้ว ผู้ออกแบบจะทำหน้าที่เป็นวิศวกร นักประดิษฐ์ และจิตรกรในเวลาเดียวกัน

2.5.5 ออกแบบเบื้องต้นและปรับปรุง

หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบแล้ว อาจจะมีวิธีการออกแบบที่เหมาะสมกับลักษณะจำเพาะและความต้องการหลายวิธี จึงจำเป็นที่จะต้องตัดสินใจเลือกเอาวิธีใดวิธีหนึ่งเป็นเบื้องต้นและปรับปรุงต่อไป ในขั้นนี้จำเป็นจะต้องมีแบบแสดงเครื่องจักรกลหรือระบบที่มีความเกี่ยวข้องกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆของระบบทั้งหมด แบบควรมีขนาดสำคัญพร้อมทั้งรูปประกอบ รูปด้านข้างอย่างสมบูรณ์ นอกจากนั้นยังต้องพิจารณาทางด้านจลนพลศาสตร์ (kinematics) ของระบบด้วยเพื่อความมั่นใจว่าจะทำงานได้

โดยปกติแล้วในขั้นนี้ยังไม่ได้ผลสมบูรณ์ จึงต้องมีการตรวจสอบลักษณะจำเพาะเพื่อให้มีความสมบูรณ์ครบถ้วน พร้อมกันนั้นยังมีการปรับปรุง เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงแนวความคิด

เพื่อหาวัสดุที่มีความเหมาะสม เพื่อประเมินผลของอุปกรณ์ หรือค้นหาสิ่งที่ยังไม่แน่ชัดจากข้อมูลทางเทคนิคและประสบการณ์ที่ผ่านมา ดังนั้นช่วงการออกแบบเบื้องต้นนี้อาจจะซ้ำหรือเปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลที่ได้

2.5.6 ออกแบบรายละเอียด

การออกแบบรายละเอียดเกี่ยวข้องกับขนาดจริง และขนาดของส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมดทั้งที่จะผลิตขึ้นเอง หรือผลิตภัณฑ์สำเร็จที่จะซื้อมาใช้ ซึ่งจะประกอบเข้าด้วยกันทั้งหมดเป็นระบบ ดังนั้นจึงต้องมีแบบรายละเอียดของชิ้นส่วนทุกชิ้น แสดงรูปด้านต่างๆเท่าที่จำเป็น โดยต้องกำหนดทั้งขนาด พิกัดความเผื่อไว้ให้ครบถ้วน วัสดุที่ใช้ กรรมวิธีทางความร้อน จำนวนชิ้นส่วน ชื่อชิ้นส่วน และบางครั้งอาจต้องใช้แบบประกอบของชิ้นงานสำเร็จด้วย

โดยปกติช่างเขียนแบบจะทำงานไปพร้อมกับวิศวกร เพื่อเขียนแบบที่วิศวกรกำหนดขึ้น วิศวกรจะต้องให้ข้อมูลต่างๆที่จำเป็น เช่น รูปแบบเบื้องต้นที่วิศวกรควรจรรยาংশขึ้นมาก่อน จะต้องให้ขนาด ชนิดของวัสดุโดยใช้เทคนิคในการวิเคราะห์และประสบการณ์ที่ผ่านมา ซึ่งหมายความว่าวิศวกรต้องใช้พื้นฐานทางด้านคณิตศาสตร์ กลศาสตร์ ความแข็งแรงของวัสดุ กลศาสตร์ของไหล การสิ้นสะท้อน โลหะวิทยา กระบวนการผลิต โดยวิศวกรอาจจะหาผู้ช่วยที่มีความชำนาญพิเศษเฉพาะสาขามาช่วยได้

2.5.7 สร้างและทดลอง

หลังจากที่มีรายละเอียดต่างๆสมบูรณ์ มีแบบแยกชิ้น แบบประกอบ รวมทั้งวัสดุและรายการชิ้นส่วนต่างๆแล้ว จึงส่งแบบที่สมบูรณ์ทั้งหมดไปยังโรงงานเพื่อสร้างตามแบบ เมื่อสร้างเสร็จเรียบร้อยก็เตรียมประเมินผลและทดสอบ ผลจากการทดสอบอาจทำให้ต้องเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงการออกแบบเบื้องต้น หรือแบบรายละเอียดบางประการ หลังจากเปลี่ยนแปลงปรับปรุงชิ้นส่วนบางชิ้นแล้วจะทดสอบและประเมินผลใหม่อีกครั้ง หรืออาจต้องทำอีกหลายครั้ง จนวิศวกรผู้ออกแบบพึงพอใจที่งานมีสมรรถนะตามต้องการ

2.6 ขั้นตอนการกำหนดรูปทรงและขนาดเครื่องจักรกล

ทาเคชิ โยเนะยามะ และจิไซโนะ เซโค (2548) กล่าวว่ารูปทรงและขนาด เป็นสิ่งที่แสดงถึงความใหญ่ ความยาวของวัตถุในทางเรขาคณิต ถึงแม้จะวาดรูปวัตถุเสร็จ แต่ไม่ระบุขนาดลงในรูป ก็จะไม่สามารถสร้างวัตถุนั้นได้ ความหมายของการกำหนดขนาดนั้น คือ การกำหนดข้อมูลที่ชัดเจนของเครื่องจักรกล รายละเอียดของขนาดและตำแหน่งของชิ้นส่วน และความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ ได้ การแสดงขนาดของตัวเลข เป็นการส่งข้อมูลต่อไปยังผู้สร้าง เมื่อผู้สร้างได้รับข้อมูลของขนาดแล้วจะสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ให้ได้ตามขนาดที่ถูกกำหนดมา

ขนาดจะถูกกำหนดไปพร้อมกับรูปทรงในขั้นตอนการเขียนแบบวาด แต่ก็มีขนาดบางอย่างที่ถูกกำหนดมาก่อนตั้งแต่แรก การกำหนดขนาดโดยทั่วไปจะพิจารณาจากสิ่งต่อไปนี้ (ทาเคชิ โยเนะยามะ และจิไซโนะ เซโค, 2548)

2.6.1 เอกสารกำหนดรายละเอียด

ขนาดหลักๆ จะให้มาในเอกสารกำหนดรายละเอียด เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบและเพลลาที่ขึ้นอยู่กับแรงที่จำเป็นต้องใช้ ขนาดของส่วนที่สำคัญต่างๆ จะกำหนดได้จากเอกสารกำหนดรายละเอียด เมื่อกำหนดขนาดของชิ้นส่วนหลักๆ แล้วขนาดเหล่านั้นจะถูกใช้เป็นมาตรฐานในการกำหนดขนาดของส่วนอื่นๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันต่อไป

2.6.2 การเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนที่เพิ่มเข้ามา

ในกรณีที่ใช้ชิ้นส่วนที่เพิ่มเข้ามา ขนาดเนื้อที่ว่าง ตำแหน่งของรูอื่นๆ ตำแหน่งและขนาดของชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อจะถูกกำหนดตามขนาดของชิ้นส่วนที่เข้ามา เช่น หากกำหนดขนาดของสลักเกลียวแล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูร้อยสลักเกลียว เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียว ความหนาของชิ้นงาน ขนาดอื่นๆ บริเวณหัวสลักเกลียวจะถูกกำหนดตามไปด้วย

2.6.3 หน้าที่ความสามารถ

ขนาดพื้นฐานจะถูกกำหนดเพื่อให้ทำงานได้ตามเงื่อนไขหน้าที่ความสามารถได้สำเร็จ เช่น ขนาดของแรงบิดที่ต้องการจะส่งผ่านขึ้นส่วนจะเป็นตัวกำหนดขนาดของเพลาและขนาดของสลักที่ใช้ ขนาดความหนาของแผ่นกระดานและขนาดของสปริงจะถูกกำหนดจากขนาดที่จะยอมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากแรงที่กระทำ

2.6.4 การประมาณแรงที่กระทำ

ความหนา ขนาด และอื่นๆ จะถูกกำหนดมาจากการคำนวณแรงที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งจะต้องไม่เกินความสามารถสูงสุดของวัสดุในการรองรับ ต้องเข้าใจถึงการกระจายแรง บริเวณที่มีแรงขนาดใหญ่กระทำควรทำให้มีขนาดใหญ่ บริเวณที่มีแรงขนาดเล็กกระทำไม่ควรทำให้มีขนาดใหญ่ การทำเช่นนี้จะทำให้สามารถกำหนดขนาดและรูปทรงได้

2.6.5 ความสัมพันธ์เชิงเนื้อที่ของแต่ละชิ้นส่วน

ขนาดจะถูกกำหนดจากความสัมพันธ์เชิงเนื้อที่ของชิ้นส่วนที่ประกอบเข้าด้วยกัน เช่น ขนาดของชิ้นส่วนที่สวมเข้าด้วยกัน การทำเหลี่ยมและมุมก็เป็นปัญหาพร้อมของชิ้นส่วนที่สัมพันธ์กัน เนื้อที่สำหรับวางสายไฟและวางท่อ และเนื้อที่สำหรับบริเวณที่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนก็ต้องนำมาพิจารณาในการกำหนดขนาดด้วย

2.6.6 มาตรฐาน

ในกรณีที่ใช้ชิ้นส่วนที่มีมาตรฐานกำหนดอยู่แล้ว จะต้องเลือกขนาดที่จะใช้จากมาตรฐานเหล่านั้น เช่น การทำเกลียวนั้นจะเลือกตามมาตรฐานวีหรือเกลียวเหลี่ยม

2.6.7 กระบวนการผลิต

ขนาดของเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานจะมีผลต่อขนาดของชิ้นงานที่สร้างขึ้น เช่น การเจาะรูด้วยสว่านจะไม่สามารถเจาะรูให้มีขนาดเท่าใดก็ได้ตามใจ จะต้องกำหนดขนาดตาม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกสว่าน ไม่มีประโยชน์ที่จะกำหนดขนาดที่ไม่สามารถผลิตได้ ดังนั้นจึงควรกำหนดขนาดให้สามารถผลิตได้ เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาดจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตด้วยเช่นกัน

2.6.8 ความสะดวกในการประกอบและการใช้งาน

ขนาดที่จำเป็นจะถูกกำหนดโดยพิจารณาจากความสามารถในการถอดและประกอบ นอกจากนี้ควรมีเนื้อที่ที่จำเป็นในการใส่และใช้งานเครื่องมือ การใช้งานควรทำได้ง่าย เช่น การกำหนดตำแหน่งและขนาดของที่จับ ความสูงของเครื่องจักรกล การวางตำแหน่งของอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน เป็นต้น

2.6.9 ความรู้สึกสมดุล

รูปทรงและขนาดนอกจากจะตามเงื่อนไขต่างๆที่จำเป็นแล้ว ยังกำหนดตามความรู้สึกและความสมดุลในระหว่างที่เขียนแบบ การเขียนแบบไปด้วยในระหว่างกำหนดขนาดเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมาก รูปทรงที่มองแล้วสมดุลเป็นการออกแบบที่เหมาะสม เมื่อกำหนดรูปทรงให้เป็นรูปทรงที่สมดุลแล้ว ขนาดจะถูกกำหนดไปเองตามธรรมชาติ การทำชิ้นส่วนให้เป็นรูปทรงที่เรียบง่ายก็เป็นสิ่งสำคัญ

2.7 การออกแบบเพื่อทนอุณหภูมิสูง

2.7.1 ความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิสูง

โครงสร้างซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหนักที่อุณหภูมิปกติมักจะได้รับการออกแบบโดยใช้สมบัติทางกลพื้นฐานเช่น ความต้านทานแรงดึงครากและความต้านทานแรงดึง ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง สมบัติทางกลของวัสดุที่อุณหภูมิห้องส่วนใหญ่นั้นมักไม่ขึ้นกับเวลา อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องสมบัติต่างๆจะเปลี่ยนไปมากบ้างน้อยบ้าง เช่น ความแข็งแรงจะขึ้นกับอัตราการเพิ่มความเครียด (strain rate) และเวลาที่วัสดุได้รับแรงกระทำ (time of exposure) โลหะที่ได้รับแรงกระทำที่อุณหภูมิสูงอาจจะเกิดการคืบ (creep) และขนาดของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลา (บัญชา ธนบุญสมบัติ, 2543)

อุณหภูมิที่สามารถใช้งานโลหะนั้นจะจำกัด โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นซึ่งพบว่า ถ้าอุณหภูมิของโลหะใดก็ตามเกินกว่า $2/3$ ของจุดหลอมเหลวของโลหะนั้นๆ จะใช้สมบัติทางกลได้ยากมากเนื่องจากสมบัติทางกลจริงจะด้อยกว่าค่าที่ทำนายจากทฤษฎีมากที่อุณหภูมิต่ำกว่า $1/4$ ของจุดหลอมเหลวของโลหะนั้นๆ อัตราการคืบจะลดลงอย่างรวดเร็วและปริมาณความเครียดรวมจะต่ำมาก ในช่วงอุณหภูมินี้จะมีความสำคัญเฉพาะในกรณีที่เสถียรภาพทางด้านขนาดมีความสำคัญยิ่งยวด เช่น ในเครื่องมือความละเอียดสูงต่างๆ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $1/3$ ของจุดหลอมเหลวของโลหะนั้นๆ เล็กน้อย และที่ระดับความเค้นปานกลาง อัตราการคืบอาจมีค่าคงที่เป็นระยะเวลานาน ในการออกแบบและใช้งานชิ้นส่วนวิศวกรรมที่ต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงควรจะให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงนี้ ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการคืบแบบสถานะคงที่ (steady-state creep) (บัญชา ธนบุญสมบัติ, 2543)

เสถียรภาพของโครงสร้างในระดับผลึกและระดับจุลภาคเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งประการหนึ่งที่กำหนดระยะเวลาการใช้งานโลหะที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เช่น อะตอมและดิสโลเคชัน (dislocation) เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ปริมาณสมมูลของข้อบกพร่องแบบจุดว่าง (vacancy) เพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานโดยกลไกใหม่ เช่น ระบบเลื่อนไถลในผลึก (crystallographic slip systems) เปลี่ยนแปลงหรือมีจำนวนเพิ่มขึ้น (บัญชา ธนบุญสมบัติ, 2543)

ความแข็งแรงของโลหะที่อุณหภูมิสูงมีความสัมพันธ์อย่างคร่าวๆ กับจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น ยกตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิสูง อะลูมิเนียมจะมีความแข็งแรงสูงกว่าสังกะสี และทองแดงจะมีความแข็งแรงสูงกว่าอะลูมิเนียม ถ้าคิดกันง่ายๆ โลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงน่าจะมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีความต้านทานต่อการคืบที่ดี แต่ในความเป็นจริงนั้น มีปัจจัยอีกหลายประการที่จำกัดการใช้งานโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงเหล่านี้ เช่น โลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส หรือโลหะทนความร้อนสูง (refractory metals) เช่น ไนโอเบียม (niobium) โมลิบดีนัม (molybdenum) แทนทาลัม (tantalum) และทังสเตน (tungsten) นั้นมีข้อด้อย ได้แก่ หลอมเหลวยาก ขึ้นรูปยาก และมีความต้านทานต่อการออกซิเดชันต่ำ (บัญชา ธนบุญสมบัติ, 2543)

2.7.2 การเลือกชนิดของโลหะเพื่อทนอุณหภูมิสูง

บัญชา ชาญบุญสมบัติ (2543) ได้กล่าวถึงวิธีการเลือกชนิดของโลหะเพื่อทนอุณหภูมิสูงตามระดับของอุณหภูมิดังนี้

2.7.2.1 อุณหภูมิห้องถึง 150 องศาเซลเซียส

ตะกั่ว เป็นโลหะวิศวกรรมที่ไม่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง แม้แต่ที่อุณหภูมิห้องตะกั่วอาจจะเกิดการคืบได้อย่างมาก

ทองแดง ถ้าเราต้องการโลหะที่ทนการอบอ่อน เราอาจใช้ทองแดงอิเล็กโทรไลติกที่ทนต่อการอบอ่อน (anneal-resistant electrolytic copper) ชนิด C11100 ซึ่งมีแคดเมียม (cadmium, Cd) เป็นธาตุผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย หรืออาจใช้ทองแดงทังสเตนที่มีธาตุเงินผสมอยู่ (silver-bearing tough pitch copper) ชนิด C11400 ซึ่งสามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ หม้อน้ำรถยนต์และอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

2.7.2.2 อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ถึง 400 องศาเซลเซียส

แมกนีเซียม แมกนีเซียมผสมอาจใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเช่น Mg-Th-Zr และ Mg-Al-Zn เป็นต้น แมกนีเซียมผสมที่มีธาตุทอเรียม (thorium, Th) จะทนต่อการคืบได้ดีที่สุด

อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสมมีอุณหภูมิใช้งานมากกว่าแมกนีเซียมผสมประมาณ 20-30 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมผสมที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีโลหะผงบางชนิดสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาสั้นๆ อุณหภูมิและเวลามีผลอย่างยิ่งต่ออะลูมิเนียมผสมประเภทที่อบชุบได้ (heat treatable alloys) แต่อาจจะไม่มีผลมากนักต่ออะลูมิเนียมผสมประเภทที่อบชุบไม่ได้ (non-heat-treatable alloys) เนื่องจากประเภทหลังนี้ไม่มีตะกอนและไม่สามารถบ่มเกินขนาด (over aging)

ทองแดง ทองแดงผสมที่มีธาตุอาร์เซนิก (arsenic,As) ผสมอยู่มีความสามารถต้านทานต่อการกัดที่อุณหภูมิปานกลาง อะลูมิเนียมบรอนซ์ (aluminum bronze) ชนิด C95000 สามารถใช้งานได้ที่ 400 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ โดยที่ความแข็งแรงไม่เปลี่ยนไปมากนัก

เหล็กหล่อและเหล็กกล้า เหล็กหล่อเกรดสูงบางชนิด (higher grade of cast irons) อาจใช้งานเป็น โครงตัวถัง (casting) ของเครื่องยนต์กั้นความดันต่ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้เราอาจใช้เหล็กกล้าคาร์บอน (plain-carbon steels) โดยอุณหภูมิสูงสุดที่เหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีแมงกานีสผสม (manganese-carbon steels) สามารถทนได้ประมาณ 425 องศาเซลเซียส และถ้าจะใช้เป็นเวลานานกว่า 200,000 ชั่วโมง เราอาจใช้เหล็กกล้าผสมต่ำ (low alloy steels) ได้แต่อุณหภูมิใช้งานต้องต่ำกว่านี้มาก

2.7.2.3 อุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส

ไทเทเนียม ไทเทเนียมผสมชนิดอัลฟา (alpha alloys) มีความต้านทานต่อการกัดได้ดีที่สุดในขณะที่ชนิดเบตา (beta alloys) มีความต้านทานต่ำสุด โลหะผสมที่ใช้งานมากตัวหนึ่งคือ Ti-6Al-4V เป็นโลหะผสมชนิดอัลฟา-เบตา (alpha-beta alloy) ซึ่งมีอุณหภูมิใช้งานสูงสุดประมาณ 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากเฟสเบต้าทำให้โครงสร้างโดยรวมทนอุณหภูมิสูงได้ลดลง โลหะผสมที่เป็นเฟสอัลฟาเกือบทั้งหมด (near-alpha alloy) จะมีความต้านทานต่อการกัดที่ดีกว่า อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถใช้ไทเทเนียมผสมได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส เพราะว่าจะเกิดการเปราะ (embrittlement) และเกิดออกซิเดชันที่ผิว (surface oxidation)

เหล็กกล้าเฟอร์ริติกผสมต่ำ เรามักเลือกใช้เหล็กกล้าเฟอร์ริติกผสมต่ำ (low-alloy ferritic steels) ถ้าหากราคาไม่ใช่ปัจจัยสำคัญและยอมรับความหนาแน่นที่ค่อนข้างสูงได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส การเติมธาตุ โมลิบดีนัม (Mo) จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดเหล็กกล้าผสม Cr-Mo และ Cr-Mo-V อาจใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส

2.7.2.4 อุณหภูมิ 575 ถึง 650 องศาเซลเซียส

เหล็กกล้าสเตนเลสเฟอร์ริติก ในช่วงอุณหภูมินี้ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันสำคัญพอๆกับความต้านทานต่อการคืบ จะเติมธาตุโครเมียมเข้าไปในเหล็กเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดสะเก็ดที่ผิว (scaling) และปริมาณโครเมียมอย่างน้อย 8 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส สเตนเลสเฟอร์ริติกกลุ่ม 400 มีราคาต่ำกว่าเกรดที่เป็นออสเทนนิติกมาก เกรดนี้เปราะบางที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส ถ้าปริมาณโครเมียมสูงกว่า 13 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ความต้านทานต่อการคืบและความต้านทานต่อการฉีกขาดออกจากกัน (rupture and creep strength) มีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับเกรดออสเทนนิติก ข้อได้เปรียบของเหล็กกล้าเฟอร์ริติกคือ มีความต้านทานต่อออกซิเดชันดี ซึ่งใกล้เคียงกับชนิดออสเทนนิติก เหล็กชนิดนี้ได้รับการใช้งานเนื่องจากมีปริมาณธาตุผสมน้อยทำให้ราคาค่อนข้างต่ำ แม้ว่าจะเชื่อมได้ยากก็ตาม

2.7.2.5 อุณหภูมิ 600 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส

เหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก อุณหภูมิขีดจำกัดสูงสุดของเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติกมาตรฐานประมาณ 750 องศาเซลเซียส เหล็กกล้าสเตนเลสชนิด 316 ซึ่งมี Mo 2.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าความเค้นที่ทำให้เกิดการฉีกขาดออกจากกัน (stress-rupture) สูงสุดในตระกูล 300 โลหะผสมที่มีธาตุผสมเช่น Mo, Ti, W และ Nb มากกว่า มีความเค้นที่ทำให้เกิดการฉีกขาดออกจากกันสูงกว่าตระกูล 300 ในช่วงอุณหภูมิ 540-815 องศาเซลเซียส โลหะ Fe-Cr-Ni-Mn นั้นแข็งแรงกว่าโลหะผสมในตระกูล 300 ส่วนใหญ่

2.7.2.6 อุณหภูมิตั้งแต่ 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป

โลหะรีแฟรกทอรี (refractory metals) หรือโลหะทนความร้อนสูงนั้น โลหะรีเนียม (rhenium) มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงและทนต่อการสึกกร่อนและการสึกกร่อนแบบกัดเซาะได้ดี ที่อุณหภูมิสูง รีเนียมมีความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อแรงฉีกขาดออกจากกันโดยการคืบสูงสุดในบรรดาโลหะรีแฟรกทอรีทั้งหมด รีแฟรกทอรีอื่นๆเช่น ทังสแตน แทนทาลัม ไนโอเบียม และ โมลิบดีนัม นั้นมีใช้ในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม โลหะเหล่านี้ใช้ได้เฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ได้รับการปกป้องเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น โลหะทังสแตนใช้เป็น

หลอดไฟ และ โมลิบดีนัม ใช้เป็นตัวกันรังสีในเตาอุณหภูมิสูง ในสภาพที่ได้รับการปกป้องโลหะกลุ่มนี้อาจใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส

2.8 การออกแบบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

การออกแบบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนตามวิธีการของบัญชา ธนบุญสมบัติ (2543)

ได้กล่าวไว้ดังนี้

2.8.1 การป้องกันการกัดกร่อน

2.8.1.1 การออกแบบระบบให้เหมาะสม

การออกแบบโครงสร้างของระบบให้เหมาะสมสามารถช่วยหลีกเลี่ยงหรือชะลอการกัดกร่อนได้ หลักในการออกแบบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนมีดังนี้

(1) ป้องกันการเกิดเซลล์กัลวานิก ตัวอย่างเช่น ท่อเหล็กกล้าที่ต่อกับฟลักเจอร์ทองเหลืองจะเกิดเป็นกัลวานิกซึ่งทำให้ท่อเหล็กกล้าเกิดการกัดกร่อน แต่ถ้าเราใช้พลาสติกเป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างเหล็กกล้าและทองเหลือง ปัญหานี้อาจบรรเทาได้

(2) ออกแบบให้แอโนดใหญ่กว่าแคโทดมากๆ ตัวอย่างที่ถูกต้องเช่น ถ้าเราให้หมุดยึดเป็นทองแดง (copper rivet) ยึดแผ่นเหล็กกล้า หมุดยึดทองแดง (แคโทด) จะรับอิเล็กตรอนได้ไม่เร็วมากนัก ทำให้การกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้า (แอโนด) เกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่ถ้าเราทำผิดโดยใช้หมุดยึดที่ทำจากเหล็กกล้า (steels rivet) ยึดแผ่นทองแดง หมุดยึดเหล็กกล้าซึ่งเป็นแอโนดและมีพื้นที่เล็กๆจะสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับทองแดงในปริมาณมากอย่างรวดเร็ว นั่นคือ หมุดยึดจะเกิดการกัดกร่อนและอาจนำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้างในบริเวณนั้น

(3) ออกแบบชิ้นส่วนของระบบที่ทำให้ระบบของเหลวเป็นระบบปิด ภาชนะแก้วซึ่งมีน้ำอยู่ไม่เต็มจะเกิดการกัดกร่อนตามแนวขอบน้ำ ระบบเปิดจะละลายจะละลายก๊าซได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ไอออนซึ่งจะเข้าไปร่วมในปฏิกิริยาแคโทดิกและช่วยให้เกิดเซลล์ความเข้มข้น (concentration cell) ได้

(4) หลีกเลียงมุมอับระหว่างวัสดุที่อยู่ติดกัน การเชื่อม (welding) อาจเป็นการยึดต่อที่ดีกว่าการบัดกรีแข็ง (brazing) การบัดกรี (soldering) หรือการบัดกรีทางกล เนื่องจากโลหะเติม (filler metals) ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ในการเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างจากโลหะหลักที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ตัวยึดครัดด้วยแรงกลทำให้เกิดมุมอับซึ่งนำไปสู่การเกิดเซลล์ความเข้มข้น (concentration cell) อย่างไรก็ตามถ้าโลหะตัวเติมใกล้เคียงกับโลหะหลัก ก็อาจจะไม่เกิดไฟฟ้า-เคมีแบบนี้

(5) ออกแบบระบบให้สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนได้ ในกรณีที่เราไม่สามารถลดอัตราการเกิดการกัดกร่อนจนถึงระดับที่ไม่รบกวนอายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆได้ เราจำเป็นต้องออกแบบระบบเพื่อให้สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนได้โดยง่ายและประหยัด

2.8.1.2 การใช้สารเคลือบผิว

เป็นการแยกแอโนดและแคโทดออกจากกัน สารเคลือบผิวชั่วคราว เช่น จาระบีหรือน้ำมันนั้นอาจช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้บ้าง แต่อาจสูญหายไปได้โดยง่าย สารเคลือบผิวอินทรีย์ เช่น สี หรือเคลือบเซรามิกส์ เช่น เอนาเมล (enamel) หรือ แกส (glass) จะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า แต่ถ้าผิวเหล่านี้ถูกทำให้เสียหายแม้บางส่วน บริเวณแอโนดขนาดเล็กๆจะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะแห่งอย่างรวดเร็ว

2.8.1.3 การใช้สารยับยั้งการกร่อน

สารเคมีบางชนิดเมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มักจะเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณแอโนดหรือแคโทด และสามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ เช่น เกลือโครเมตทำหน้าที่เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนในหม้อน้ำรถยนต์ สารเคมีบางประเภท เช่น โครเมต (chromates) ฟอสเฟต (phosphates) และ โมลิบเดต (molybdates) จะทำให้เกิดฟิล์มบนผิวของแอโนดและแคโทด สารประเภทนี้มีการใช้งานในโรงไฟฟ้าและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

2.8.1.4 การป้องกันแบบแคโทดิก

เราอาจป้องกันการกัดกร่อนได้โดยการป้อนกระแสอิเล็กตรอนให้กับโลหะเพื่อบังคับให้โลหะนั้นกลายเป็นแคโทด

2.8.1.5 การป้องกันแบบแอโนดิก

โลหะที่อยู่ใกล้ทางฝั่งแอโนดิกของอนุกรมกัลวานิกนั้นจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายและมักทำตัวเป็นแอโนดในเซลล์กัลวานิก อย่างไรก็ตาม ถ้าโลหะเหล่านี้ถูกทำให้อยู่ในสภาพแพสซีฟ (passive) หรือมีความเป็นแคโทดมากขึ้น มันจะเกิดการกัดกร่อนด้วยอัตราที่ช้ามากกว่าปกติ เราสามารถสร้างสภาพแพสซีฟเวชันได้โดยการสร้างแอโนดิกโพลาริเซชันอย่างแรง (strong anodic polarization) ซึ่งจะช่วยป้องกันปฏิกิริยาแอโนดิก

2.8.2 การเลือกชนิดของโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

2.8.2.1 โลหะกลุ่มเหล็ก (ferrous metals)

เหล็กหล่อ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กหล่อเทา (gray cast iron) ซึ่งจมอยู่ในน้ำจะดีกว่าเหล็กละมุน (mild steel) ถ้าหากเราเติมนิกเกิลลงไปจนถึงประมาณ 3% ก็จะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและเพิ่มความแข็งแรง นอกจากนี้เรายังเพิ่มความต้านทานการกระแทกได้โดยการปรับองค์ประกอบทางเคมีและเงื่อนไขในการหล่อเพื่อให้ได้แกรไฟต์รูปร่างกลม (graphite spheroids) ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (สูงกว่า 65%) จะเกิดชั้นฟิล์มเหล็ก (II) ซัลเฟตซึ่งไม่ละลายบนผิวของเหล็กหล่อเทา ซึ่งฟิล์มนี้จะป้องกันเหล็กหล่อเทาจากการเกิดการกัดกร่อนเพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม หากมีสาเหตุใดก็ตามที่ทำให้ฟิล์มนี้ เช่น อัตราการไหลของตัวกลางเพิ่มขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือมีอนุภาคมาขัดสี จะทำให้เกิดการโจมตีแบบรูเข็ม (pitting attack) บนผิวได้ กรดซัลฟูริกเจือจางและกรดอื่นๆจะทำให้เหล็กที่ไม่ได้รับการผสมธาตุเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย เหล็กหล่อโครงสร้างออสเทนนิติกจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กที่ไม่ได้รับการผสมหรือผสมเล็กน้อย ในกรดซัลฟูริกเจือจางและกรดอื่นๆอีกหลายชนิด รวมทั้งสารละลายที่เป็นด่าง (caustic solution)

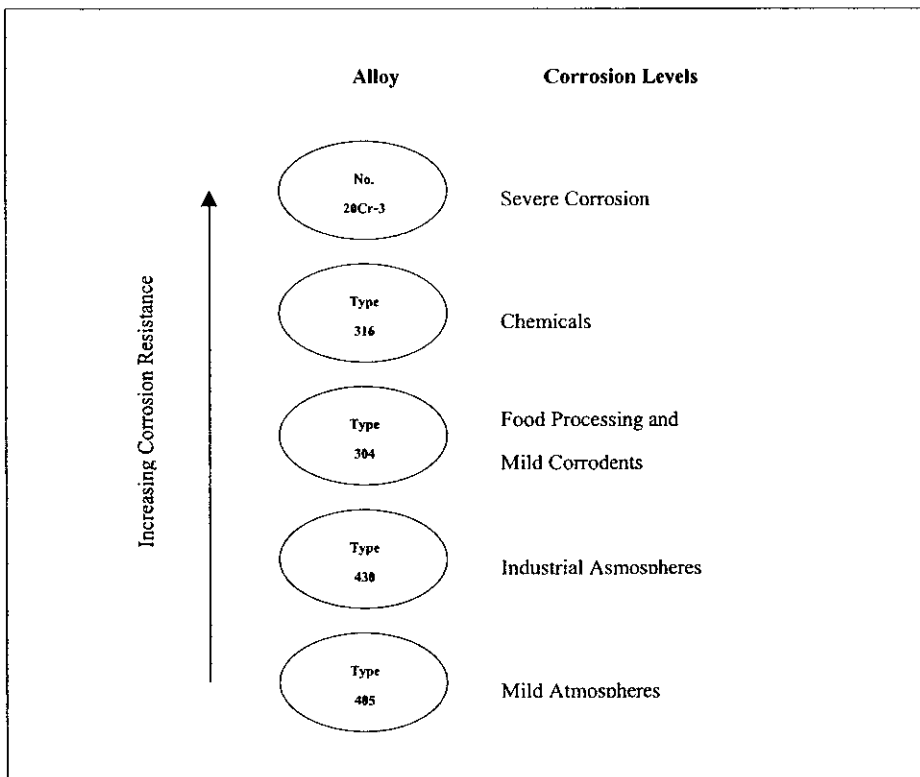
เหล็กและเหล็กกล้า เป็น โลหะที่ใช้กันมากที่สุดนั้นเกิดการกัดกร่อนได้ในตัวกลางหลายประเภท รวมทั้งภายใต้บรรยากาศนอกอาคารสถานที่ ตามปกติเรามักจะเลือกเหล็กและเหล็กกล้าเนื่องจากสมบัติด้านอื่นๆที่ไม่ใช่ความต้านทานการกัดกร่อน เช่น ความแข็งแรง การขึ้นรูปง่าย เนื่องจากเหล็กและเหล็กกล้าเป็น โลหะที่ไม่จัดว่าทนการกัดกร่อนได้ดีนัก เหล็กกล้าทนสารเคมีบางประเภท เช่น อัลคาไล (alkalis) สารเคมี (organics) หลายชนิดและกรดออกซิไดซิงอย่างแรง (strong oxidizing acids)

เหล็กอะลูมิเนียม อาจเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อนได้ในตัวกลางที่มีไนไตรด์ (nitrides) ไฮดรอกไซด์ (hydroxides) แอมโมเนีย (ammonia) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) ถ้ามีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นอาจทำให้เกิดการเปราะ (embrittlement) และการบวมที่ผิวได้

เหล็กกล้าผสมต่ำ เหล็กกล้าผสมต่ำ (low alloy steels) มีปริมาณธาตุผสมหลักรวมกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ เหล็กกล้าผสมต่ำได้รับการออกแบบมาเพื่อให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าที่ไม่มีธาตุผสม ยกเว้นกรณีในบรรยากาศซึ่งมีการปรับปรุงความต้านทานบ้าง เช่น เหล็กกล้าผสมอาจเกิดสนิมช้ากว่าเหล็กกล้าคาร์บอนปกติที่ไม่มีทองแดงประมาณ 3 เท่า

เหล็กกล้าสแตนเลส หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า สแตนเลส ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เป็นวัสดุทนทานต่อการกัดกร่อนและทดแทนเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steels) และเหล็กกล้าผสมต่ำ (low alloy steels) เหล็กกล้าสแตนเลสมีโครเมียมประมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์ และอาจมีนิกเกิล โมลิบดีนัม และทองแดงเป็นธาตุผสมหลักประกอบอยู่ด้วย โดยที่ โครเมียมช่วยเพิ่มความต้านทานต่อตัวกลางออกซิไดซิงและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง โมลิบดีนัมช่วยลดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting) โดยคลอไรด์ นิกเกิล (อาจสูงได้ถึง 35 เปอร์เซ็นต์) ทองแดง (2-3 เปอร์เซ็นต์) และ โมลิบดีนัม (1-4 เปอร์เซ็นต์) ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในตัวกลางอื่นๆที่ออกซิไดซ์ได้ไม่มากนัก (less oxidizing media) ธาตุเหล่านี้ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อซัลฟูริกและกรดอินทรีย์หลายชนิด เหล็กกล้าสแตนเลสมีมากกว่า 70 ชนิด หลายชนิดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนคล้ายคลึงกันแต่ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้มีสมบัติอื่นๆที่ต้องการ เช่น มีความแข็งแรงสูงหรือกัดแต่งได้ง่าย โดยทั่วไป เรามักจะแบ่งเหล็กกล้าสแตนเลสตามโครงสร้างจุลภาคเป็น 5 กลุ่มหลัก ได้แก่ (1) เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (austenitic stainless steels) (2) เหล็กกล้าสแตนเลสมาร์

เทนซิติก (martensitic stainless steels) (3) เหล็กกล้าสแตนเลสเฟอร์ริติก (ferritic stainless steels) (4) เหล็กกล้าสแตนเลสดูเพล็กซ์ (duplex stainless steels) และ (5) เหล็กกล้าสแตนเลสที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (precipitation-hardening stainless steels) อีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการเลือกเหล็กกล้าสแตนเลสได้ เรียกว่า ระบบ selectaloy หลักการของระบบนี้ได้แก่การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าสแตนเลสตามการใช้งานมากกว่าการแบ่งตามลักษณะ โครงสร้างหรือองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงต่อผู้เลือกใช้วัสดุมากกว่า ในกรณีทั่วไป การเลือกใช้โลหะมักจะต้องคำนึงถึงสมบัติของโลหะเป็นอันดับแรกๆ สำหรับเหล็กกล้าสแตนเลสสมบัติที่สำคัญที่สุดคือความทนทานต่อการกัดกร่อน โดยระบบ selectaloy แบ่งเหล็กกล้าสแตนเลสออกเป็น 5 กลุ่มตามระดับความต้านทานการกัดกร่อนดังรูปที่ 5-10 เหล็กกล้าสแตนเลส type 405 (12Cr) เป็นตัวแทนของกลุ่มที่มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำสุด ความต้านทานต่อการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นจากกลุ่ม type 405 (12Cr), type 304 (18Cr-9Ni), type 316 (17Cr-13Ni-2Mo) และบนสุดของสเกลคือ alloy 20 (20Cr-33Ni-2Mo-3Cu) ซึ่งนับได้ว่าเป็นโลหะผสมที่อยู่ระหว่างเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติกกับนิกเกิลผสม



ภาพประกอบ 2-11 แผนภาพเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าสแตนเลส
ที่มา : บัญชา ธนบุญสมบัติ (2543)

2.8.2.2 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (nonferrous metals)

อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสมจะทนต่อการกัดกร่อนได้ไม่ดีเท่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เชิงพาณิชย์ (commercial-purity aluminum) ธาตุผสมในอะลูมิเนียมนั้นมีหน้าที่หลักคือ ปรับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติต่างๆ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน การกัดกร่อนแบบกัลวานิกจะเป็นปัญหาเมื่อมีการใช้อะลูมิเนียมในโครงสร้างที่ซับซ้อน เนื่องจากอะลูมิเนียมนั้นจะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายเมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ เช่น เหล็ก เหล็กกล้าสเตนเลส ไททาเนียมผสม ทองแดงผสม และนิกเกิลผสม เป็นต้น ถ้าหากเกิดปฏิกิริยากัลวานิกขึ้น อะลูมิเนียมจะเกิดการกัดกร่อนมากกว่าและอาจจะทำให้เกิดผลเสียข้างเคียงตามมาได้อีก เช่น โลหะส่วนอื่นที่เป็นแคโทดอาจจะให้ก๊าซไฮโดรเจนออกมาและทำให้เกิดการแตกเนื่องจากไฮโดรเจน (hydrogen cracking) ในโครงสร้างที่ทำจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าสเตนเลสได้

ไททาเนียม ไททาเนียมที่นิยมใช้ในงานกัดกร่อนมากที่สุดคือ ระดับความบริสุทธิ์เชิงพาณิชย์ (commercial purity) ความทนทานการกัดกร่อนของไททาเนียมขึ้นอยู่กับฟิล์มออกไซด์บนผิวชิ้นงาน ดังนั้น ไททาเนียมจึงมีประสิทธิภาพสูงในตัวกลางออกซิไดซิง (oxidizing media) เช่น กรดไนตริกร้อน ฟิล์มออกไซด์ของไททาเนียมนั้นสามารถป้องกันได้ดีกว่าฟิล์มของเหล็กกล้าสเตนเลส และมักจะทำได้ดีในตัวกลางที่มักจะเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting) และการกัดกร่อนที่มุมอับ (crevice corrosion) ที่เกิดกับเหล็กสเตนเลส ตัวกลางดังกล่าว เช่น น้ำทะเล เว็ทคลอรีน (wet chlorine) และคลอไรด์อินทรีย์ (organic chlorides) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ถ้าที่อุณหภูมิสูง ไททาเนียมก็อาจเกิดการกัดกร่อนโดยกลไกทั้งสองแบบที่กล่าวถึงได้เช่นกัน เช่น การกัดกร่อนน้ำทะเลที่อุณหภูมิสูงกว่า 121 องศาเซลเซียส ถ้าหากมีมุมอับอยู่ในบริเวณนั้น

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การทำวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษากระบวนการผลิตไคตินและไคโตซานเพื่อจะได้นำสภาวะที่ได้มาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน ซึ่งกำหนดจะผลิตโดยใช้วิธีทางเคมี และจะใช้สภาวะที่กำหนดโดย Chandumpai *et al.* (2004) อย่างไรก็ตามสภาวะดังกล่าว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการเลือกใช้ชนิดของสารเคมีที่สามารถใช้ประโยชน์อย่างต่อเนื่อง และการนำสารเคมีกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งคาดว่าจะสามารถลดมลภาวะและลดต้นทุนของการผลิตลงได้ ดังนั้นจึงได้ทดลองเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนชนิดของสารเคมี จาก NaOH เป็น KOH ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยจะเปรียบเทียบจากคุณภาพของไคโตซานและตรวจสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารเคมีว่าได้ผลเหมือนเดิมหรือไม่ ต่อมาจะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำสารเคมีกลับมาใช้ซ้ำและทดสอบจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ซ้ำ โดยจะตรวจสอบปริมาณโปรตีนที่สกัดออกจากสารละลายที่เหลือใช้สองกระบวนการคือ กระบวนการกำจัดโปรตีนและกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติก ซึ่งหากมีมากอาจมีผลรบกวนการสกัดโปรตีนในการนำมาใช้ครั้งต่อไป แล้วทดสอบจำนวนครั้งของการนำมาใช้ซ้ำโดยเปรียบเทียบจากคุณภาพของไคโตซานว่ายังมีคุณสมบัติเหมือนเดิมหรือไม่ สุดท้ายจะเป็นการทดสอบการผลิตจริงกับเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซานที่ได้สร้างขึ้น

3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ NaOH และ KOH ในขั้นตอนการสกัดโปรตีน และปฏิกิริยา Deacetylation เพื่อการเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึก

ทำการผลิตไคตินและไคโตซานโดยใช้ NaOH และ KOH แล้วนำมาทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของไคโตซานที่ผลิตได้ทั้งสองวิธี

3.1.1 การผลิตไคตินและไคโตซาน

การเตรียมไคติน ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกในการผลิตนี้จะดำเนินการตามสภาวะที่แนะนำโดย Chandumpai *et al.* (2004)

3.1.1.1 การเตรียมวัตถุดิบกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้ง

กระดองปลาหมึกที่นำมาใช้ในการผลิตได้มาจากปลาหมึกกล้วย (*Loligo formosana*) โดยเก็บตัวอย่างสดจาก บริษัท เทพพิทักษ์ ซีฟู๊ดส์ จำกัด จังหวัดปัตตานี นำมาล้างด้วยน้ำประปาจนสะอาด ตากและอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 16-18 ชั่วโมง นำกระดองในรูปกรอบแห้งมาทำให้เป็นชิ้นเล็กๆ บดหยาบ แล้วบดละเอียดผ่านตะแกรงแยกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไคติน

เปลือกกุ้งที่นำมาใช้ในการผลิตได้มาจากกุ้งขาว (*Penaeus vanamei*) เก็บตัวอย่างสดเฉพาะส่วนของเปลือกที่ไม่มีส่วนหัวผสม จากบริษัทห้องเย็น โชติวัฒน์ขนาดใหญ่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสงขลา ล้างด้วยน้ำประปาจนสะอาด นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประมาณ 16-18 ชั่วโมง นำมาบดเป็นเปลือกกุ้งผงเช่นเดียวกับกระดองปลาหมึกดังกล่าวข้างต้น เป็นวัตถุดิบเพื่อเตรียมไคติน

3.1.1.2 การเตรียมไคตินจากกระดองปลาหมึก

การเตรียมไคตินจากกระดองปลาหมึกในการผลิตนี้ดำเนินการตามสภาวะที่แนะนำ โดย Chandumpai *et al.* (2004) คือเติมตัวอย่างกระดองปลาหมึกผงที่เตรียมจากข้อ 3.1.1.1 ลงในภาชนะผลิตที่มีสารละลาย 1.0 M NaOH ด้วยอัตราส่วน 1:13 (น้ำหนัก:ปริมาตร) ผสมให้เข้ากันด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองด้วยผ้ากอซ 4 ชั้น โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ล้างส่วนที่กรองได้ 2 ครั้งด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการกำจัดอ็อกซิเจน ปรับ pH ให้เป็นกลางด้วย 5.0 M HCl กรองไคตินที่ได้ใส่ถาดแก้ว แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประมาณ 16-18 ชั่วโมง เพื่อให้สามารถประเมินเปอร์เซ็นต์ปริมาณผลผลิตที่แน่นอน จึงทำการชั่งน้ำหนักทันทีหลังจากวางให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในเคสซิเคเตอร์ เก็บไคตินในภาชนะปิดสนิทเพื่อนำไปใช้ในการเตรียมโคโคซานต่อไป ทำซ้ำด้วยวิธีการเดียวกันแต่เปลี่ยนเป็นใช้สารละลาย KOH แทนการใช้ NaOH

3.1.1.3 การเตรียมไคโตซานจากกระดองปลาหมึก

ขั้นตอนการเตรียมไคโตซานจากไคตินซึ่งสกัดจากกระดองปลาหมึก ใช้สภาวะเช่นเดียวกับวิธีที่แนะนำโดย Chandumpai *et al.* (2004) คือเติมไคตินลงในภาชนะผลิตที่มี 50 เปอร์เซ็นต์ NaOH โดยใช้อัตราส่วนของไคตินต่อสารละลายค่างเป็น 1:15 (น้ำหนัก:ปริมาตร) ผสมให้เข้ากันด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงโดยเปลี่ยน 50 เปอร์เซ็นต์ NaOH ใหม่ทุกๆ 2 ชั่วโมง กรองผ่านซินเทอร์กลาส (ASTM No. 40-60, C) แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการกำจัดอ็อกซิเจน ปรับ pH ให้เป็นกลางด้วย 5.0 M HCl ล้างด้วยอะซิโตน 2 ครั้ง และอะซิโตน 1 ครั้ง นำใส่ถาดแก้วและนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 16-18 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักทันทีหลังวางให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ เพื่อประเมินเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไคโตซาน ทำซ้ำด้วยวิธีการเดียวกัน แต่เปลี่ยนเป็นใช้สารละลาย KOH แทนการใช้ NaOH

3.1.1.4 การเตรียมไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

การกำจัดแร่ธาตุจากเปลือกกุ้งดำเนินการตามสภาวะที่แนะนำโดย Chandumpai *et al.* (2004) โดยค่อยๆ เทเปลือกกุ้งบดละเอียดที่เตรียมจากข้อ 3.1.1.1 ลงใน 1.0 M HCl (อัตราส่วนของเปลือกกุ้งต่อสารละลายกรดเป็น 15:190 (น้ำหนัก:ปริมาตร) ผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง กรองแล้วล้างหลายๆครั้งด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการกำจัดอ็อกซิเจน ปรับ pH ให้เป็นกลางนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในตู้อบลมร้อน นำผลผลิตที่ได้จากการกำจัดแร่ธาตุไปกำจัดโปรตีนและกำจัดหมู่อะซิติดด้วยวิธีการเดียวกับการเตรียมไคตินและไคโตซานจากกระดองปลาหมึก แต่ในขั้นตอนการกำจัดหมู่อะซิติดใช้อุณหภูมิ 126 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักแห้งเพื่อประเมินเปอร์เซ็นต์ผลผลิต

3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของไคโตซาน

เปรียบเทียบความแตกต่างของการผลิตไคโตซานเมื่อเปลี่ยนการใช้สารละลาย NaOH เป็นสารละลาย KOH โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาจากปริมาณโปรตีนในสารละลายทั้งสองซึ่งจะวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนด้วยวิธี burette method และ lowly method รวมทั้งทดสอบคุณภาพของไคโตซานด้วยค่าน้ำหนักโมเลกุล และระดับการกำจัดหมู่อะซิติด

3.1.2.1 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล

น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานจากกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งวิเคราะห์โดยวิธีวัดความหนืดของสารละลายตามวิธีที่แนะนำโดย Bronswijk (1975) นำไคโตซานตัวอย่าง 0.05 กรัม ละลายใน 100 มิลลิลิตร กรดอะซิติกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ กวนให้ละลายด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองผ่านซินเทอร์เกรส (ASTM No. 40-60, C) เจือจางสารละลายไคโตซานด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 % ให้มีความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับ คือ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 กรัม ต่อเดซิลิตร วัดความหนืดของสารละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ ubbelohde viscometer นำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณต่อไป

ทำการทดลอง 3 ซ้ำสำหรับแต่ละความเข้มข้น นำค่าเฉลี่ยไปคำนวณ relative viscometer (η_{rel}/C), specific viscosity (η_{sp}), specific viscosity per concentration (η_{sp}/C), In.relative viscosity ($\ln.\eta_{rel}$) และ In.relative viscosity per concentration ($\ln.\eta_{rel}/C$) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า η_{sp}/C กับความเข้มข้น (C) และค่า $\ln.\eta_{rel}/C$ กับความเข้มข้น (C) สังเกตค่า intrinsic viscosity (η) ได้มาจากค่า η_{sp}/C มีความเข้มข้นเป็นศูนย์ การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Log } [\eta] = \log K + a \log Mv \quad 3-1$$

เมื่อกำหนดให้ K และ a เป็นค่าคงที่มีค่า; 8.93×10^4 และ 0.71 ตามลำดับ

โดยที่	Mv	=	viscosity average-molecular weight
	$[\eta]$	=	intrinsic viscosity

3.1.2.2 การวัดระดับการกำจัดหมู่อะซิติล

การวัดการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานดำเนินการโดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ตามวิธีที่แนะนำโดย Muzzarelli และ Rocchetti (1985) ซึ่งพบว่าที่ความยาวคลื่น 205 นาโนเมตร กรดอะซิติกจะมีการรบกวนการดูดกลืนแสงน้อยที่สุด หรือที่ความเข้มข้นต่างๆมีการดูดกลืนแสงเป็นศูนย์ และค่า first derivative absorption spectrum N-acetyl-D-glucosamine มีค่าสูงสุดทุกความเข้มข้น

เตรียมสารละลาย N-acetyl-D-glucosamine ความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับใน 0.01 M กรดอะซิติก (5-40 มิลลิกรัม/ลิตร) นำไปวัดค่า absorbance ของ first derivative spectrum ของแต่ละความเข้มข้น เขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่า absorbance

การวัดค่า degree of deacetylation ของโคโคซานดำเนินการโดยเตรียมโคโคซาน 10 มิลลิกรัม ใน 0.1 M กรดอะซิติก 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 205 นาโนเมตร นำค่าที่วัดได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาปริมาณของ N-acetyl-D-glucosamine แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ของ degree of deacetylation ในโคโคซานที่ทดสอบโดยแต่ละตัวอย่างทำ 5 ซ้ำ

3.1.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Burette

เตรียมสารละลายโปรตีนมาตรฐานจาก brovine serum albumin ความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับในสารผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้นร้อยละ 5 และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในสารละลายโซเดียมโพแตสเซียมทาร์เตรต (เข้มข้นร้อยละ 1) ที่ทิ้งไว้ 10 นาที นำไปวัดค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่า absorbance นำค่าที่วัดได้กับตัวอย่างไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน

3.1.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Lowly

ใช้วิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนที่มีปริมาณน้อยการหาโปรตีนตามวิธีที่แนะนำโดย Lowly *et al.* (1951) โดยวิธีนี้มีความไว (sensitivity) สูงกว่าวิธี burette ประมาณ 100 เท่า สามารถวัดปริมาณโปรตีนที่มีความเข้มข้นต่ำๆระดับ 10-100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร โดยเตรียมสารละลายโปรตีนมาตรฐานจาก brovine serum albumin (BSA) ความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับในสารผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ในสารละลายโซเดียมโพแตสเซียมทาร์เตรต (เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์) ที่ทิ้งไว้ 10 นาที เติมสารละลาย folin-ciocalteus phenol reagent ที่ทิ้งไว้ 30 นาที นำไปวัดค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่า absorbance นำค่าที่วัดได้กับตัวอย่างไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน

3.2 ประเมินและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้ซ้ำ

ทดสอบสารละลาย KOH ที่ผ่านกระบวนการผลิตเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ซ้ำ โดยนำสารละลายที่ใช้แล้วมาวัดปริมาณโปรตีนด้วยวิธี burette method ใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.3 และ lowly method ใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.4 ซึ่งคาดว่าปริมาณโปรตีนในสารละลายจะรบกวนการผลิตหากนำกลับมาใช้ซ้ำ และวัดความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้แล้วด้วยการไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อให้ทราบว่ามีปริมาณค่าเหลืออยู่มากน้อยเท่าไร เมื่อทราบแล้วว่าควรใช้สารละลายที่ใช้แล้วจากกระบวนการสกัดโปรตีน หรือกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลกลับมาใช้ซ้ำ จะทดสอบเพื่อหาจำนวนครั้งของการนำมาใช้ซ้ำ โดยวิเคราะห์จากคุณภาพของโคโคซานจากค่าน้ำหนักโมเลกุล ใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.1 และระดับการกำจัดหมู่อะซิติล ใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.2

3.3 ประเมินและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือไปใช้ประโยชน์ต่อเนื่อง (ทำปุ๋ยน้ำ)

สารละลาย KOH ที่ไม่ใช้แล้วจะนำมาปรับสภาพให้เป็นกลาง (neutralization) เพื่อผลิตเป็นปุ๋ยน้ำ โดยการเติมกรดฟอสฟอริกเอซิก (H_3PO_4) จนมีสภาพเป็นกลาง ($pH = 7.0$) ปุ๋ยน้ำที่ได้จะประกอบด้วยธาตุหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) โดย N ได้จากโปรตีนที่อยู่ในสารละลาย P ได้จากกรดฟอสฟอริก และคำนวณในรูปของฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) และ K ได้จากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารละลายค่าที่เหลือใช้ และคำนวณในรูปของโพแทสเซียมที่ละลายน้ำ (K_2O)

3.4 ศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของโคโคซานและโคโคซานที่ผลิตด้วยเครื่องผลิตโคโคซาน-โคโคซาน

เป็นการตรวจวิเคราะห์สมบัติของโคโคซานที่ผลิตจากเครื่องผลิตที่สร้างขึ้น โดยใช้สภาวะเดียวกับข้อ 3.1.1 ใช้สารละลาย KOH เป็นหลัก ปริมาณการผลิต 1 กิโลกรัมเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึก โดยจะศึกษาจำนวนผลผลิตที่ได้จากค่า เบอร์เซ็นต์ผลได้ (เบอร์เซ็นต์ yields) และศึกษาคุณภาพของโคโคซานจากค่าน้ำหนักโมเลกุล (MW) ใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.1 ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (เบอร์เซ็นต์ DD) ใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.2 ปริมาณไนโตรเจนดังข้อ 3.4.1 และเบอร์เซ็นต์เถ่าดังข้อ 3.4.2 ส่วนปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ นิกเกิล (Ni) และแคดเมียม (Cd) ดังนั้น

จึงทำการตรวจสอบปริมาณโลหะทั้งสองโดยใช้เครื่อง Optical Emission Spectrometer (Optima 4300 DV) โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน

การวิเคราะห์หาไนโตรเจนใช้วิธีของ Kjeldahl ซึ่งแนะนำใน A.O.A.C. (1984) โดยชั่งสารตัวอย่างน้ำหนัก 0.5 กรัม (ถ้าอาหารชนิดนั้นมีเปอร์เซ็นต์โปรตีนน้อยให้ใช้ตัวอย่างปริมาณมากขึ้น) โดยชั่งด้วยกระดาษกรองที่ไม่มีสารไนโตรเจน แล้วใส่ในขวดแก้ววิเคราะห์โปรตีนพร้อมกระดาษชั่งสาร (เพื่อไม่ให้สารติดข้างหลอด) เติมสารเร่งรวม 2.2 กรัม เพื่อเป็นตัวช่วยปฏิกิริยาการย่อย (ปกติเมื่อเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป จุดเดือดของสารละลายจะเป็น 330 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเติมสารเร่งจะทำให้จุดเดือด (boiling point) ของสารละลายเพิ่มเป็น 400 องศาเซลเซียส) เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร (ถ้าใช้ตัวอย่างมากกว่า 2 กรัม ขึ้นไปให้เพิ่มกรดซัลฟูริกเข้มข้นอีก 10 มิลลิลิตร/กรัมของตัวอย่างอาหารที่เพิ่มขึ้น) นำไปต้มบนเครื่องย่อย โดยในครั้งแรกในครั้งแรกให้ใช้ความร้อนต่ำจนกระทั่งเดือดแล้วจึงเพิ่มความร้อนให้สูงขึ้นจนกระทั่งสารละลายในขวดแก้ววิเคราะห์โปรตีนใสหรือเป็นสีฟ้าใส (เป็นสีของสารเร่งรวม) ทิ้งไว้ให้เย็น นำสารละลายที่ได้จากการย่อยมาปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร บีบอัดสารละลายที่ปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้ววิเคราะห์โปรตีน ค่อยๆ เท 45 เปอร์เซ็นต์ NaOH ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้ววิเคราะห์โปรตีน อย่าให้สารละลายกระเพื่อมซึ่งจะทำให้สารละลายทำปฏิกิริยากันก่อนที่จะทำการกลั่น ต่อขวดแก้ววิเคราะห์โปรตีนเข้ากับเครื่องกลั่น บีบอัด 0.2 M HCl 10 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปกรวยเพื่อดักจับแก๊สแอมโมเนีย โดยให้ปลายของหลอดแก้วที่ต่อจากกระบอกควมแน่นจุ่มอยู่ในกรดไฮโดรคลอริก ทำการกลั่นจนกระทั่งไม่มีแก๊สแอมโมเนียออกมาแล้วล้างปลายเครื่องกลั่นด้วยน้ำกลั่น นำไปไทเทรตด้วย 0.1M NaOH โดยใช้เมทิลเรด (methyl red) เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสารละลายใส

3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า

การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าในสารตัวอย่างดำเนินการตามวิธีที่แนะนำใน A.O.A.C. (1984) โดยเผากระเบื้องเคลือบในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ปิดสวิทซ์เตาเผาแล้วรอประมาณ 30-45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิภายในลดลงก่อน แล้วนำออกจากเตาเผา ใส่ใน โถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก เผาซ้ำอีกครั้งละประมาณ 30 นาที และกระทำเช่นเดียวกับข้อ 1 จนได้ผลต่างของน้ำหนักทั้งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบซึ่งทราบน้ำหนักแล้ว นำไป

เผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง จนกระทั่งตัวอย่างกลายเป็น
 ฝ้าสีขาวหรือสีเทาอ่อน นำออกจากเตาเผาใส่ใน โถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่ง
 น้ำหนักแล้วนำกลับไปเผาอีกประมาณ 30 นาที กระทำเช่นเดิมจนได้น้ำหนักทั้งสองครั้งติดต่อกันไม่
 เกิน 1-3 มิลลิกรัม คำนวณหาปริมาณฝ้าจากสมการที่ 3-2

$$\text{ปริมาณฝ้า (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \quad 3-2$$

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน

4.1 การออกแบบรูปทรงและขนาดของเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน

จากการคำนวณปริมาณการใช้สารเคมีและวัตถุดิบในกระบวนการขจัดหมู่อะซิติลเพื่อเปลี่ยนไคตินเป็นไคโตซาน เนื่องจากกำหนดจะทำการผลิตให้ได้ไคโตซานครั้งละ 1 กิโลกรัม จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการพบว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไคโตซานจากไคตินในกระบวนการขจัดหมู่อะซิติลของกุ้งและกระดองปลาหมึก เท่ากับ 69.63 และ 61.74 ดังนั้นเพื่อผลิตให้ได้ไคโตซาน 1 กิโลกรัม จะต้องใช้ไคตินประมาณ 1.6 กิโลกรัม

ในกระบวนการขจัดหมู่อะซิติลจะใช้สารละลายต่างในการขจัดหมู่อะซิติลออกจากไคตินจะได้ผลผลิตเป็นไคโตซาน ซึ่งตามวิธีการของ Chandumpai *et al.* (2004) จะใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณไคตินต่อปริมาตรสารละลายต่าง เท่ากับ 1:15 ดังนั้นเมื่อใช้ไคติน 1.6 กิโลกรัมจะต้องใช้สารละลายต่างเท่ากับ 24 ลิตร

ผงไคติน 1.6 กิโลกรัมเมื่อละลายในสารละลายต่าง 24 ลิตร จะทำให้ปริมาตรรวมของภาชนะประมาณ 25 ลิตร ดังนั้นถังผลิตไคติน-ไคโตซานควรมีปริมาตรอย่างน้อย 25 ลิตร รวมทั้งมีพื้นที่สำหรับระดับของสารทำปฏิกิริยาในถังจนผสมที่จะยกขึ้นในระหว่างการกวน จึงได้ออกแบบให้ถังกวนผสมมีปริมาตรประมาณ 30 ลิตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความสูงจากขอบถึงถึงกัน 46 เซนติเมตร ตามแบบมาตรฐานถังกวนผสมที่แนะนำโดย Vincent (1967) ซึ่งได้แสดงการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรรูปไข่} &= 0.524D_1^2h && 4-1 \\ \text{ปริมาตรทรงกระบอก} &= \pi r^2 h && 4-2 \end{aligned}$$

โดยที่ V คือ ปริมาตร (มิลลิลิตร)

D_1 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)

r คือ รัศมี (เช่นติเมตร)

h คือ ส่วนสูง (เช่นติเมตร)

ดังนั้น ปริมาตรรวม = ปริมาตรถัง + ปริมาตรก้นถัง

ปริมาตรถังดังสมการ ที่ 4-2

$$= \pi \times 15^2 \times 40$$

$$= 28,274.3 \text{ มิลลิลิตร}$$

ปริมาตรก้นถังดังสมการ ที่ 4-1

$$= 0.524 \times 30^2 \times 6$$

$$= 2,829.6 \text{ มิลลิลิตร}$$

ปริมาตรรวม 31,103.9 มิลลิลิตร

จากนั้นจะคำนวณพื้นที่ผิวเพื่อใช้ในการประเมินเรื่องการเคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งได้แสดงการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\text{พื้นที่ผิวรูปไข่} = 0.785D_i^2 \left[1 + \frac{8h^2}{D_i^2} \left(1 - \frac{h}{D_i} \right) \right] \quad 4-3$$

$$\text{พื้นที่ผิวทรงกระบอก} = 2 \pi r h \quad 4-4$$

เมื่อ

A คือ พื้นที่ผิว (เช่นติเมตร²)

D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (เช่นติเมตร)

r คือ รัศมี (เช่นติเมตร)

h คือ ส่วนสูง (เช่นติเมตร)

ดังนั้น พื้นที่ผิวรวม = พื้นที่ผิวถัง + พื้นที่ผิวก้นถัง + พื้นที่ผิวฝาถัง

พื้นที่ผิวถังดังสมการ ที่ 4-4

$$= 2 \times \pi \times 15 \times 40$$

$$= 3769.9 \text{ เช่นติเมตร}^2$$

พื้นที่ผิวก้นถังดังสมการ ที่ 4-3

$$\begin{aligned}
 &= 0.785 \times 30^2 \times \left[1 + \frac{(8 \times 6^2)}{30^2} \left(1 - \frac{6}{30} \right) \right] \\
 &= 887.4 \text{ เซ็นติเมตร}^2 \\
 &\text{พื้นที่ผิวผาดังสมการ ที่ 4-3} \\
 &= 0.785 \times 30^2 \times \left[1 + \frac{(8 \times 6^2)}{30^2} \left(1 - \frac{6}{30} \right) \right] \\
 &= 887.4 \text{ เซ็นติเมตร}^2 \\
 &\text{พื้นที่ผิวรวม } 5,544.6 \text{ เซ็นติเมตร}^2
 \end{aligned}$$

4.2 การออกแบบชุดกวนของเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน

เครื่องต้นแบบผลิตไคโตซานมีลักษณะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่มีชุดการกวนผสม ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ได้แก่ มอเตอร์ เพลาส่งกำลัง ใบกวน ซึ่งได้ออกแบบดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

4.2.1 การเลือกใช้มอเตอร์

การเลือกใช้มอเตอร์ตามหลักของ Vincent (1967) อธิบายว่ามอเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับเครื่องจักรกลที่ใช้มากที่สุด มอเตอร์ถูกนำมาใช้ในหุ่นยนต์เครื่องจักรในกระบวนการผลิต มอเตอร์ประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ (AC) มอเตอร์ซิงโครนัสกระแสสลับ (AC) มอเตอร์กระแสตรง (DC) และสเตรปิงมอเตอร์ การเลือกมอเตอร์นั้น ขั้นตอนจะต้องทำความเข้าใจว่าต้องการคุณสมบัติใดของมอเตอร์เพื่อใช้ในเครื่องจักรกลที่กำลังออกแบบ เงื่อนไขที่สำคัญในการเลือกมอเตอร์คือ ขนาดของภาระแรง และเงื่อนไขในการควบคุม

ที่สภาวะอ้างอิง คือ ไม่มีแก๊สในของผสม มีการกำหนดขนาดถังและความหนืด (viscosity) ของสารที่แน่นอน พลังงานที่ให้กับใบพัดในการกวนผสมสารจะเท่ากับ

$$\text{Power (P)} = \frac{N_{p(\text{ref})} (\text{SG}) N^3 D^5}{2.158 \times 10^{17}} \quad 4-5$$

โดยที่ P	คือ กำลังของใบพัด (วัตต์)
$N_{p(ref)}$	คือ ตัวเลขพลังงาน (Number Power)
SG	คือ ความถ่วงจำเพาะของของเหลว
N	คือ ความเร็วของใบพัด (รอบต่อนาที)
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (มิลลิเมตร)

ตารางที่ 4-1 ปริมาณ $N_{p(ref)}$ สำหรับใบพัดแบบต่างๆ

Impeller Type	N_p ที่ $N_{re}=5$ (ไหลแบบราบเรียบ)	N_p ที่ $N_{re}=10^5$ (ไหลแบบปั่นป่วน)
Flat Blade	13.0	5.75
Bar Turbine	9.8	0.61
Propeller Three Blades	11.0	0.87
Axial Flow Four Blades	8.9	1.27
Axial Flow Three Blades	8.0	0.53

ที่มา : Vincent (1967)

เนื่องจากออกแบบให้ใบพัดเป็นแบบ Axial Flow Four Blades มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร กำหนดให้การกวนผสมแบบราบเรียบ ค่า N_p จากตารางที่ 4-1 เท่ากับ 8.9 ความเร็วรอบของใบพัดเท่ากับ 120 รอบต่อนาที ความถ่วงจำเพาะของของเหลวเท่ากับ 100 ดังนั้นคำนวณค่าพลังงานที่ให้กับใบพัดดังสมการที่ 4-5 ได้ค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{8.9 \times 100 \times 120^3 \times 100^5}{2.158 \times 10^{17}} \\
 &= 71.26 \quad \text{วัตต์} \\
 &= 0.09 \quad \text{แรงม้า}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณพบว่ากำลังของมอเตอร์มีปริมาณน้อย จึงได้เลือกมอเตอร์ที่มีจำหน่ายขนาด 0.25 แรงม้า และเป็นมอเตอร์แบบ inverter ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบในการกวนได้ โดยการปรับความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

4.2.2 การออกแบบใบพัด

การออกแบบใบพัดตามหลักของ ธนกร ณ พัทลุง(2549) อธิบายว่าใบพัดพื้นฐานมี 7 ประเภท คือ ใบพัดแบน (flat blade) กังหัน (bar turbine) สมอเรือ (anchor) ใบพัด 3 ใบ (propeller three blades) หมุนตามแกน 4 ใบ (axial flow four blades) หมุนตามแกน 3 ใบ (axial flow four blades) และแบบเกลียวคู่ (double spiral) หรือแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือแบบหมุนในแนวรัศมี (radial-flow impeller) และแบบหมุนรอบแกน (axial-flow impeller)

ปัจจัยสำคัญ 3 อย่างที่ใช้ในการออกแบบใบพัดที่ใช้ในการกวน คือ

- (1) ลักษณะทางเรขาคณิต เช่น จำนวน ความกว้าง มุมระหว่างใบพัด
- (2) ความเร็วรอบ
- (3) เส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน

4.2.2.1 ขนาดของใบพัด

เมื่อออกแบบให้มีขนาดตามแบบมาตรฐานถังกวนผสมที่รายงานโดย Vincent (1967) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-10 ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนผสมเท่ากับ 30 เซนติเมตรจะ
ได้ว่า

	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (D)	=	T/3
	ระยะห่างของใบพัดจากกันถึง (C)	=	T/3
เมื่อ	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง(T) เท่ากับ 30 เซนติเมตร		
ดังนั้น			
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (D)	=	10 เซนติเมตร
	ระยะห่างของใบพัดจากกันถึง (C)	=	10 เซนติเมตร

4.2.3 การออกแบบเพลาส่งกำลัง

วิธีธี อิงภากรณ์ และชาญ อดังงาน (2541) อธิบายวิธีการออกแบบเพลาส่งกำลังว่า เพลาเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ลักษณะการทำงานทั้งแบบหมุนและไม่หมุน อาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งานดังต่อไปนี้ คือ เพลา (shaft) เป็นชิ้นส่วนที่หมุนและใช้ในการส่งกำลัง แกน (axle) เป็นชิ้นส่วนลักษณะเดียวกับเพลาดแต่ไม่หมุน ส่วนมากเป็นที่รองรับชิ้นส่วนที่หมุน เช่น ล้อ สายพาน เพลาแนว (line shaft) หรือเพลาส่งกำลัง (power transmission shaft) หรือเพลामน (main shaft) เป็นเพลาส่งที่ต่อตรงจากเครื่องต้นกำลัง และใช้ในการส่งกำลัง ไปยังเครื่องจักรกลอื่นๆ โดยเฉพาะ เพลาอ่อน (flexible shaft) เป็นเพลาที่สามารถอ่อนตัวได้หรือโค้งงอได้ เพลาประเภทนี้ทำด้วยสายลวดใหญ่ (cable) ลวดสปริงหรือลวดเกลียว (wire rope) ใช้ในการส่งกำลังในลักษณะที่แกนหมุนทำมุมกันได้ แต่ส่งกำลังได้น้อย

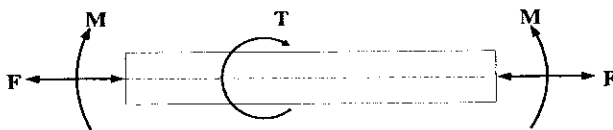
เพลาอาจจะรับแรงดึง แรงกด แรงบิดหรือแรงตัด หรือแรงหลายอย่างรวมกันก็ได้ ดังนั้น การคำนวณจึงต้องใช้ความเค้นผสมเข้าช่วย แรงเหล่านี้อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอยู่ตลอดเวลาทำให้เพลาสึกหายเพราะความล้าได้ ฉะนั้นจึงต้องออกแบบเพลามีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานในลักษณะนี้ นอกจากนี้เพลายังจะต้องมีความแข็งแกร่ง (rigidity) เพียงพอเพื่อลดมุมบิดภายในเพลาให้อยู่ในขีดจำกัดที่พอเหมาะ ระยะโก่ง (deflection) ของเพลาก็เป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดขนาดเพลาเช่นเดียวกัน เพราะถ้าเพลามีระยะ โก่งมากก็จะเกิดการแกว่งขณะหมุน ทำให้ความเร็ววิกฤต (critical speed) ของเพลาลดลง ซึ่งอาจทำให้เพลากเกิดการสั่นอย่างรุนแรงในขณะที่ความเร็วของเพลาเข้าใกล้ความเร็ววิกฤตนี้ได้ ระยะ โก่งนี้ยังมีผลต่อการเลือกชนิดของที่รองรับเพลาด้วย เช่น บอลเบริง (ball bearing) ก็ต้องมีการเอียงแนว (misalignment) ในการใช้งานที่พอเหมาะ กับเพลาด้วย

การคำนวณหาขนาดของเพลาที่พอเหมาะขึ้นอยู่กับการใช้งาน ในบางครั้งการหาขนาดเพลาเพื่อให้เพลาทนต่อแรงที่มากระทำอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ เช่น ในกรณีของเพลาลูกเบี้ยว (cam shaft) ในเครื่องยนต์สันดาปภายในต้องการให้มีตำแหน่งเที่ยงตรง ดังนั้นมุมบิดของเพลาดจะต้องมีความแข็งแกร่งอยู่ภายในพิคัดที่ต้องการ ถ้ามุมบิดมากไปนอกจากจะเสียความเที่ยงตรงทางด้านตำแหน่งแล้วยังอาจจะก่อให้เกิดความสั่นสะเทือนซึ่งมีผลทำให้เฟืองและเบริงที่รองรับเพลาดอยู่เกิดความเสียหายได้ง่ายขึ้น ถึงแม้ว่าไม่มีมาตรฐานสำหรับพิคัดมุมบิดของเพลาดไว้ก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้วจะให้มุมบิดของเพลาดในเครื่องจักรกลทั่วไปไม่เกิน 0.3 องศา ต่อความยาวเพลาด 1 เมตร สำหรับเพลาด

ส่งกำลังทั่วไปอาจให้มีมุมบิดได้ถึง 1 องศาต่อความยาวเพลลาหรือ 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา

ความแข็งแรงที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ความแข็งแรงทางด้านระยะโค้ง เพราะจะต้องใช้ระยะโค้งของเพลลาที่อยู่ภายใต้แรงภายนอกเป็นตัวสำคัญในการกำหนดระยะเบียด (clearance) ระหว่างล้อ สายพาน เฟือง โครงของเครื่องจักร ตลอดจนการเลือกชนิดของแบริ่งสำหรับรองรับเพลลาให้เหมาะสม ถ้าเพลลามีระยะโค้งมากเกินไปจะทำให้ความยาวของฟันเฟืองส่วนที่สัมผัสหรือขบกันลดลงเป็นผลทำให้อัตราส่วนการขบ (contact ratio) ของเฟืองลดลง ทำให้การส่งกำลังของเฟืองไม่ราบเรียบเท่าที่ควร การเลือกแบริ่งมารองรับเพลลาก็เช่นกันจำเป็นจะต้องเลือกแบริ่งชนิดที่อนุญาตให้มีการเอียงแนวสำหรับการใช้งานได้พอเหมาะกับระยะโค้งของเพลลาที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแบริ่งแบบธรรมดาหรือแบริ่งแบบปรับแนวได้เอง (self-alignment bearing) ทั้งนี้ก็ขึ้นกับระยะโค้งเป็นสำคัญ ระยะโค้งดังกล่าวมานี้ก็ไม่มีมาตรฐานกำหนดเป็นแนวทางไว้ โดยทั่วไปแล้วผู้ออกแบบอาจจะถือค่าต่อไปนี้เป็นแนวทางในการกำหนดความแข็งแรงทางด้านระยะโค้งดังนี้คือ สำหรับเพลลาเครื่องจักรทั่วไป ค่าระยะโค้งระหว่างจุดที่รองรับด้วยแบริ่งควรไม่เกิน 0.08 มิลลิเมตร

ก่อนปี พ.ศ. 2497 ได้มีการยอมรับวิธีการคำนวณหาขนาดของเพลลาส่งกำลังซึ่งกำหนดเป็นโค้ด (code) โดยสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (ASTM) โดยใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด และไม่พิจารณาถึงความล้าหรือความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบนเพลลา ซึ่งเป็นการออกแบบโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (static design method) ในการหาสมการสำหรับการออกแบบเพลลาให้พิจารณาเพลลาดังภาพประกอบที่ 4-1 ให้เพลลาเป็นแบบกลมและกลวง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ d_i และ d ตามลำดับ ความเค้นต่างๆที่เกิดขึ้นบนเพลลามีดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 4-1 เพลลาอยู่ภายใต้แรงต่างๆ

ความเค้นดึงหรือกด

$$\sigma_a = \frac{4F}{\pi(d^2 - d_i^2)}$$

4-6

ความเค้นดัด $\sigma_b = \frac{Mc}{I} = \frac{32Md}{\pi(d^4 - d_i^4)}$ 4-7

ความเค้นเฉือน $\tau_{xy} = \frac{Tr}{J} = \frac{16Td}{\pi(d^4 - d_i^4)}$ 4-8

- โดยที่ σ_a คือค่าความเค้นดึง
 F คือแรงที่กระทำต่อเพลลา (นิวตัน)
 d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา (มิลลิเมตร)
 d_i คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพลลา (มิลลิเมตร)

ในกรณีที่เป็นแรงกด อาจมีผลจากการ โกงงอ (buckling) ได้ ดังนั้นสมการที่ 4-6 จะกลายเป็น

$$\sigma_a = \frac{4\alpha F}{\pi(d^2 - d_i^2)} \quad 4-9$$

เพลลาส่วนมากจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่เป็นวัฏจักร ทั้งนี้เพราะเพลลาหมุนอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้แรงอาจจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาก็ได้ ดังนั้นเพลลาจึงเกิดความเสียหายเนื่องมาจากความล้าเป็นส่วนใหญ่ สำหรับวิธีการคำนวณของ ASTM ใช้วิธีแบบสถิติศาสตร์ ดังนั้นจึงต้องมีตัวประกอบความล้า (fatigue factor) มาเกี่ยวข้องด้วย

- ถ้าให้ C_m คือตัวประกอบความล้าเนื่องจากการดัด
 C_t คือตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด

ดังนั้นสมการที่ 4-7 และ 4-8 จึงกลายเป็นสมการที่ 4-10 และ 4-11

$$\sigma_b = \frac{32C_m Md}{\pi(d^4 - d_i^4)} \quad 4-10$$

และ

$$\tau_{xy} = \frac{16C_i Td}{\pi(d^4 - d_i^4)} \quad 4-11$$

ความเค้นกดหรือความเค้นหรือความเค้นดึงรวมคือ

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_b \quad 4-12$$

จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\tau = \left[\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad 4-13$$

แทนค่าสมการที่ 4-9, 4-10 และสมการที่ 4-11 ลงในสมการที่ 4-12 แล้วจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau(1-K^4)} \left[(C_i T)^2 + \left[\frac{\alpha Fd(1+K^2)}{8} + C_m M \right]^2 \right]^{1/2} \quad 4-14$$

โดยที่ $K=d_i/d$

ในกรณีที่ไม่มีแรง (F) กระทำอยู่ด้วย สมการที่ 4-14 จะลดรูปเหลือเพียง

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau(1-K^4)} [(C_t T)^2 + (C_m M)^2]^{1/2} \quad 4-15$$

หรือในกรณีของเพลาดัน $K=d/d=0$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4-15 จะได้สมการที่มีรูปคล้ายกับในหนังสือกลศาสตร์วัสดุทั่วไปคือ

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau} [(C_t T)^2 + (C_m M)^2]^{1/2} \quad 4-16$$

ค่าตัวประกอบความล้าสามารถเลือกใช้ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ ซึ่งดูได้จากตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าตัวประกอบความล้า

ชนิดของแรง	C_m	C_t
เพลายูนิ่ง		
แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้าๆ	1.0	1.0
แรงกระตุก	1.5-2.0	1.5-2.0
เพลามูน		
แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้าๆ	1.5	1.0
แรงกระตุกอย่างเบา	1.5-2.0	1.0-1.5
แรงกระตุกอย่างแรง	2.0-3.0	1.5-3.0

ที่มา : วรวิทย์ อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน (2541)

สำหรับค่าประกอบการโค้งงอ (α) ASTM ได้แนะนำให้ใช้ค่าดังนี้

$$\alpha = 1$$

เมื่อ F เป็นแรงดึง

$$\alpha = \frac{1}{1 - 0.0044(L/K)} \quad \text{เมื่อ } \frac{L}{K} \leq 115$$

$$\alpha = \frac{\sigma_y (L/K)^2}{\pi^2 nE} \quad \text{เมื่อ } \frac{L}{K} > 115$$

โดยที่ $n = 1.00$ เมื่อปลายเพลาไม่ถูกขัง

$n = 2.25$ เมื่อปลายเพลาถูกขัง

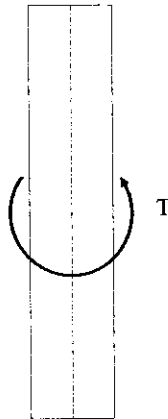
$n = 1.60$ เมื่อปลายเพลาถูกขังเป็นบางส่วน (partially restrained)

นอกจากนี้โค้ดของ ASTM ยังได้ระบุเอาไว้ว่าเพลาซึ่งมีโซ่อยู่ในงานธรรมดาทั่วไป ควรจะมีค่าความเค้นเฉือนในงานดังนี้

$$\tau_d = 55 \text{ นิวตัน/มิลลิเมตร}^2 \quad \text{สำหรับเพลาที่ไม่มีร่องลิ้น}$$

$$\tau_d = 41 \text{ นิวตัน/มิลลิเมตร}^2 \quad \text{สำหรับเพลาที่มีร่องลิ้น}$$

สำหรับเครื่องต้นแบบผลิตไค โตซานลักษณะของเพลาที่ออกแบบเป็นเพลาในแนวตั้ง มีโมเมนต์บิด (T) ส่งกำลังผ่านเพลาจากมอเตอร์ไปขับใบพัดให้หมุน ไม่มีแรงกด (F) ที่มีผลต่อการโค้งงอ ปลายทั้งสองข้างปราศจากโมเมนต์ตัด (M) ดังแสดงในภาพประกอบ 4-2



ภาพประกอบ 4-2 รูปเพลาที่ออกแบบภายใต้แรงต่างๆ

เนื่องจากเพลามีลักษณะตัน $K=d/d=0$ ไม่มีแรง F กระทำต่อเพล่า ไม่มีโมเมนต์ค้ำค้ำที่ปลายทั้งสองข้าง เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4-16 จะได้รูปสมการ 4-17

$$d^3 = \frac{16C_1 T}{\pi \tau} \quad 4-17$$

คำนวณค่าโมเมนต์บิดเนื่องจากการส่งกำลังจากมอเตอร์ จากค่ากำลังเชิงอุคมค้ำค้ำสมการที่ 4-18

$$P = VT \quad 4-18$$

โดยที่	P	คือกำลังจากมอเตอร์ (วัตต์)
	V	คือค่าความเร็วรอบ (เรเดียนต่อวินาที)
	T	คือค่าโมเมนต์บิด (นิวตัน เมตร)

จากสมการที่ 4-18 จะได้ว่า $T = \frac{P}{V}$

เมื่อ	P	0.25 แรงม้า	= 186.42	วัตต์
	V	$60 \times \frac{2\pi}{60}$ รอบต่อนาที	= 6.29	เรเดียนต่อวินาที
ดังนั้น	T		$= \frac{186.42}{6.29}$	นิวตันเมตร
			= 29.64	นิวตันเมตร

จากตารางที่ 4-2 เพล่ามีการหมุนด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นช้าๆดังนั้น $C_1 = 1.0$ และเพล่าไม่มีร่องลึ้มเพื่อใช้ยึดมอเตอร์ให้ติดกับเพล่า ดังนั้น $\tau_u = 55$ นิวตัน/มิลลิเมตร²

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ 4-17} \quad d^3 &= \frac{16C_s T}{\pi \tau} \\
 &= \frac{16 \times 1.0 \times 29.64}{\pi \times 55} \\
 d &= 14 \quad \text{มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เพลาดันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 14 มิลลิเมตร

4.3 การออกแบบระบบการให้ความร้อน

เนื่องจากเครื่องต้นแบบผลิตไคโตซานจำเป็นต้องมีการให้ความร้อนในปฏิกิริยาทั้งกระบวนการกำจัดโปรตีนและกระบวนการขจัดหมู่อะซิติก ซึ่งในระบบอุตสาหกรรมมีการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาได้หลายวิธีเช่น การให้ความร้อนโดยการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำ น้ำมัน แก๊สและไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเมื่อแบ่งการให้ความร้อนตามประเภทการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งเป็น 3 วิธีคือ วิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ วิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการพา และวิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน วิธีการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิในทิศทางการไหลของความร้อน (สมศรี จรุงเรือง, 2542)

4.3.1 รูปแบบการให้ความร้อน

สมศรี จรุงเรือง (2542) ได้กล่าวถึงรูปแบบการให้ความร้อนว่ามี 3 ลักษณะ คือ การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ การพาและการแผ่รังสี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (heat transfer by conduction)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อนเป็นกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง หรือจากส่วนหนึ่งของวัสดุไปยังส่วนอื่นๆของวัตถุ โดยการแลกเปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การถ่ายเทความร้อนโดยการนำนั้น ความร้อนจะไหลจากโมเลกุลของวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่โมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่วัตถุนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดได้ดีในวัสดุที่เป็นของแข็ง ส่วนวัสดุที่เป็นของเหลวหรือแก๊สจะมีการนำความร้อนเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการพาความร้อน

กฎเบื้องต้นที่ใช้อธิบายถึงวิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำก็คือ กฎของ Fourier ซึ่งกล่าวว่าอัตราการไหลของความร้อนโดยการนำในทิศทางที่กำหนด (ทิศทาง n) จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง (dT/dn) , พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (A) , ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำในทิศทาง n ก็คือ

$$Q_n = -kA \frac{dT}{dn} \quad 4-19$$

โดยที่ Q_n คืออัตราการไหลของความร้อนในทิศทาง n บวก (วัตต์)

k คือสภาพการนำความร้อน (วัตต์/เมตร·องศาเซลเซียส)

A คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทาง n (เมตร²)

$\frac{dT}{dn} \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n}$ เป็นเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางการไหลของความร้อน

ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทาง n บวก, (dT/dn) จะเป็นลบ ดังนั้น Q_n จะเป็นบวกเพราะว่าสมการมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นการไหลของความร้อนจะเป็น

$$Q_n = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} \quad 4-20$$

โดยที่ Q_n คืออัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)

A คือพื้นที่ตั้งฉาก (เมตร²)

k คือสภาพการนำความร้อน (วัตต์/เมตร·องศาเซลเซียส)

T คืออุณหภูมิที่ผิว (องศาเซลเซียส)

L คือความหนา (เมตร)

4.3.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (heat transfer by convection)

การพาความร้อนเป็นศัพท์ที่ใช้กับกลไกของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในของไหล อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของมวลของของไหล กระบวนการที่แท้จริงของการถ่ายเทพลังงานของ

โมเลกุลของของไหลจากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลอื่นๆยังคงเป็นการนำความร้อน พลังงานอาจเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่นๆได้โดยการเคลื่อนที่ของของไหลเอง

การที่จะคะเนอัตราที่ซึ่งความร้อนถูกพาออกจากผิวของวัตถุหรือพาจากของไหลเข้าสู่ผนังของวัตถุโดยของไหลที่อยู่รอบๆวิเคราะห์โดยกฎการเย็นตัวของ Newton

ความร้อนไหลออกจากผนังของวัตถุไปสู่ของไหล

$$Q = hA(T_w - T_\infty) \quad 4-21$$

ความร้อนไหลจากของไหลเข้าสู่ผนังของวัตถุ

$$Q = hA(T_w - T_\infty) \quad 4-22$$

โดยที่	Q	คืออัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)
	h	คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (วัตต์/เมตร ² องศาเซลเซียส)
	A	คือพื้นที่ตั้งฉาก (เมตร ²)
	T	คืออุณหภูมิที่ผิว (องศาเซลเซียส)

4.3.1.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (heat transfer by radiation)

วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเคลวิน จะเปล่งพลังงาน (emit energy) ออกมาเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุหรือสาร พลังงานที่เปล่งออกมาโดยวัตถุหรือสารเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุหรือสารมีชื่อว่า รังสีความร้อน (thermal radiation) พลังงานรังสีที่ปล่อยออกจากวัตถุหรือสารไปสู่ผิวภายนอกที่แท้จริงมาจากบริเวณภายในของวัตถุหรือสาร พลังงานรังสีที่ตกลงบนผิวของวัตถุหรือสารหนึ่งๆจะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุหรือสารซึ่งดูดกลืนเอาไว้

รังสีความร้อนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากสาร กลไกการแผ่รังสีจึงแตกต่างจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการนำดังนี้คือ ความร้อนอาจเคลื่อนที่จากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งได้โดยไม่ต้องมีตัวกลางระหว่างวัตถุทั้งสองเลย รังสีความร้อนที่เปล่งออกมาจากวัตถุหนึ่งถูกกำหนดโดยกฎของ Stefan-Boltzmann ดังนี้

$$Q_b = \epsilon A \sigma T^4 \quad 4-23$$

โดยที่	Q_b	คือรังสีความร้อนที่เปล่งโดยวัตถุดำ (วัตต์)
	σ	คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann (วัตต์/เมตร ² เคลวิน ⁴)
	T	คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ (เคลวิน)

4.3.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้า

เนื่องจากออกแบบให้อุปกรณ์ให้ความร้อนได้รับพลังงานจากไฟฟ้าแล้วถ่ายเทให้สารที่ทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงคำนวณกำลังไฟของตัวให้ความร้อน (heater) เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ได้อย่างถูกต้อง โดยแผ่นให้ความร้อนเป็นสแตนเลสมีค่าสภาพนำความร้อน 7.30 วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวเท่ากับ 0.09 มิลลิเมตร²หนา 5 มิลลิเมตร ออกแบบให้อุณหภูมิสูงสุดของเครื่องต้นแบบคือ 200 องศาเซลเซียส ที่ผิวด้านนอก ซึ่งเป็นการถ่ายเทแบบการนำความร้อนจึงคำนวณดังสมการที่ 4-20 อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเท่าไร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad Q_n &= \frac{7.30 \times 0.09 \times (200 - 0)}{0.05} \\ Q_n &= 2,752 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

จึงเลือกใช้แผ่นให้ความร้อนแบบแถบพันรอบถังผลิตที่มีจำหน่ายและสามารถให้ความร้อนได้ 4000 วัตต์

4.3.3 การคำนวณความหนาจนวนกันความร้อน

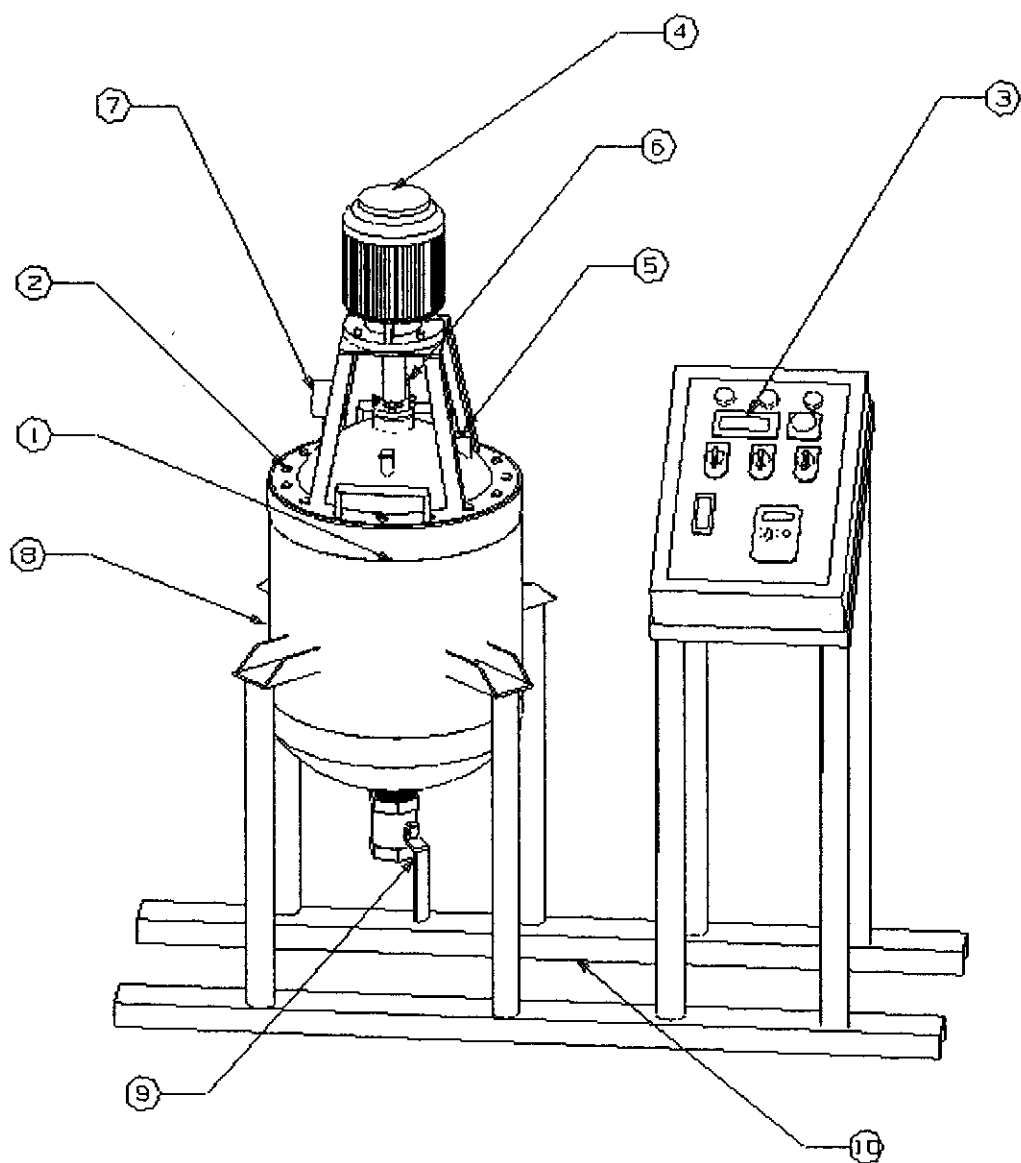
เนื่องจากมีการให้ความร้อน ตัวเครื่องผลิตจึงร้อนเป็นอุปสรรคในการทำงาน ดังนั้นจึงควรมีการหุ้มฉนวนความร้อน โดยได้คำนวณความหนาของฉนวนกันความร้อนตามวิธีการของ ธนกร ณ พัทลุง (2549) ซึ่งกำหนดให้อากาศอยู่หนึ่งไม่มีความเร็วลม แล้วคำนวณด้วยโมโนกราฟตามค่าต่างๆดังนี้

อุณหภูมิของอากาศ (t_{∞})	30 °C	122 °F
อุณหภูมิของผิวฉนวนด้านนอก(t_s)	50 °C	182 °F
อุณหภูมิภายในถัง (t_i)	180°C	572 °F
สภาพการนำความร้อนของฉนวน	0.05 Btu/hr.ft.°F	
Δt_i	390 °C	
Δt_o	60 °C	
อ่านค่าฟังก์ชันพื้นผิว (ϕ)	0.2	
อ่านค่าความหนาของฉนวน	2 นิ้ว	
ดังนั้นความหนาของฉนวนจึงควรมีความหนาอย่างน้อย 2 นิ้ว		

4.4 การสร้างแบบแปลนเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน

จากการคำนวณได้นำมากำหนดขนาดและคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่างๆดังแสดงในภาพประกอบ 4-3 โดยเครื่องต้นแบบผลิตจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ถังกวนผสมและกล่องควบคุม ซึ่งถังกวนผสมจะเป็นถังทรงกระบอก รอบตัวถังจะหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน เปิด-ปิด โดยการยกฝาด้านบน บนฝาจะมีเกตต์แสดงปริมาณความดันภายใน พร้อมทั้งมีวาล์วนิรภัยป้องกันความดันเกินกำหนด กล่องควบคุมจะมีปุ่มควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ จอแสดงอุณหภูมิและเวลาการทำงานของเครื่อง

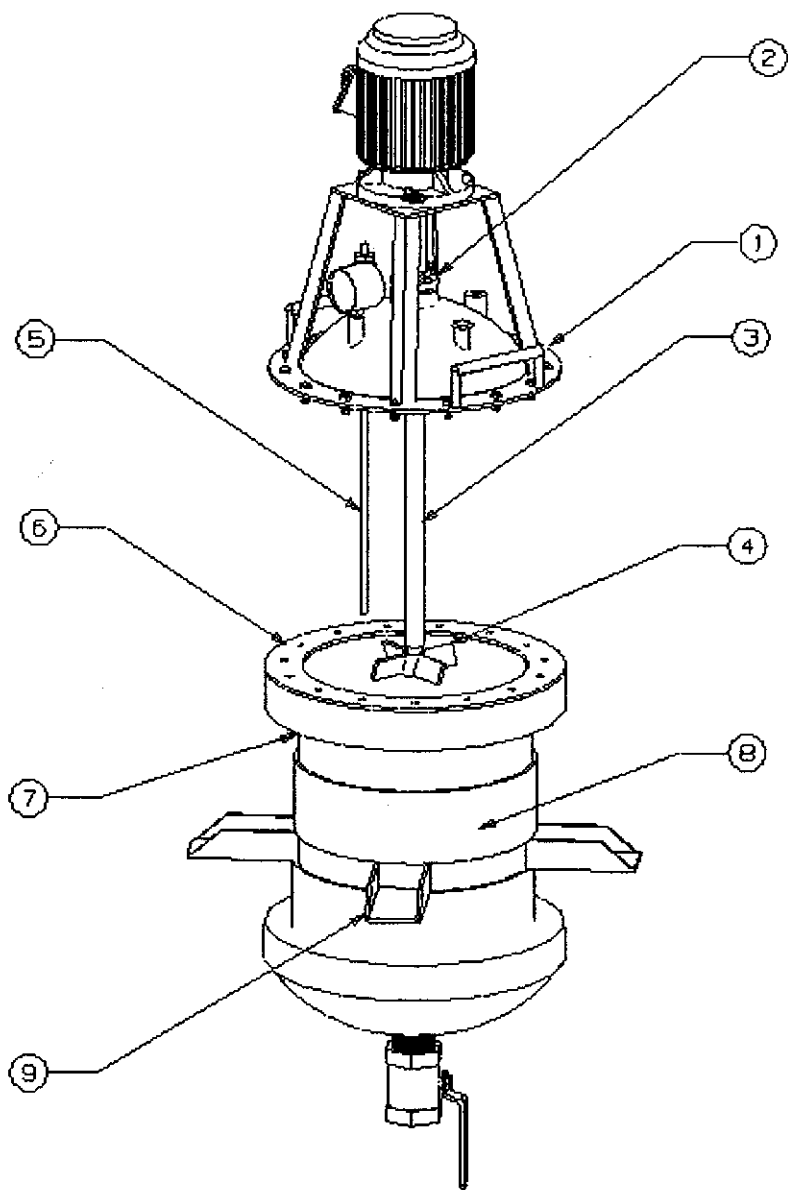
การกวนใช้ชุดกวนที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ปริมาตรภายในบรรจุได้ประมาณ 30 ลิตร ให้ความร้อนด้วยแผ่นให้ความร้อนที่รัดอยู่รอบตัวถัง ปล่องยสารออกทางด้านล่างโดยการเปิด-ปิดวาล์ว ดังแสดงในภาพที่ 4-4 กำลังการผลิตของเครื่องประมาณ 5 กิโลกรัมวัตถุดิบ ซึ่งจะแปรรูปเป็นไคโตซานได้ประมาณ 1 กิโลกรัม ใช้รอบเวลาในการผลิตประมาณ 15 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 4-3 แสดงแบบเครื่องผลิตไคดิน-ไคโตซาน

ตารางที่ 4-3 แสดงรายละเอียดแบบเครื่องผลิตไคติน-โคโตซาน

หมายเลข	รายการ	รายละเอียด	วัสดุ
1	Reactor Tank	30 Liters	Stainless Steel
2	Cap	หนา 5 mm	Stainless Steel
3	Controller Box	Motor, Heater, Time	Stainless Steel
4	Motor	¼ HPs Inverter	-
5	Safety Valve	2 Bars	-
6	Thermocouple	-	-
7	Pressure Gage	7 Bars	-
8	Insulation	หนา 100 mm	Glass Fiber
9	Ball Valve	60 mm	Stainless Steel
10	Base Reactor Tank	C-channel	Steel



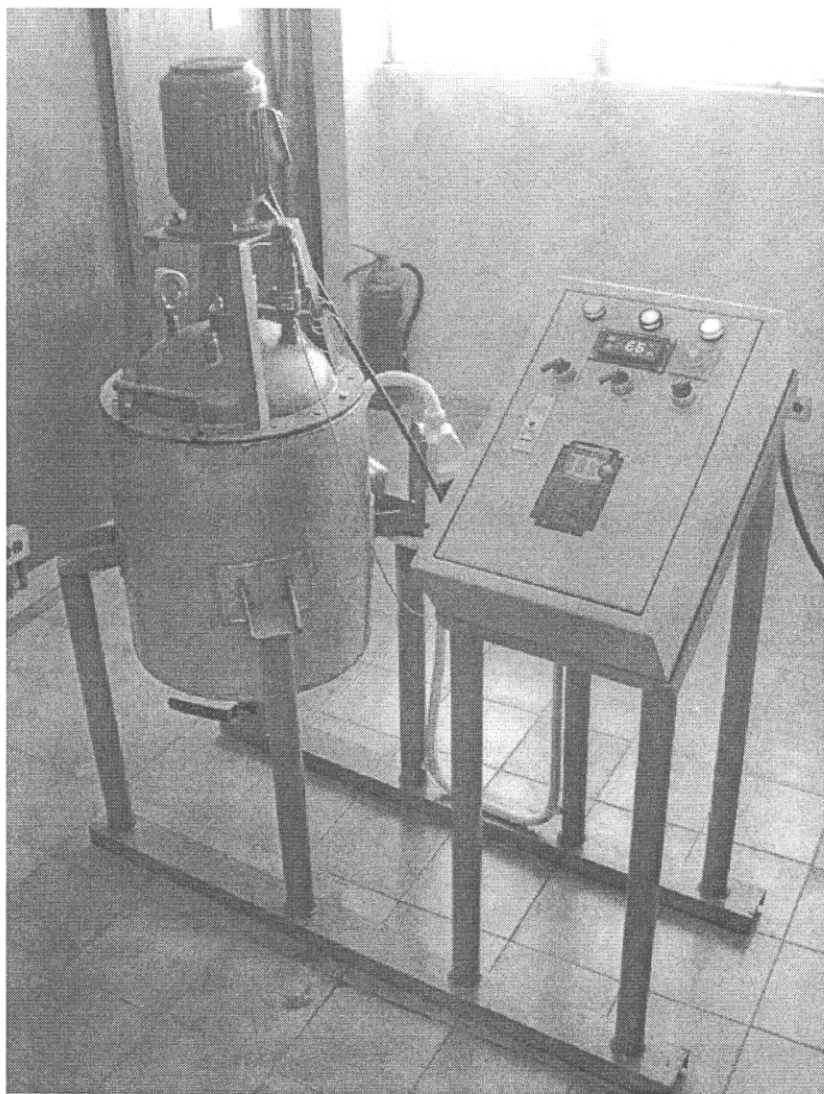
ภาพประกอบ 4-4 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องผลิตไคติน-โคโตซาน (exploded drawing)

ตารางที่ 4-4 แสดงรายละเอียดส่วนประกอบภายในของเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน
(exploded drawing)

หมายเลข	รายการ	รายละเอียด	วัสดุ
1	Handle	100 mm	Stainless Steel
2	Bearing	Ø 30 mm	Stainless Steel
3	Shaft	610 mm , Ø 25 mm	Stainless Steel
4	Propeller	100 mm	Stainless Steel
5	Thermocouple	515 mm	-
6	ที่รองฝา	Ø 300 mm	-
7	Reactor Tank	Ø 300 mm, 390 mm	Stainless Steel
8	Heater	Thin 5 mm, 100 mm	Stainless Steel
9	ขาตั้ง	40 mm	Stainless Steel

4.5 การประเมินราคาและสร้างเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน

เมื่อได้กำหนดขนาดและคุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์แล้วจึงได้ทำการประเมินราคาตามแบบจากผู้ประกอบการ 2 แห่ง คือ ห้างหุ้นส่วนจำกัด สหทานวิศวกรรม จังหวัดสงขลา เสนอราคารวมทั้งสิ้น 92,234 บาท และร้านอ็อคเอ็นจิเนียริง จังหวัดสงขลา เสนอราคารวมทั้งสิ้น 106,852 บาท นอกจากนี้ยังได้ประเมินราคาการเคลือบผิวภายในเครื่องต้นแบบผลิตไคโตซานโดยบริษัท เทฟโค้ด จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ รวมทั้งสิ้น 13,910 บาท จากการประเมินราคาโดยผู้ประกอบการ 2 แห่งได้กำหนดให้ ห้างหุ้นส่วนจำกัด สหทานวิศวกรรม เป็นผู้จัดสร้างเครื่องต้นแบบ เนื่องจากเสนอราคาร้อยกว่าร้านอ็อคเอ็นจิเนียริง และตกลงส่งทำเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2550 และเสร็จสมบูรณ์ดังภาพประกอบ 4-5 สำหรับรายละเอียดของแบบแปลนเครื่องผลิตได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก - จ



ภาพประกอบ 4-5 เครื่องผลิตไทติน-ไทโตซาน

บทที่ 5

ผลการทดลองและบทวิจารณ์

5.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ NaOH และ KOH

เพื่อทดสอบว่าสามารถนำสารละลาย KOH มาใช้แทนสารละลาย NaOH ได้หรือไม่ ทั้งในกระบวนการสกัดโปรตีนและกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติล โดยการผลิตโคโคซานด้วยกระดองปลาหมึกในระดับห้องปฏิบัติการ แล้ววัดปริมาณโปรตีนในสารละลายทั้งสองชนิดที่ผ่านการสกัดโปรตีนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพดังแสดงในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดโปรตีนด้วย NaOH และ KOH

สารละลาย	ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
NaOH	15.02 ± 0.12
KOH	14.91 ± 0.06

จากผลการทดลองดังตารางที่ 5-1 เมื่อใช้โปรแกรม MINITAB 14 ทดสอบ t-test เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าปริมาณโปรตีนในสารละลายทั้งสอง ดังแสดง

Paired t-test and CI: Protein (NaOH), Protein (KOH)

Paired T for Protein (NaOH) vs Protein (KOH)

	N	Mean	StDev	SE Mean
NaOH	3	15.0227	0.2144	0.1238
KOH	3	14.9093	0.1126	0.0650
Difference	3	-0.11353	0.258039	0.148979

95% CI for mean difference: (-0.754357, 0.527650)

t-test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -0.76 P-Value = 0.526

พบว่าปริมาณโปรตีนในสารละลายทั้งสองความแตกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญ (P-Value > 0.05) จึงสรุปว่า ประสิทธิภาพของ NaOH และ KOH ในการสกัดโปรตีนจากกระบวนการสกัดโปรตีนมีค่าไม่แตกต่างกัน จากนั้นตรวจสอบคุณภาพโคโคซานจากกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติล ดังแสดงในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 เปรียบเทียบคุณภาพของโคโคซานที่ผลิตด้วย NaOH และ KOH

สารละลาย	น้ำหนักโมเลกุล (ดาลตัน) $\times 10^4$	ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (เปอร์เซ็นต์ DD)
NaOH	6.80	96.76 \pm 0.22
KOH	7.00	96.60 \pm 0.30

จากตารางที่ 5-2 พบว่าคุณภาพของโคโคซานด้านน้ำหนักโมเลกุล (MW) และระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (เปอร์เซ็นต์ DD) มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำค่า เปอร์เซ็นต์ DD จากการผลิตด้วยสารละลายทั้งสองชนิดมาทดสอบความแตกต่างด้วยโปรแกรม MINITAB 14 ทดสอบ t-test เพื่อทดสอบความแตกต่างจากค่า เปอร์เซ็นต์ DD ของโคโคซานที่ผลิตด้วยสารละลาย KOH และ NaOH ดังแสดง

Paired t-test and CI: %DD (NaOH), %DD (KOH)

Paired T for %DD (NaOH) vs %DD (KOH)

	N	Mean	StDev	SE Mean
NaOH	3	96.7619	0.3832	0.2212
KOH	3	96.6072	0.5201	0.3003
Difference	3	0.154670	0.880325	0.508256

95% CI for mean difference: (-2.032178, 2.341517)

t-test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 0.30 P-Value = 0.790

พบว่าค่า เปอร์เซ็นต์ DD ที่ผลิตด้วยสารละลายทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญ (P-Value > 0.05) จึงสรุปว่า ประสิทธิภาพของ NaOH และ KOH ในการกำจัดหมู่อะซิติลมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงสรุปว่าสามารถนำสารละลาย KOH มาใช้แทนสารละลาย

NaOH ได้ทั้งในกระบวนการสกัด โปรตีนและการกำจัดหมู่อะซิดิล โดยจะได้ผลผลิตเป็นโคโคซานที่มีคุณสมบัติไม่แตกต่างกัน

5.2 ประเมินและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้ซ้ำ

เมื่อตัดสินใจจะนำสารละลาย KOH มาใช้แทนสารละลาย NaOH จึงได้ศึกษาถึงความ เป็นไปได้ในการนำสารละลาย KOH กลับมาใช้ซ้ำ ในขั้นแรกจะพิจารณาว่าควรจะนำสารละลายที่ เหลือจากกระบวนการใดกลับมาใช้ โดยจะทำการตรวจสอบปริมาณ โปรตีนจากสารละลายที่เหลือจาก กระบวนการสกัด โปรตีน และกระบวนการกำจัดหมู่อะซิดิล เนื่องจากถ้ามีโปรตีนมากจะรบกวนการ ผลิตโคโคซานหากนำมาใช้ใหม่ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 เปรียบเทียบปริมาณ โปรตีนจากสารละลายที่ใช้แล้ว

สารละลาย KOH	ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
ผ่านการสกัด โปรตีน	14.56 ± 0.41
ผ่านการกำจัดหมู่อะซิดิล (ครั้งที่1)	1.56 ± 0.10
ผ่านการกำจัดหมู่อะซิดิล (ครั้งที่2)	0.52 ± 0.05
ผ่านการกำจัดหมู่อะซิดิล (ครั้งที่3)	Nd

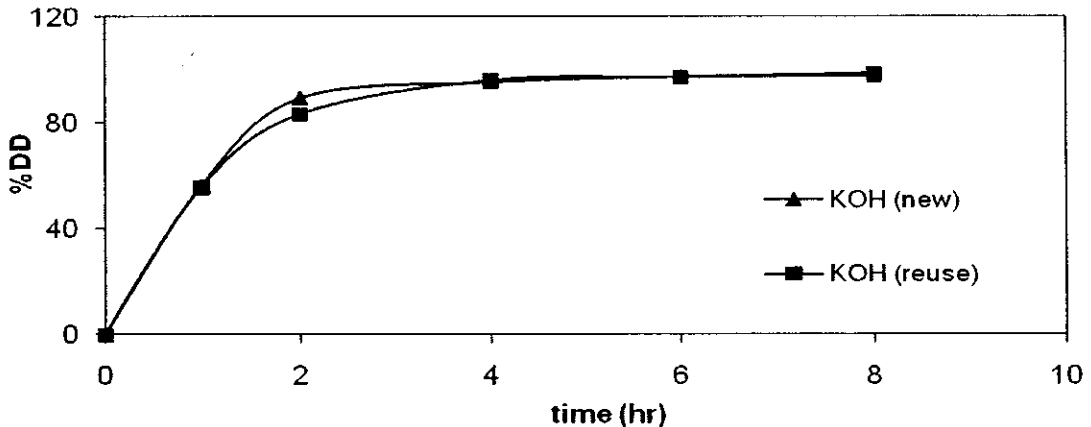
หมายเหตุ Nd คือ ไม่สามารถวัดได้ (non detective)

จากตารางที่ 5-3 พบว่าสารละลาย KOH ที่ผ่านกระบวนการสกัด โปรตีนมีปริมาณ โปรตีนเหลืออยู่มากกว่าสารละลาย KOH ที่ผ่านกระบวนการกำจัดหมู่อะซิดิล และเมื่อทดสอบความ เข้มข้นของสารละลาย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้แล้ว

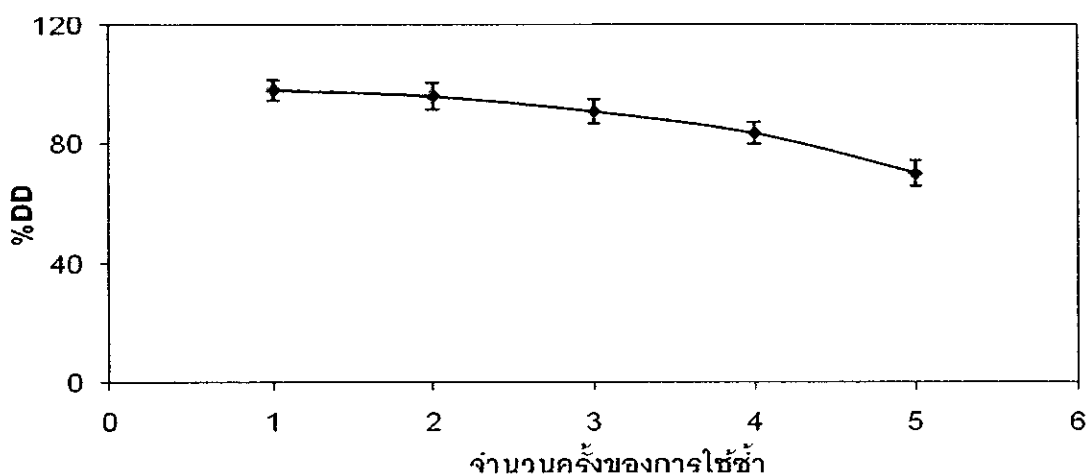
สารละลาย KOH	ความเข้มข้น (M)
ผ่านการสกัด โปรตีน	0.87
ผ่านการกำจัดหมู่อะซิดิล (ครั้งที่1)	8.50
ผ่านการกำจัดหมู่อะซิดิล (ครั้งที่2)	8.60
ผ่านการกำจัดหมู่อะซิดิล (ครั้งที่3)	8.68

จากตารางที่ 5-4 พบว่าสารละลาย KOH ที่ผ่านกระบวนการกำจัดโปรตีนมีความเข้มข้นน้อยกว่าสารละลาย KOH ที่ผ่านกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติล ดังนั้นจึงสรุปว่าไม่ควรนำสารละลาย KOH ที่ผ่านกระบวนการสกัดโปรตีนกลับมาใช้ซ้ำเพราะมีปริมาณโปรตีนเหลืออยู่มาก และมีความเข้มข้นน้อย จากนั้นจึงได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำสารละลาย KOH ที่การกำจัดหมู่อะซิติลกลับมาใช้ซ้ำ โดยการเปรียบเทียบคุณภาพโคโคซานจากค่า เปอร์เซ็นต์ DD ระหว่างการผลิตด้วยสารละลาย KOH ใหม่กับสารละลาย KOH ที่ใช้แล้วหนึ่งครั้ง ที่ระยะเวลาต่างๆดังแสดงในภาพประกอบ 5-1



ภาพประกอบ 5-1 กราฟแสดงเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดหมู่อะซิติล (เปอร์เซ็นต์ DD) ของโคโคซานที่ผลิตด้วยสารละลาย KOH ใหม่และ KOH ที่ใช้ซ้ำหนึ่งครั้ง ที่เวลาต่างๆ

จากภาพประกอบ 5-1 จะเห็นว่าคุณภาพของโคโคซานจากค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติลที่ผลิตด้วยสารละลาย KOH ใหม่และที่ใช้ซ้ำหนึ่งครั้งมีค่าเหมือนกัน สรุปได้ว่าสามารถนำสารละลาย KOH จากกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลกลับมาใช้ซ้ำได้ ต่อมาจึงศึกษาว่าสามารถนำสารละลาย KOH จากกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลกลับมาใช้ซ้ำได้กี่ครั้ง โดยทดสอบด้วยวิธีการเดิมกับสารละลาย KOH ที่ใช้ในการผลิตซ้ำจำนวน 1 ถึง 5 ครั้ง แล้ววัดค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติล ซึ่งจะให้ผลดังภาพประกอบ 5-2



ภาพประกอบ 5-2 กราฟแสดงระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (เปอร์เซ็นต์ DD) ของโคโคซาน โดยใช้สารละลาย KOH ซ้ำหลายๆครั้ง

จากภาพประกอบ 5-2 แสดงกราฟระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของโคโคซานที่ผลิตโดยสารละลาย KOH ที่ใช้ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่า 97.99 และ 95.95 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อใช้สารละลาย KOH ครั้งที่ 3 มีค่า 90.84 และลดลงอีกในการใช้ครั้งที่ 4 และ 5 ดังนั้นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำสารละลาย KOH กลับมาใช้ใหม่นั้นพบว่าสารละลาย KOH จากกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้และสามารถใช้ซ้ำได้จำนวน 2 ครั้ง จึงได้ทดสอบการผลิตด้วยเครื่องผลิตโคคินและโคโคซานในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของโคโคซานที่ผลิตได้ทั้งจากกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งโดยการวิเคราะห์ค่าต่างๆดังตารางที่ 5-5 และตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-5 สมบัติของโคคิน โคโคซานจากกระดองปลาหมึกที่ผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ

คุณสมบัติ	โคคิน	โคโคซาน
เปอร์เซ็นต์ผลผลิต	32.60 ± 0.76	61.74 ± 1.84^a 18.44 ± 0.46^b
ปริมาณเถ้า (เปอร์เซ็นต์)	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
น้ำหนักโมเลกุล (คาลตัน $\times 10^6$)	-	7.09
ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (เปอร์เซ็นต์)	-	97.36 ± 0.25

หมายเหตุ ^a คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักโคโคซานเทียบกับน้ำหนักโคคิน, ^b คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักโคโคซานเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบ

ตารางที่ 5-6 สมบัติของไคติน ไคโตซานจากเปลือกกุ้งที่ผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ

คุณสมบัติ	ไคติน	ไคโตซาน
เปอร์เซ็นต์ผลผลิต	32.07 ± 1.84	65.63 ± 2.53^a 15.12 ± 0.87^b
ปริมาณแฉ่ำ (เปอร์เซ็นต์)	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01
น้ำหนักโมเลกุล (คาลตัน $\times 10^6$)	-	1.97
ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (เปอร์เซ็นต์)	-	98.97 ± 0.21

หมายเหตุ ^a คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักไคโตซานเทียบกับน้ำหนักไคติน, ^b คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักไคโตซานเทียบกับน้ำหนักวัตถุค

จากตารางที่ 5-5 และตารางที่ 5-6 ซึ่งแสดงค่าของคุณภาพไคโตซานที่ผลิตได้ เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของไคโตซานที่จำหน่ายโดยบริษัท Fluka ที่ผลิตจากเปลือกกุ้งซึ่งมีโครงสร้างเป็น α -form มีโครงสร้างแบบเดียวกับในเปลือกกุ้ง คือ เปอร์เซ็นต์ DD เท่ากับ 95.15 และน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 6.21×10^6 คาลตัน พบว่าคุณสมบัติมีค่าใกล้เคียงกับไคโตซานที่ผลิตได้

5.3 ประเมินและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำค่าที่เหลือไปใช้ประโยชน์ต่อเนื่อง (ทำปุ๋ยน้ำ)

จากการทดสอบพบว่าสารละลายที่ผ่านการสกัด โปรตีนคำนวณความเข้มข้นของต่างเท่ากับ 0.87 M สารละลายที่ผ่านกำจัดหมู่อะซิติลคำนวณความเข้มข้นของต่างเท่ากับ 8.5 M เมื่อนำสารละลายต่างทั้งสองชนิดปริมาตร 20 มิลลิลิตร มาเติมกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ซึ่งวัดความเข้มข้นได้เท่ากับ 0.9625 M จนมีสภาพเป็นกลาง (pH = 7) สารละลายที่ผ่านการสกัด โปรตีนใช้ปริมาณกรดฟอสฟอริกประมาณ 18 มิลลิลิตร สารละลายที่ผ่านกำจัดหมู่อะซิติลที่เจือจางสัดส่วน 1 ต่อ 10 ใช้ปริมาณกรดฟอสฟอริกประมาณ 22 มิลลิลิตร จากนั้นคำนวณปริมาณฟอสฟอรัส (P) จากกรดฟอสฟอริก โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ P_2O_5 และ โพแทสเซียม (K) จากสารละลายต่างโดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ K_2O ส่วนปริมาณไนโตรเจน (N) ได้จากการนำสารละลายที่ทำให้มีสภาพเป็นกลางมาวิเคราะห์หาไนโตรเจนใช้วิธีของ Kjeldahl ซึ่งแนะนำใน A.O.A.C. (1984) จากการทดสอบพบว่าสารละลายที่ผ่านการสกัดโปรตีนมีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 4.25 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร สารละลายที่ผ่านกำจัดหมู่อะซิติลมีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 0.32 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่า N-P-K ได้ผลดังนี้

การคำนวณสูตรปุ๋ยจากสารละลาย KOH ที่ผ่านการสกัด โปรตีน 1 ลิตร

ปริมาณ ไนโตรเจน (N)		4.25	mg/ml
N		4.25	g/l
ปริมาณฟอสฟอรัส (P) ได้จาก H_3PO_4 (18/38) x 1000		473.68	ml
	$(0.9625/1000) \times 473.68$	0.45	mol
เท่ากับ P_2O_5	$0.45/2$	0.22	mol
	0.22×141.90	32.34	g
ปริมาณโพแทสเซียม (K) ได้จาก KOH (20/38) x 1000		526.31	ml
	$(0.87/1000) \times 526.31$	0.45	mol
เท่ากับ K_2O	$0.45/2$	0.22	mol
	0.22×94.18	21.56	g

ดังนั้นสัดส่วน N-P-K เท่ากับ 0.42 , 3.23 , 2.15 กรัม/สารละลาย 100 มิลลิลิตร

การคำนวณสูตรปุ๋ยสารละลาย KOH ที่ผ่านการกำจัดหมู่เอซิติล 1 ลิตร

ปริมาณ ไนโตรเจน (N)		0.32	mg/ml
N		0.32	g/l
ปริมาณฟอสฟอรัส (P) ได้จาก H_3PO_4			
(ที่เจือจาง 1:10 เท่ากับ 22 ml ซึ่งเท่ากับปริมาตรจริง 220 ml)			
	$(220/240) \times 1000$	916.67	ml
	$(0.9625/1000) \times 916.67$	0.88	mol
เท่ากับ P_2O_5	$0.88/2$	0.44	mol
	0.44×141.90	62.60	g
ปริมาณโพแทสเซียม (K) ได้จาก KOH (20/240) x 1000		83.33	ml
	$(8.5/1000) \times 83.33$	0.70	mol
เท่ากับ K_2O	$0.70/2$	0.35	mol
	0.35×94.18	33.35	g

ดังนั้นสัดส่วน N-P-K เท่ากับ 0.03 , 6.26 , 3.33 กรัม/สารละลาย 100 มิลลิลิตร

5.4 ศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของไคตินและไคโตซานที่ผลิตด้วยเครื่องผลิตไคติน-ไคโตซาน

หลังจากที่ทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการแล้วก็จะทดสอบการผลิตด้วยเครื่องผลิต โดยได้คำนวณจำนวนการทดสอบ (sample size) โดยใช้โปรแกรม MINITAB 14 โดยให้ค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ มีความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นต์ DD เท่ากับ 2 ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งจะใช้ค่าที่ได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเท่ากับ 0.44 และ 0.37 ตามลำดับ จะได้ว่ากระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งจะต้องทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ดังแสดง

การคำนวณจำนวนการทดสอบ (sample size) ของกระดองปลาหมึก

Power and Sample Size

1-Sample t Test

Testing mean = null (versus not = null)

Calculating power for mean = null + difference

Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 0.44

Difference	Sample Size	Target Power	Actual Power
2	3	0.95	0.953717

การคำนวณจำนวนการทดสอบ (sample size) ของเปลือกกุ้ง

Power and Sample Size

1-Sample t Test

Testing mean = null (versus not = null)

Calculating power for mean = null + difference

Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 0.37

Difference	Sample Size	Target Power	Actual Power
2	3	0.95	0.986760

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพของไคโตซานที่ผลิตจากเครื่องผลิต จากกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งจำนวน 3 ซ้ำ โดยการวิเคราะห์ค่าต่างๆดังตารางที่ 5-7 ถึงตารางที่ 5-10

ตารางที่ 5-7 ผลผลิตการสกัดไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกที่ผลิตด้วยเครื่องต้นแบบ

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)		
	ไคติน	ไคโตซาน ^๑	ไคโตซาน ^๒
กระดองปลาหมึก	33.57 ± 1.13	22.00 ± 0.19	65.55 ± 0.58
เปลือกกุ้ง	45.50 ± 0.64	15.80 ± 0.25	67.77 ± 1.11

หมายเหตุ ไคโตซาน^๑ คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักไคโตซานเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบ, ไคโตซาน^๒ คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักไคโตซานเทียบกับน้ำหนักไคติน

จากตารางที่ 5-7 พบว่าไคโตซานที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับรายงานอื่นๆที่ใช้วัตถุดิบและวิธีการเดียวกัน เช่น เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไคตินและไคโตซานจากกระดองปลาหมึกจากรายงานของ มณฑา จำริญรักษ์ (2544) ซึ่งเท่ากับ 37.31 และ 29.83 เปอร์เซ็นต์

เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งใกล้เคียงกับรายงานของมณฑา จำริญรักษ์ (2544) ซึ่งเท่ากับ 22.18 และ 17.35 เปอร์เซ็นต์ และกมล หมิ่นหนู (2545) ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 36.82 และ 16.35 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุที่มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไคตินและไคโตซานต่ำกว่าเล็กน้อย น่าจะเนื่องมาจากการเก็บผลผลิตภายในเครื่องต้นแบบที่มีปริมาณมากและมีอุปกรณ์ต่างๆทำได้ยากกว่าการเก็บผลผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5-8 ปริมาณเถ้าของไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกที่ผลิตด้วยเครื่องผลิต

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)	
	ไคติน	ไคโตซาน
กระดองปลาหมึก	0.19 ± 0.01	0.24 ± 0.01
เปลือกกุ้ง	0.22 ± 0.02	0.28 ± 0.04

จากตารางที่ 5-8 พบว่าปริมาณเถ้าของ ไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งมีปริมาณสูงกว่าจากกระดองปลาหมึก เนื่องจากเปลือกกุ้งมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบสูงกว่ากระดองปลาหมึก เมื่อเปรียบเทียบจากรายงานของ Somprasit (1997) ไม่พบปริมาณเถ้าในไคตินและไคโตซานจากกระดองปลาหมึก ส่วนรายงานของมณฑา จำเรียวรักษ์ (2544) พบว่าปริมาณเถ้าของไคตินและไคโตซานจากกระดองปลาหมึกเท่ากับ 0.10 และ 0.17 เปอร์เซ็นต์ จากเปลือกกุ้งเท่ากับ 0.26 และ 0.46 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5-9 ปริมาณไนโตรเจนของไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกที่ผลิตด้วยเครื่องผลิต

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)	
	ไคติน	ไคโตซาน
กระดองปลาหมึก	3.19 ± 0.10	5.14 ± 0.10
เปลือกกุ้ง	3.48 ± 0.09	6.25 ± 0.09

จากตารางที่ 5-9 พบว่าปริมาณไนโตรเจนของไคตินและไคโตซานให้ผลสอดคล้องกับรายงานของมณฑา จำเรียวรักษ์ (2544) โดยพบว่าในไคตินและไคโตซานจากกระดองปลาหมึกเท่ากับ 6.48 และ 8.09 เปอร์เซ็นต์ จากเปลือกกุ้งเท่ากับ 6.49 และ 8.04 เปอร์เซ็นต์ และรายงานของ Somprasit (1997) ปริมาณไนโตรเจนของไคตินและไคโตซานจากกระดองปลาหมึกเท่ากับ 6.23 และ 7.88 เปอร์เซ็นต์

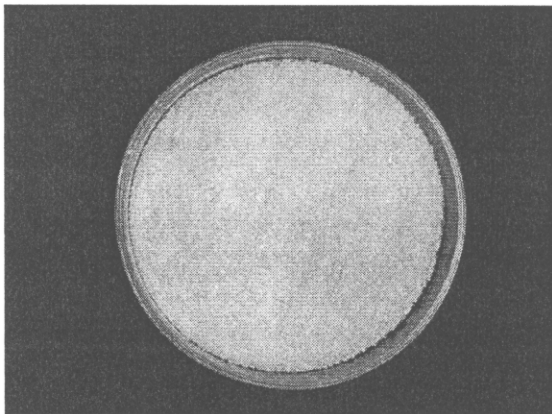
ตารางที่ 5-10 น้ำหนักโมเลกุลและระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกที่ผลิตด้วยเครื่องเครื่องผลิต

ตัวอย่าง	น้ำหนักโมเลกุล (คาลตัน $\times 10^6$)	ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (เปอร์เซ็นต์)
ไคโตซานจากกระดองปลาหมึก	5.07 ± 0.22	96.72 ± 0.46
ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	2.33 ± 0.59	98.51 ± 0.20

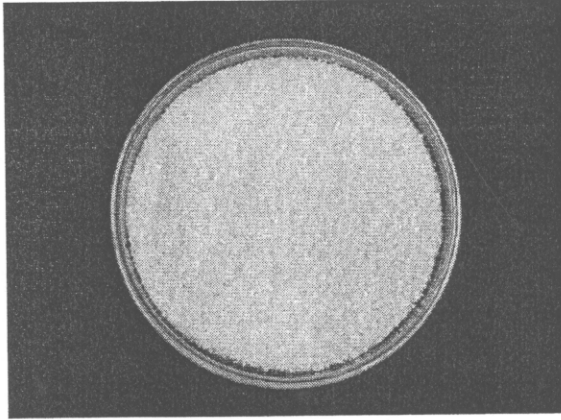
จากตารางที่ 5-10 น้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างไคโตซานที่วิเคราะห์จากการวัดความหนืด (viscoscopic method) พบว่าไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกมีน้ำหนักโมเลกุล 5.07×10^6 และ 4.37×10^6 คาลตัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทดลองของ Somprasit (1997)

ที่รายงานว่ำน้้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานจากกระดองปลาหมึกเท่ากับ 9.69×10^6 ดาลตัน ซึ่งมากกว่าการทดลองนี้ ส่วนการทดลองของมณฑา จำเรีญร์ักษ์ (2544) ได้น้้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานจากกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งเท่ากับ 6.35×10^6 และ 2.69×10^6 ดาลตัน ตามลำดับ และรายงานของกมล หมั้นหนู (2545) ได้น้้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานจากเปลือกกุ้งเท่ากับ 1.99×10^6 ดาลตัน ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับการวิจัยนี้

จากการนำไคโตซานจากกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งมาวิเคราะห์ระดับการกำจัดหมู่อะซิติลมีค่าเท่ากับ 98.51 และ 96.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลที่ได้มีความขัดแย้งกับผลของ Kurita *et al.* (1993) ที่กล่าวว่าโครงสร้างแบบ β -form เช่นจากกระดองปลาหมึกจะถูกทำลายได้ง่ายกว่าแบบ α -form เช่นจากเปลือกกุ้ง เมื่อเปรียบเทียบกับารทดลองของ Somprasit (1997) ที่รายงานว่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานจากกระดองปลาหมึกเท่ากับ 90.15 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองของมณฑา จำเรีญร์ักษ์ (2544) ได้ระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานจากกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งเท่ากับ 73.10 และ 92.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และรายงานของกมล หมั้นหนู (2545) ได้ระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานจากเปลือกกุ้งเท่ากับ 84.40 เปอร์เซ็นต์ ไคโตซานจากกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งที่ผลิตด้วยเครื่องด้นแบบแสดงในภาพประกอบ 5-3 และ 5-4 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5-3 ไคโตซานที่ผลิตจากกระดองปลาหมึกด้วยเครื่องผลิต



ภาพประกอบ 5-4 ไคโตซานที่ผลิตจากเปลือกกุ้งด้วยเครื่องผลิต

เนื่องจากออกแบบให้วัสดุในการทำตัวถังเป็นสแตนเลส เมื่อทำการตรวจสอบคุณสมบัติพบว่ามีโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ นิกเกิล (Ni) และ โครเมียม (Cr) ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบปริมาณโลหะทั้งสองโดยใช้เครื่อง Optical Emission Spectrometer (Optima 4300 DV) โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ผลดังตารางที่ 5-11

ตารางที่ 5-11 ปริมาณนิกเกิล (Ni) และโครเมียม (Cr) ในไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกที่ผลิตด้วยเครื่องเครื่องผลิต

ตัวอย่าง	ปริมาณ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	
	นิกเกิล (Ni)	โครเมียม (Cr)
ไคโตซานจากกระดองปลาหมึก	5.89	12.90
ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	2.91	13.88

จากคุณสมบัติต่างๆของไคโตซานที่ทำการทดสอบพบว่าเครื่องเครื่องผลิตที่สร้างขึ้นสามารถผลิตไคโตซานจากเปลือกกุ้งและกระดองปลาหมึกได้ประมาณครั้งละประมาณ 1 กิโลกรัม มีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (%DD) น้ำหนักโมเลกุล (MW) ปริมาณไนโตรเจน (N) ปริมาณเถ้าใกล้เคียงกับรายงานอื่นๆที่ใช้วิธีการผลิตแบบเดียวกันและสามารถนำมาใช้ในทางการแพทย์ได้ โดยค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (%DD) มีค่าสูงและมีความคงที่

บทที่ 6

การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ

ก่อนที่จะตัดสินใจลงทุนในโครงการใดก็ตาม ผู้ลงทุนจะต้องพิจารณาว่าถ้าหากลงทุนไปแล้วผลประโยชน์ที่จะได้รับจะคุ้มค่าหรือไม่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผู้ลงทุนต้องการผลตอบแทนการลงทุนที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ถ้าเป็นไปได้อย่างน้อยที่สุดก็จะต้องได้รับผลตอบแทนในอัตราที่ไม่ต่ำกว่าอัตราดอกเบี้ย ถ้าหากนำเงินลงทุนนั้น ไปให้กู้ หรือถ้าไม่ให้กู้ก็นำไปฝากธนาคารก็ย่อมได้รับดอกเบี้ยเช่นกัน (จันทนา จันทโร และศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, 2540)

การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ (feasibility study) หมายถึงการศึกษาเพื่อต้องการทราบผลที่จะเกิดขึ้นจากการดำเนินการตามโครงการนั้น โดยพิจารณาจากการศึกษาด้านการตลาด วิศวกรรมและการเงินของโครงการเป็นหลัก ทั้งนี้เพื่อช่วยประกอบการตัดสินใจของผู้ที่จะลงทุนในโครงการนั้นๆ ในการศึกษาดังกล่าวจะต้องบอกรายละเอียดและวิเคราะห์สิ่งที่จำเป็นที่เกี่ยวข้องกับการผลิตรวมทั้งทางเลือกอื่นๆของการผลิตด้วย นอกจากนี้จะต้องระบุกำลังการผลิตและสถานที่ตั้งของโครงการที่เหมาะสม การใช้เทคโนโลยีในการผลิตแบบใด มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการเพียงไร ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการตอบแทนการลงทุนให้มากที่สุด (จันทนา จันทโร และศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, 2540)

การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการตามหลักการของ จันทนา จันทโร และศิริจันทร์ ทองประเสริฐ (2540) กล่าวว่าความเป็นไปได้ของโครงการเป็นเพียงขั้นตอนในระยะก่อนการลงทุนของวงจรพัฒนาโครงการ (project development cycle) ซึ่งเป็นวงจรที่บอกขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆในการบริหารโครงการเป็นลำดับขั้นตอน ตั้งแต่ความคิดที่จะมีโครงการจนกระทั่งดำเนินการผลิต ขั้นตอนต่างๆในวงจรพัฒนาโครงการ แบ่งออกเป็นดังนี้

ระยะก่อนการลงทุน (pre-investment phase)

การศึกษาสถานการณ์ต่างๆไปเพื่อดูว่าโครงการใดควรลงทุนทำ เมื่อเลือกโครงการได้แล้วจึงศึกษาความเป็นไปได้ หลังจากนั้นจึงประเมินผลโครงการและตัดสินใจลงทุนต่อไป

ระยะลงทุน (investment phase)

ได้แก่การออกแบบทางด้านวิศวกรรมต่างๆ การติดต่อทำสัญญา การก่อสร้าง การรับสมัครพนักงานและการฝึกอบรมพนักงาน เป็นต้น

ระยะดำเนินการ (operational phase)

เป็นระยะสุดท้ายหลังจากที่ผู้ริเริ่มโครงการได้ลงทุนในโครงการแล้ว หลังจากนั้นผู้ริเริ่มโครงการก็ทำหน้าที่ดำเนินการให้เป็นไปได้ตามแผนและติดตามผลงานเป็นระยะๆจนกว่าจะสิ้นสุดโครงการ

ในการดำเนินการศึกษาลู่ทางเป็นไปได้ในการจัดตั้งโรงงานนี้ ทางผู้ที่จะลงทุนจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการศึกษาเป็นจำนวนหนึ่ง แต่ยังเป็นจำนวนน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับปริมาณการสูญเสียในด้านเงินทองและเวลาที่อาจเกิดขึ้นได้หากลงทุนตั้งโรงงานไปโดยไม่ได้ศึกษาพิจารณาให้ถี่ถ้วนเสียก่อน การศึกษาลู่ทางเป็นไปได้ของโครงการว่าเหมาะสมหรือไม่นั้น จะช่วยป้องกันมิให้ผู้ที่จะลงทุนหรือเจ้าของโครงการอุตสาหกรรมต้องสูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการลงทุนในโครงการมากขึ้นไปอีก ทั้งนี้หากผลการศึกษาได้ชี้ให้เห็นชัดว่าโรงงานอุตสาหกรรมนี้หากลงทุนตั้งไปก็จะมีแต่จะขาดทุนอย่างแน่นอน (จันทนา จันทโร และศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, 2540)

การศึกษาลู่ทางเป็นไปได้ในการจัดตั้งโรงงานอุตสาหกรรมตามหลักการของ จันทนา จันทโร และ ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ (2540) โดยทั่วไปนั้นการศึกษาจะครอบคลุมถึงสิ่งต่างๆต่อไปนี้ 3 ประการด้วยกันคือ

(1) การศึกษาด้านการตลาด (marketing study)

การศึกษาในด้านนี้เกี่ยวข้องกับเรื่องการตลาดว่าเป็นอย่างไร มีความต้องการสินค้าที่โครงการผลิตมามากน้อยเพียงใด การผลิตของโรงงานที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นอย่างไร ผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีปริมาณมากน้อยแค่ไหน ราคาเป็นอย่างไร เหล่านี้เป็นต้น การศึกษาด้านการตลาดนี้เป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งเพราะ โรงงานอุตสาหกรรมที่จะลงทุนสร้างขึ้นมานี้จะดำเนินไปได้ด้วยดีเพียงไหนนั้นขึ้นอยู่กับตลาดเป็นสำคัญ โดยที่ผลการศึกษาด้านนี้เป็นสิ่งชี้ถึงความสำเร็จและความล้มเหลวของกิจการลงทุน การดำเนินการศึกษาความเหมาะสมและลู่ทางเป็นไปได้ของโครงการลงทุนจึงมุ่งในด้านตลาดก่อนเป็นเบื้องต้นหากผลชี้ชัดว่าโครงการดังกล่าวมีตลาด

รองรับผลผลิตแล้ว จึงค่อยศึกษาความเหมาะสมของโครงการในลักษณะอื่นๆ เช่น ด้านวิศวกรรม ด้านการเงิน ในขั้นต่อไป

(2) การศึกษาด้านวิศวกรรม (engineering study)

การศึกษาในแง่นี้จะทำให้ทราบถึงขนาดการผลิตที่เหมาะสมว่าควรเป็นอย่างไร ขบวนการผลิต (production process) ที่เหมาะสมเป็นอย่างไร มีขั้นตอนการผลิตเป็นอย่างไร โรงงานควรตั้งอยู่ที่ไหน ปริมาณการผลิตที่จะใช้เป็นเท่าไรและจะหาได้จากแหล่งใด เครื่องจักรอุปกรณ์การผลิตมีอะไรบ้าง การวางผังโรงงานควรเป็นอย่างไร แผนการก่อสร้างโรงงานจะดำเนินตามขั้นตอนอย่างไรเหล่านี้เป็นต้น การศึกษาในแง่นี้จะเน้นหนักถึงกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตของโรงงานที่จะลงทุนโดยเฉพาะ

(3) การศึกษาด้านการเงิน (financial study)

การศึกษาทางด้านการเงินของโครงการเกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายในการลงทุนว่าจะต้องใช้เงินในด้านใดบ้าง เป็นจำนวนเท่าใด จะหาแหล่งเงินทุนได้จากแหล่งใด โครงการนี้จะให้ผลตอบแทนการลงทุนสูงต่ำอย่างไร นอกจากนี้ยังต้องวิเคราะห์ความไวของโครงการ เพื่อดูว่าอัตราผลตอบแทนการลงทุนจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรหาที่มีการเปลี่ยนแปลงในราคาวัตถุดิบ ปริมาณการผลิต หรือราคาขาย ฯลฯ ในอนาคต ทั้งนี้เพื่อทดสอบถึงความเป็นไปได้ของโครงการในสภาพการณ์ต่างๆที่ผิดไปจากที่ได้คาดคะเนเอาไว้แต่เดิม

การประมาณการด้านการเงินโครงการ

การประมาณการด้านการเงินเป็นการประมาณการต้นทุนสินค้าขาย ค่าใช้จ่ายในการบริหารงานและอื่นๆ งบกำไรขาดทุน และงบกระแสเงินสด ในการประมาณการนี้จะต้องจำแนกค่าใช้จ่ายต่างๆให้ชัดเจน ได้แก่

- ก. ค่าสินทรัพย์ถาวรและค่าใช้จ่ายอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าสินทรัพย์ถาวร ค่าเสื่อมราคา ค่าประกัน ค่าบำรุงรักษา ค่าภาษีที่ดิน เป็นต้น
- ข. เงินเดือนค่าจ้างแรงงานทั้งฝ่ายบริหารและฝ่ายผลิต
- ค. ค่าวัตถุดิบและวัสดุหน้าเข้า
- ง. ค่าไฟฟ้า
- จ. เงินชำระหนี้แต่ละงวดและดอกเบี้ย
- ฉ. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินงาน

- ช. ค่าใช้จ่ายสำรองอื่นๆ
 ฉ. ค่าภาษี

ค่าเสื่อมราคา (depreciation)

ในทรัพย์สินถาวรทั้งหมดยกเว้นที่ดินจะคิดค่าเสื่อมราคา ค่าเสื่อมราคาเป็นค่าใช้จ่ายส่วนหนึ่งของค่าใช้จ่ายคงที่ ซึ่งจะต้องจ่ายทุกๆปีในระยะดำเนินการผลิตของโครงการ การที่จะทราบว่าค่าเสื่อมราคาเป็นเท่าไร จะต้องกำหนดอายุใช้งาน (economic life) ของสินทรัพย์ถาวรเสียก่อน โดยทั่วไปค่าเสื่อมราคาของตัวอาคารและโรงงาน คิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร อุปกรณ์การผลิต คิด 10 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ค่าเสื่อมราคารถยนต์และอุปกรณ์สำนักงาน คิดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ต่อปี

ค่าประกันภัย

ได้แก่ค่าประกันไฟ ประกันหม้อน้ำ และอื่นๆ สินทรัพย์ที่มีประกันเสมอๆ ได้แก่ ตัวอาคารและสิ่งก่อสร้างอื่นๆ เครื่องจักรและอุปกรณ์การผลิต นอกจากนี้ยังอาจประกันสินค้าคงคลังด้วยก็ได้

ค่าบำรุงรักษาและซ่อมแซม

ค่าใช้จ่ายในด้านนี้อาจประมาณอย่างคร่าวๆ โดยคิดเป็นค่าร้อยละของค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอาคารและซื้อเครื่องจักร ในช่วง 5 ปีแรกของโครงการควรเป็น 1-3 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นแล้วควรเพิ่มขึ้นให้มากกว่านี้

6.1 การประมาณการเงินลงทุนของโครงการ

ค่าใช้จ่ายในการลงทุน จะแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

6.1.1 ส่วนที่เป็นต้นทุนสินทรัพย์ถาวรและค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินงาน

ต้นทุนสินทรัพย์ถาวร ได้แก่ค่าใช้จ่ายต่อไปนี้

- ก. ที่ดิน และบริเวณที่ปรับปรุงขึ้นสำหรับโครงการ เช่น ถนน ทางเท้า

- ข. ตัวอาคารและสิ่งก่อสร้างอื่นๆ เช่น อ่างเก็บน้ำ สถานที่เก็บวัตถุดิบ ท่อระบายน้ำไฮโดรค
- ค. เครื่องจักรและอุปกรณ์การผลิต
- ง. เครื่องมือต่างๆในโรงงาน เครื่องใช้สำนักงาน และอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ
- จ. ยานพาหนะ

ค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินงาน หมายถึง ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้น นับตั้งแต่ก่อตั้งกิจการ จนถึงวันที่เริ่มดำเนินงานผลิต ในกรณีของการขยายกิจการ หมายถึงค่าใช้จ่ายทั้งหมด ตั้งแต่เริ่มลงมือขยายกิจการ จนถึงวันที่มีรายได้ส่วนเพิ่มจากการขยายกิจการ ค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินงาน ได้แก่

- ก. เงินเดือนผู้บริหาร โครงการและเจ้าหน้าที่ในสำนักงาน
- ข. ค่าเดินทางติดต่อ
- ค. ค่าเช่าสำนักงาน
- ง. ค่าธรรมเนียมในการขออนุญาตตั้งบริษัทและโรงงาน
- จ. ค่าใช้จ่ายในการติดต่อขอกู้เงินจากแหล่งเงินทุน
- ฉ. ค่าฝึกอบรมพนักงานในต่างประเทศและในประเทศ
- ช. ค่าใช้จ่ายในการลองเครื่อง
- ญ. ค่าดอกเบี้ยเงินกู้ก่อนเริ่มกิจการ

6.1.2 ส่วนที่เป็นเงินทุนหมุนเวียน

เงินทุนหมุนเวียน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่เป็นเงินสดซึ่งประเมินได้จากการดำเนินงานในระยะเวลาหนึ่ง เช่น 3 เดือน หรือ 6 เดือน เป็นต้น เพื่อใช้ในด้าน

- ก. วัตถุดิบ
- ข. เงินเดินค่าจ้างแรงงานด้านผลิตรวมทั้งสวัสดิการอื่นๆ เช่น เงินช่วยเหลือค่าครองชีพ ค่ารักษาพยาบาล ฯลฯ
- ค. ค่าใช้จ่ายในการผลิตอื่นๆ
- ง. เงินเดือนค่าจ้างแรงงานด้านบริหารรวมทั้งสวัสดิการอื่นๆ
- จ. ค่าใช้จ่ายในการบริหารงานและอื่นๆ

กำหนดให้ การผลิตโคโตซานด้วยเครื่องต้นแบบผลิตโคโตซานครั้งนี้ มีที่ตั้งอยู่ภายในบริษัท ห้างเย็น โชติวัฒน์ขนาดใหญ่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสงขลา จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในค่าที่ดิน ค่าก่อสร้างโรงงาน การติดตั้งไฟฟ้า ท่อน้ำ ค่าก่อสร้างรั้ว ถนน ที่จอดรถ บริเวณเก็บวัตถุดิบ

กำลังการผลิตโคโตซานจากวัตถุดิบวันละ 5 กิโลกรัม โดยผลิตจากกระดองปลาหมึกจากบริษัท เทพพิทักษ์ ซีฟู๊ดส์ จำกัด จังหวัดปัตตานี ซึ่งมีวัสดุเศษเหลือกระดองปลาหมึกสัปดาห์ละ 5 กิโลกรัม และผลิตจากเปลือกกุ้งซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือจากบริษัท ห้างเย็น โชติวัฒน์ขนาดใหญ่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสงขลา สัปดาห์ละ 25 กิโลกรัม ผลผลิตที่ได้เป็นโคโตซานจากกระดองปลาหมึกสัปดาห์ละ 1 กิโลกรัม โคโตซานจากเปลือกกุ้งสัปดาห์ละ 5 กิโลกรัม และสารละลายต่างเหลือใช้ซึ่งสามารถทำเป็นปุ๋ยน้ำประมาณสัปดาห์ละ 380 ลิตร ราคาขายโคโตซานซึ่งสำรวจพบว่าราคา กิโลกรัมละ 1,600 บาท ปุ๋ยน้ำลิตรละ 15 บาท

เมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนต่างๆในการผลิต ได้แก่ ต้นทุนคงที่ (fixed cost) คือต้นทุนที่ไม่ได้แปรผันไปตามปริมาณของผลผลิตที่ได้ ต้นทุนแปรผัน (variable cost) คือต้นทุนการผลิตที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการผลิต ถ้าผลิตมากก็มีค่าใช้จ่ายต้นทุนนี้มาก ถ้าไม่ผลิตก็ไม่มีการใช้จ่าย จะได้ว่าในหนึ่งวันมีค่าใช้จ่ายดังนี้

ต้นทุนคงที่

ค่าเครื่องจักรประมาณ 370,000 บาท มาจากเครื่องผลิต เครื่องอบ บั้มสุญญากาศ เครื่องชั่ง เครื่องวัดพีเอชและอุปกรณ์ต่างๆ

ต้นทุนผันแปรต่อการผลิตโคโตซาน 1 กิโลกรัม

ค่าวัตถุดิบ สารเคมี	150	บาท
ค่าพลังงาน	150	บาท
ค่าน้ำ	50	บาท
รวมทั้งสิ้น	350	บาท

ตารางที่ 6-1 แสดงการประมาณการกระแสเงินสด ตั้งแต่ปีแรกจนถึงสิ้นสุดโครงการ

รายการ	ปี	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
กระแสเงินสดรับ (inflow)						
1. การขาย						
ก. โคนโชนจากเปลือกกุ้ง		384,000	384,000	384,000	384,000	384,000
ข. โคนโชนจากกระดองปลาหมึก		76,800	76,800	776,800	76,800	76,800
ค. ปูย่น้ำ		561,600	561,600	561,600	561,600	561,600
รวม		1,022,400	1,022,400	1,022,400	1,022,400	1,022,400
กระแสเงินสดจ่าย (outflow)						
1. ค่าเครื่องจักรและอุปกรณ์การผลิต		370,000				
2. ต้นทุนวัตถุดิบ สารเคมี		43,200	43,200	43,200	43,200	43,200
4. ค่าไฟฟ้า		43,200	43,200	43,200	43,200	43,200
5. ค่าน้ำ		14,400	14,400	14,400	14,400	14,400
6. ค่าแรงงาน		115,200	115,200	115,200	115,200	115,200
รวม		586,000	216,000	216,000	216,000	216,000
กระแสเงินสดสุทธิ		436,400	806,400	806,400	806,400	806,400

6.2 การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

จันทนา จันทโร และศิริจันทร์ ทองประเสริฐ (2540) กล่าวว่าจุดประสงค์สำคัญในการศึกษาด้านการเงิน คือ ต้องการทราบว่าโครงการลงทุนมีความเหมาะสมด้านการเงินอย่างไร (financial viable) โดยพิจารณาผลตอบแทนการลงทุน 3 ประการด้วยกันคือ

- ก. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value)
- ข. อัตราผลตอบแทนการลงทุน (internal rate of return)
- ค. ระยะเวลาคืนทุน (payback period)

6.2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ ได้จากการนำค่ากระแสเงินสดสุทธิของแต่ละปี (ตลอดอายุโครงการ) มาเทียบให้เป็นมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิโดยใช้อัตราส่วนลดที่กำหนดขึ้น กระแสเงินสดสุทธิที่จะนำมาเทียบเป็นมูลค่าปัจจุบันจะคำนวณตั้งแต่ปีที่คาดว่าจะเริ่มดำเนินการ โดยคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$NPV = \sum_{i=1}^n (NCF_i \times a_i) \quad 6-1$$

โดยที่ NPV_i คือกระแสเงินสดสุทธิของโครงการ ในปีที่ 1, 2, 3, ...,n
 a_i คือแฟกเตอร์ส่วนลด ในปีที่ 1, 2, 3, ...,n

อัตราส่วนลดควรมีค่าเท่ากับดอกเบี้ยเงินกู้ระยะยาว หรือเท่ากับดอกเบี้ยที่ได้จากการให้กู้ยืม หรือเท่ากับดอกเบี้ยสูงสุดของเงินฝาก เป็นต้น แต่เนื่องจากดอกเบี้ยจำนวนนี้ไม่คงที่ อัตราส่วนลดจะเป็นตัวชี้ให้เห็นถึงโอกาสของการลงทุน นั่นคือความสามารถที่เงินทุนในโครงการจะคืนทุนมาให้ผู้ลงทุนได้ เมื่อเทียบกับการนำเงินไปลงทุนในแหล่งต่างๆกัน หรืออาจสรุปได้ว่าอัตราส่วนลดควรมีค่าน้อยที่สุดมากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่ผู้ลงทุนคิดว่าถ้าได้ดอกเบี้ยจำนวนนี้ก็ไม่มีความเสี่ยงที่จะลงทุนในโครงการ

มูลค่าปัจจุบันจะคิดตลอดอายุโครงการ เช่น ในโครงการหนึ่งๆอายุใช้งานของเครื่องจักรจะคิดประมาณ 10-15 ปี ตัวอาคารถ้าก่อสร้างด้วยวัสดุที่มีความคงทนสูงจะคิด 30-40 ปี ยานพาหนะ 4-5 ปี เป็นต้น ในทางปฏิบัติเราจะกำหนดอายุโครงการให้เท่ากับอายุใช้งานของสินทรัพย์ถาวรที่คิดว่าเป็นส่วนสำคัญของโครงการซึ่งในโรงงานก็คือเครื่องจักรนั่นเอง ส่วนสินทรัพย์ถาวรที่มีอายุมากกว่าอายุโครงการจะคำนวณเป็นค่าซากในปีสุดท้ายของอายุโครงการ เช่น ตัวอาคาร ที่ดิน และเงินทุนหมุนเวียน ซึ่งส่วนมากในทางปฏิบัติจะกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดอายุโครงการ ส่วนสินทรัพย์ถาวรที่มีอายุน้อยกว่าอายุโครงการจะต้องมีการลงทุนทดแทนด้วย

เกณฑ์การตัดสินใจ ในกรณีที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับศูนย์หรือมากกว่า จะรับโครงการลงทุนนั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือจะรับโครงการลงทุนที่มีมูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับเท่ากับหรือมากกว่ามูลค่าปัจจุบันของเงินสดจ่าย ถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นลบ แสดงว่าโครงการนั้นไม่คุ้มกับการลงทุน

กำหนดให้ อัตราดอกเบี้ย 15 เปอร์เซ็นต์ โครงการมีอายุ 5 ปีซึ่งเท่ากับอายุของ

เครื่องจักร

ตารางที่ 6-2 แสดงการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ

ปี	จำนวนเงิน	แฟคเตอร์ส่วนลด (15%)	มูลค่าปัจจุบัน
0	-370,000	-	-370,000
1	806,400	0.870	701,568
2	806,400	0.756	609,638
3	806,400	0.658	503,611
4	806,400	0.572	416,260
5	806,400	0.497	400,780
Total			2,261,857

$$NPV = 2,261,857$$

จากข้อมูลดังตารางที่ 6-2 โครงการนี้จะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ทั้งหมดเท่ากับ 2,261,857 ดังนั้นโครงการนี้น่าลงทุน เพราะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวก

6.2.2 อัตราผลตอบแทนการลงทุน (internal rate of return, IRR)

อัตราผลตอบแทนการลงทุน เป็นอัตราส่วนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดจ่าย หรือ IRR เป็นอัตราส่วนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของรายรับจากโครงการเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของการลงทุน ดังนั้นมูลค่าปัจจุบันสุทธิจึงเท่ากับศูนย์

ขั้นตอนการคำนวณค่า IRR เหมือนกับการคำนวณหา NPV เราใช้สมการในการคำนวณเหมือนเดิมแต่แทนที่จะกำหนดอัตราดอกเบี้ยขึ้นมา เราจะหาอัตราดอกเบี้ยที่ทำให้ NPV เป็นศูนย์ อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราส่วนนี้เรียกว่า IRR และจะเป็นตัวเลขที่บอกกำไรของโครงการ ในกรณีที่สินค้าคงคลังยังไม่ขาย แต่จะขายในเวลาต่อไป มูลค่าของสินค้าคงคลังนี้จะถือเป็นรายได้ในปีที่ทำการผลิต ไม่ใช่ปีที่ขายได้

เกณฑ์การตัดสินใจ จากอัตราผลตอบแทนการลงทุนที่คำนวณได้ ให้นำไปเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำของธุรกิจจะยอมรับในการลงทุนได้ หรืออัตราดอกเบี้ยของสถาบันการเงิน ถ้าอัตราผลตอบแทนการลงทุนที่คำนวณได้สูงกว่า ถือเป็นโครงการที่คุ้มค่าต่อการลงทุน เช่นควรจะสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยของบริษัทเงินทุน หรือสถาบันการเงินต่างๆ หรือสูงกว่าหรือเท่ากับอัตราผลตอบแทนการลงทุนตามที่กฎหมายกำหนดไว้

การคำนวณหาอัตราส่วนลด การคำนวณหาค่า IRR นี้ใช้วิธี trial and error โดยการเลือกอัตราส่วนลดหนึ่งมาคำนวณ ถ้าอัตราส่วนลดดังกล่าวให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น (-) แสดงว่าอัตราส่วนลดที่เลือกมามีค่าสูงเกินไป ในทางตรงกันข้ามหากมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น (+) แสดงว่าอัตราส่วนลดนั้นมีค่าต่ำไป ซึ่งกำหนดเป็นสูตรดังนี้

$$i_r = i_1 + \frac{PV(i_2 - i_1)}{PV + NV} \quad 6-2$$

โดยที่ i_r คือ IRR

PV คือ NPV (มีค่า +) ที่อัตราส่วนลดค่าต่ำกว่า (i_1)

NV คือ NPV (มีค่า -) ที่อัตราส่วนลดสูงกว่า (i_2)

ค่า PV และ NV ในสูตร ไม่คิดเครื่องหมาย

ค่า i_1 และ i_2 ไม่ควรต่างกันมากกว่า 1 หรือ 2 เปอร์เซ็นต์ มิฉะนั้น

สูตรนี้จะใช้ไม่ได้ เพราะอัตราส่วนลด NPV ไม่ได้มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง

จากโครงการ เมื่อกำหนดอัตราส่วนลด 15 เปอร์เซ็นต์ มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 2,261,857 บาท ทำการเลือกอัตราส่วนลดที่สูงกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นศูนย์ NPV เมื่อใช้อัตราส่วนลด 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 6-3

ตารางที่ 6-3 แสดงการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนการลงทุน

กระแสเงินสดสุทธิ	แฟกเตอร์ส่วนลด 50 เปอร์เซ็นต์	NPV
-370,000		-370,000
806,400	0.667	537,869
806,400	0.444	358,042
806,400	0.296	238,695
806,400	0.198	159,668
806,400	0.132	106,445
Total		1,030,719

จากตารางที่ 6-3 อัตราส่วนลด 50 เปอร์เซ็นต์ ให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ 1,030,719 ซึ่งค่าที่ได้ไม่คิดลบแสดงว่าอัตราผลตอบแทนการลงทุนจะต้องมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จึงใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณโดยกำหนด initial cost of business เท่ากับ -370,000 บาท ค่า net income for the first year จนถึง net income for the fifth year เท่ากับ 806,400 บาท จะได้ค่า internal rate of return เท่ากับ

$$\text{IRR} = 217 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

อัตราส่วนลดที่ทำให้ค่า NPV เท่ากับ 0 จะได้ค่า IRR เท่ากับ 217 เปอร์เซ็นต์สูงกว่าค่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่กำหนดไว้ (minimum attractive rate of return, MARR) ซึ่งเท่ากับผลรวมของอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (15 เปอร์เซ็นต์) อัตราเงินเฟ้อ (5 เปอร์เซ็นต์) และค่าเสี่ยง (10 เปอร์เซ็นต์) รวมเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ จึงถือได้ว่าโครงการนี้มีความน่าลงทุนในการจัดสร้าง เนื่องจากที่ค่า IRR ของโครงการนี้สูงกว่าค่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่กำหนดไว้

6.2.3 ระยะเวลาคืนทุน (payback period)

เป็นที่ทราบกันดีว่า หากการดำเนินงานได้รับผลตอบแทนคุ้มกับจำนวนเงินที่ลงทุนได้รวดเร็วเท่าไรก็จะเป็นการดีมากขึ้นเท่านั้น เพราะโอกาสเสี่ยงต่อการขาดทุนในอนาคตน้อยลง และอีกประการหนึ่งผู้ลงทุนสามารถนำเงินทุนที่ถอนคืนนี้ไปลงทุนหาผลประโยชน์ในกิจการอื่นต่อไป

ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนจึงเป็นจำนวนปีในการดำเนินงาน ซึ่งทำให้มูลค่าการลงทุน
 สะสม (อย่างน้อยที่สุด) เท่ากับมูลค่าผลตอบแทนเงินสดสุทธิสะสมหรืออาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาคืน
 ทุน คือ จำนวนปีในการดำเนินงาน ซึ่งทำให้ผลกำไรที่ได้รับในแต่ละปีรวมกันแล้วมีค่าเท่ากับเงิน
 ลงทุนเริ่มแรก การทราบระยะเวลาคืนทุน จะเป็นประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ความเสี่ยง ซึ่งมีส่วน
 เกี่ยวข้องกับสถานการณ์ต่างๆ ในประเทศที่จะลงทุน

เนื่องจากโครงการที่จะมีลักษณะการลงทุนเพียงครั้งเดียว ในปีแรก และให้ผลตอบแทนที่
 เท่ากันทุกปี การหาค่างวดเวลาคืนทุนสามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{งวดเวลาคืนทุน} &= \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ(Total Investment)}}{\text{กระแสเงินสดไหลเข้ารายปี}} && 6-3 \\
 &= 370,000 / 806,400 \\
 &= 0.46
 \end{aligned}$$

ดังนั้น โครงการนี้จะมีระยะเวลาในการคืนทุนกลับคืนมาเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6

เดือน

บทที่ 7

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. กำลังการผลิตโคโคซานจากเครื่องต้นแบบผลิตโคโคซานขนาด 30 ลิตร ใช้วัตถุดิบวันละ 5 กิโลกรัม โดยผลิตจากกระดองปลาหมึกจากบริษัท เทพพิทักษ์ ซีฟู๊ดส์ จำกัด จังหวัดปัตตานี ซึ่งมีวัสดุเศษเหลือกระดองปลาหมึกสัปดาห์ละประมาณ 5 กิโลกรัม และผลิตจากเปลือกกุ้งซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือจากบริษัท ห้างเย็น โชติวัฒน์หาดใหญ่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสงขลา สัปดาห์ละ 25 กิโลกรัม ผลผลิตที่ได้เป็นโคโคซานจากกระดองปลาหมึกสัปดาห์ละ 1 กิโลกรัม โคโคซานจากเปลือกกุ้งสัปดาห์ละ 5 กิโลกรัม และสารละลายต่างเหลือใช้ซึ่งสามารถทำเป็นปุ๋ยน้ำประมาณสัปดาห์ละ 780 ลิตร

2. เครื่องต้นแบบผลิตโคโคซานจากเปลือกกุ้งต่อรอบการผลิต ใช้เปลือกกุ้ง 2 กิโลกรัม ผ่านกระบวนการกำจัดแร่ธาตุโดยทำปฏิกิริยากับ 1 M HCl ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตเปลือกกุ้งที่กำจัดแร่ธาตุประมาณ 51.25 จากนั้นเมื่อนำเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุ 2 กิโลกรัม ผ่านกระบวนการสกัดโปรตีนโดยทำปฏิกิริยากับ 1 M KOH ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตโคโคซานประมาณ 45.5 จากนั้นเมื่อนำโคโคซาน 1.5 กิโลกรัม ผ่านกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลโดยทำปฏิกิริยากับ 50 เปอร์เซ็นต์ KOH ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตโคโคซานประมาณ 67.7 เมื่อตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณเถ้าเท่ากับ 0.28 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 6.2 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 2.33×10^6 ดาลตัน ระดับการกำจัดหมู่อะซิติลเท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการตรวจสอบปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ นิกเกิล (Ni) และโครเมียม (Cr) เท่ากับ 2.91 และ 13.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm)

3. เครื่องต้นแบบผลิตโคโคซานจากกระดองปลาหมึกต่อรอบการผลิต ใช้กระดองปลาหมึก 2 กิโลกรัม ผ่านกระบวนการสกัดโปรตีนโดยทำปฏิกิริยากับ 1 M KOH ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตโคโคซานประมาณ 33.5 จากนั้นเมื่อนำโคโคซาน 1.5 กิโลกรัม ผ่านกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลโดยทำปฏิกิริยากับ 50 เปอร์เซ็นต์ KOH ที่อุณหภูมิ 126 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตโคโคซานประมาณ 65.5 เมื่อตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณเถ้าเท่ากับ 0.24 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 5.1 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ

5.07 x10⁶ ตาลตัน ระดับการกำจัดหมู่อะซิติลเท่ากับ 96.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการตรวจสอบปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ นิกเคิล (Ni) และ โครเมียม (Cr) เท่ากับ 5.89 และ 12.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm)

4. การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กลับมาใช้ใหม่นั้นพบว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้จำนวน 2 ครั้ง

5. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตสามารถนำมาผลิตเป็นปุ๋ยน้ำ โดยการนำมาปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยกรดฟอสฟอริกเอซิก (H₃PO₄) พบว่าสารละลายต่างที่เหลือใช้จากกระบวนการกำจัดโปรตีนเมื่อปรับสภาพให้เป็นกลางจะมีสัดส่วนของปริมาณไนโตรเจน (N) ต่อฟอสฟอรัส (P) จาก P₂O₅ ต่อโพแทสเซียม (K) จาก K₂O เท่ากับ 0.42, 3.23, 2.15 กรัมต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร และสารละลายที่เหลือใช้จากกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลเมื่อปรับสภาพให้เป็นกลางมีสัดส่วนของปริมาณไนโตรเจน (N) ต่อฟอสฟอรัส (P) จาก P₂O₅ ต่อโพแทสเซียม (K) จาก K₂O เท่ากับ 0.03, 6.26, 3.33 กรัมต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร

6. จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน 3 ค่าคือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) อัตราผลตอบแทนการลงทุน (internal rate of return, IRR) และระยะเวลาคืนทุน (payback period) พบว่าโครงการนี้มีความน่าลงทุนในการจัดสร้าง เพราะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 2,261,857 บาท อัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 217 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าค่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่กำหนดไว้ (minimum attractive rate of return, MARR) ซึ่งเท่ากับผลรวมของอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (15 เปอร์เซ็นต์) อัตราเงินเฟ้อ (5 เปอร์เซ็นต์) และค่าเสี่ยง (10 เปอร์เซ็นต์) รวมเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ และมีระยะเวลาในการคืนทุนกลับมาเป็นระยะเวลาทั้งหมด 6 เดือน

ข้อเสนอแนะ

1. กระบวนการกำจัดแร่ธาตุในการผลิตโคโคซานจากเปลือกกุ้งจะเกิดฟองแก๊สจำนวนมาก ทำให้ระดับของสารที่ทำปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตโคโคซานเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนอาจล้นออกจากถังปฏิกิริยา แก้ไขโดยการแบ่งเติมเปลือกกุ้งครั้งละ 0.5 กิโลกรัม ห่างกันประมาณ 5 นาที จนครบ 2 กิโลกรัม หรือจนผสมกันภายนอกจนหมดฟองแล้วเติมลงในถังปฏิกิริยา

2. สารละลายต่างหลังจากที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิติก มีความน่าจะเป็นที่จะสามารถนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดโปรตีนเนื่องจากยังมีสภาพความเป็นด่างสูง

3. กระบวนการกำจัดโปรตีนและการกำจัดหมู่อะซิติกน่าจะทำร่วมกันเป็นปฏิกิริยาเดียว เพราะจะทำให้ลดเวลาในการทำปฏิกิริยา

4. เครื่องผลิตไคโตซานควรมีถังสำหรับการกรองแยกจากถังสำหรับการผลิต เพื่อช่วยเพิ่มรอบการผลิตในถังสำหรับผลิต แทนการเสียเวลานานในการกรองด้วยถังผลิต

5. ปัญหาวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกิริยาซึ่งต้องทนกรดและด่าง และทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิสูง ควรใช้เหล็กสเตนเลส 316 แทนการใช้เหล็กสเตนเลส 304 เนื่องจากเป็นโลหะที่มีทนการกัดกร่อนสูงกว่า จึงจะมีโลหะปนเปื้อนผลิตภัณฑ์น้อยกว่า

6. ผลการวิเคราะห์คุณภาพของไคโตซานที่ผลิตได้พบว่ามีความน่าจะเป็นที่จะสามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุทางการแพทย์ได้ จึงควรทำการวิจัยด้านการนำมาใช้ในทางการแพทย์ต่อไป เช่น การผลิตเป็นพลาสติกปิดแผล เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่า และสามารถจำหน่ายได้ง่ายกว่าไคโตซานที่ผลิต

บรรณานุกรม

- กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สถิติการประมงแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ. 2544-2548.
- จันทนา จันทโร และศิริจันทร์ ทองประเสริฐ. 2540. การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการด้านธุรกิจและอุตสาหกรรม. 85-133.
- ทาเคชิ โยเนะยามะ และจิไซโนะ เซไค. 2548. แนวคิดและวิธีการออกแบบเครื่องจักรกล. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ
- ธนกร ณ พัทลุง. 2549. ข้อพิจารณาสำหรับการออกแบบถังกวนผสม. ว. เทคโนโลยี. 256:124-128.
- บัญชา ธนบุญสมบัติ. 2543. การออกแบบทางวิศวกรรม การเลือกใช้วัสดุและกรรมวิธีการผลิต. หน้า 61-96. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น. กรุงเทพฯ
- ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์. 2545. สารไคติน-โคโคซาน สารสารพัดประโยชน์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ
- มณฑา จำเริญักษ์. 2544. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโคโคซานจากกระดองปลาหมึกและเปลือกกุ้งต่อการห้ามเลือด การสมานแผล และความปลอดภัยในการนำไปใช้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วิสิทธิ์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. 2541. การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม1. หน้า 228-249. ซีเอ็ดดูเคชั่น. กรุงเทพฯ
- วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544. จลนพลศาสตร์ และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2546. เรื่องนำรู้"ไคติน-โคโคซาน. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- สมศรี จรุงเรือง. 2542. ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. หน้า 34-51. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- สืบศักดิ์ กลิ่นสอน. 2539. ปัจจัยการผลิตและการใช้ประโยชน์โคโคซานจากเปลือกกุ้งที่เป็นของเหลือทิ้งในการแปรรูปอาหาร. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

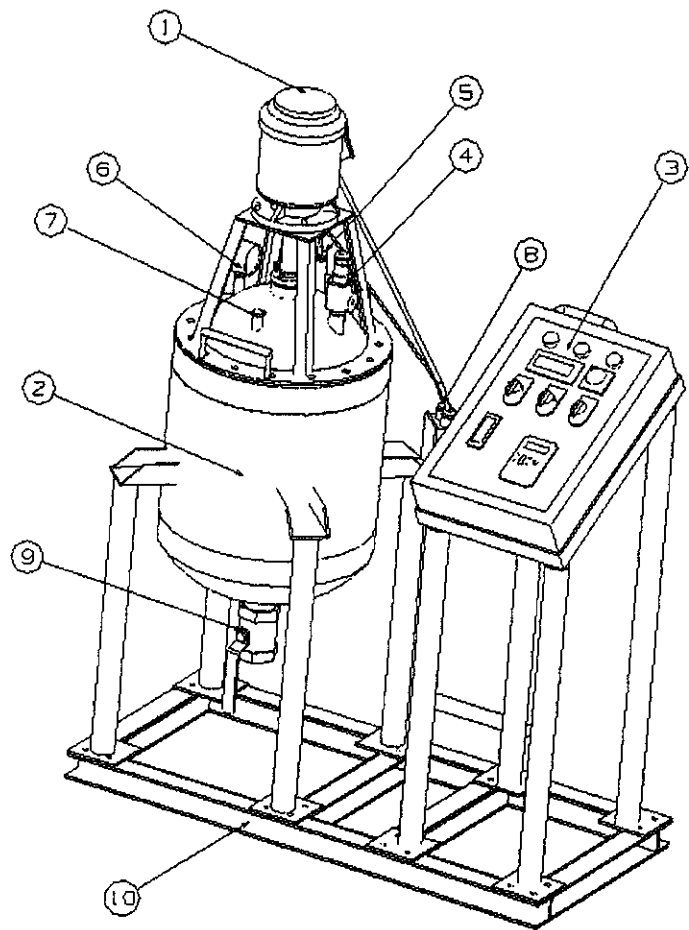
- สุทธวัฒน์ เบญจกุล. 2533. แนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกกุ้ง : ไคตินและไคโตซาน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุธรรม สุขมณี. 2548. เอกสารคำสอน วิชา 230-431 การออกแบบวิศวกรรมเคมี. ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา
- สุธี รัตนะ. 2545. ศักยภาพในการนำตะกอนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตอาหาร ทะเลแห้งแห้งด้วยไคโตซานมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตอาหารไก่กระตัง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุพจน์ หารหนองบัว, สุวดี จันทร์กระจ่าง, ปราณี เลิศสุริวงศ์, กฤษณา ศิริเลิศมกุล, ปราณี รัตนวลิตโรจน์ และสุทธิรัตน์ ลิศนันท์. 2546. การศึกษาและวิเคราะห์ สถานภาพของโรงงานผู้ผลิตและตลาดการใช้ไคตินและไคโตซาน. สถาบันวิจัย โดหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- อุดมชัย จิระดิษฐ์. 2535. ผลิตภัณฑ์จากเปลือกกุ้งกับการพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ. ศูนย์ถ่ายทอด เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ
- Ashford,N.A., Hattis,D. and Murray,A.E. 1997. Industrial prospects for chitin and protein from shellfish wastes. p. 77-83. MIT sea Grant Report.
- Association of Official Analytical Chemists (A.O.A.C.). 1984. Official Method of Analysis. 14th ed. George Banton Co., Ltd., Washington, D.C.
- Balassa,L.L. and Prudden,J.F. 1978. Application of chitin and chitosan in wound healing acceleration. In Proceeding of the First International Conference on Chitin/Chitosan
- Bough,W.A., Satter,W.L., Wu,A.C.M. and Perkins,B.E. 1978. Influence of chitosan products I : chemical compositions, viscosity and molecular weight distribution of chitosan products. Vol. 20. p. 1931-1943. Biotechnol Bioeng.
- Bronswijk,W.V. 1975. Molecular weight determination by viscometry. Handbook of physical 301/302 for student in department of chemistry. p. 127-130. Australia.
- Broussignac,P. 1968. Chitosan : a natural polymer not well known by the industry. Vol. 9. p. 1241-1247. Genie Chim.
- Chandumpai,A., Singhpibulporn,N., Faroongsarng,D. and Somprasit,P. 2004. Preparation and physico-chemical characterization of chitin and chitosan from the pens of the squid species *Loligo lessoniana* and *Loligo formosana*. J.Carbohydrate Polymers. 58: 467-474.

- Chen,X.G., Lui,C.S., Lui,C.G., Meng,X.H., Lee,C.M. and Park,H.J. 2005. Preparation and Biocompatibility of chitosan microcarriers as biomaterial. *J. Biochemical Engineering*. 27:269-274.
- Conrad,J. 1965. Encyclopedia of polymer science and technology : Plastic, Resins, Rubbers, Fibers. Vol 3.
- Hackman,R.H. 1954. Chitin I Enzymic degradation of chitin and chitin esters. *J. Bio Sci*. 7:168-178.
- Hang,Y.D. 1990. Chitsang Production from *Rhizopus oryzae* mycelia. *J. Biotech*. 911-912.
- Horowitz, S.T., Roseman, S. and Blumenthal, H.J. 1957. Preparation of glucosamine oligosaccharides I. *J. Chem Sci*. 79:5046-5049.
- Johnson,E.L. and Peniston,Q.P. 1982. Utilization of shellfish waste for chitin and chitosan production. *In Chemistry and biochemistry of marine food products*.
- Koide,S.S. 1998. Chitin-Chitosan : Properties, Benefits and Risks. *J. Nutrition Research*. 18:1091-1101.
- Kurita,K., Sannan,T. and Iwakura,Y. 1979. Studies on chitin.VI.Binding of metal cations. *J. Polymer Sci*. 23:511-515.
- Kweon,D.K., Song,S.B. and Park,Y.Y. 2003. Preparation of water-soluble chitosan/heparin complex and its application as wound healing accelerator. *J. Biomaterials*. 24:1059-1601.
- Lowly,O.H., Rosebrough,N.J., Farr,A.L. and Randall,R.J. 1951. Protein. Measurement with Folin-phenol reagent. *J. Biological Chemistry*. 193:265-275
- Madhavan,P. and Ramachandrannair,K.G. 1978. Metal-binding property of chitosan from prawn waste. In proceedings of the First International Conference on Chitin/Chitosan.
- Maleti,N.V. and Ravi,K. 2000. A review of chitin and chitosan applications. *J. Reactive & Functional Polymer*. 46:1-27.
- Muzzarelli,R.A.A. 1985. Chitin. Pergamon Press Ltd. New York.
- Muzzarelli,R.A.A. and Rocchetti,R. 1985. Carbohydrate Polymer. p. 459-472 . Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England.

- Santos,P., Seabra,P., Veleirinho,B., Delgadillo,I. and Lopes,S. 2006. Acetylation and molecular mass effects on barrier and mechanical properties of short fin squid chitosan membranes. *J. European Polymer.* 42:3277-3285.
- Shahidi,F., Kamil,J., Arachchi,V. and Joen,Y. 1999. Food applications of chitin and chitosans. *J. Food Science and Technology.* 10:37-51.
- Shimahara,K., Takiguchi,Y., Kobayashi,T., Uda,K. and Sannan,T. 1989. Screening of Mucaraceae strains suitable for chitosan production. *In Chitin and Chitosan.* p. 171-178. New York.
- Sornprasit,P. 1997. Characterization of Chitin and Chitosan from Squid pens. Master of Science Thesis. Prince of Songkhla University.
- Stone,C.A., Wright,H., Clarke,T., Powell,R. and Devaraj,D.S. 2000. Healing at skin graft donor sites dressed with chitosan. *J. Plastic Surgery.* 53:601-606.
- Takeda,M. 1978. Use of chitin powder as adsorbent in Thin-Layer chromatography. *In Proceedings of first International Conference on Chitin/Chitosan.*
- Vincent,W.U. 1967. *Mixing Theory and practice.* p. 288-294. Academic Press. New York.
- Wang,M., Fang,Y. and Hu,D. 2001. Preparation and properties of chitosan-poly (N-isopropylacrylamine) full-IPN hydrogels. *J.Reactive and Functional Polymers.* 48:215-221.

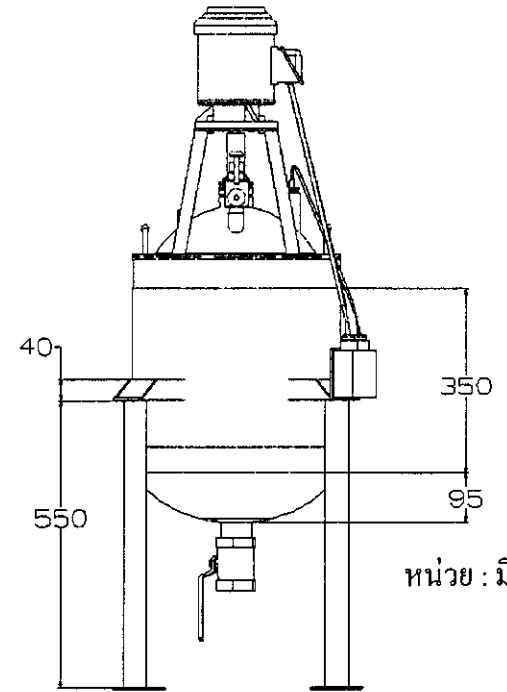
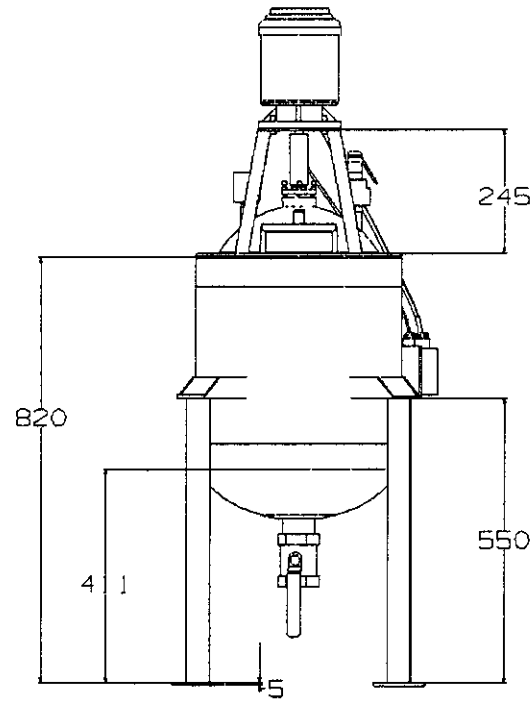
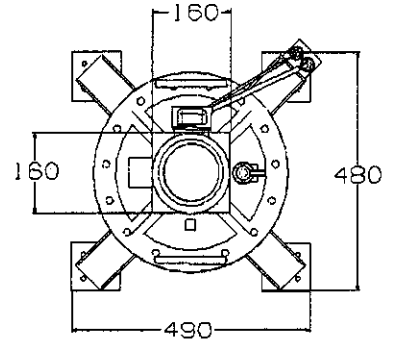
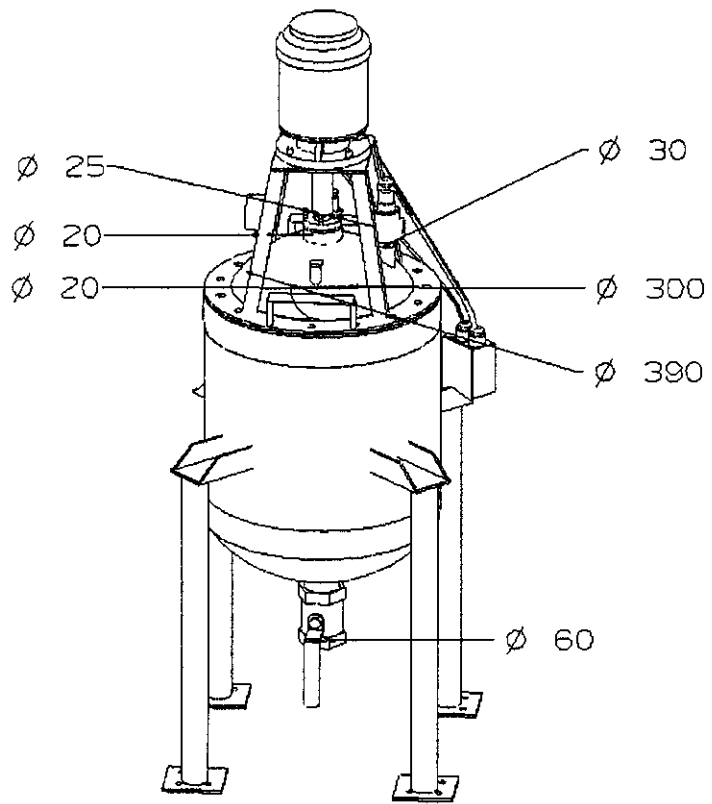
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก แสดงรายละเอียดต่างๆของถังต้นแบบผลิตไคโตซาน



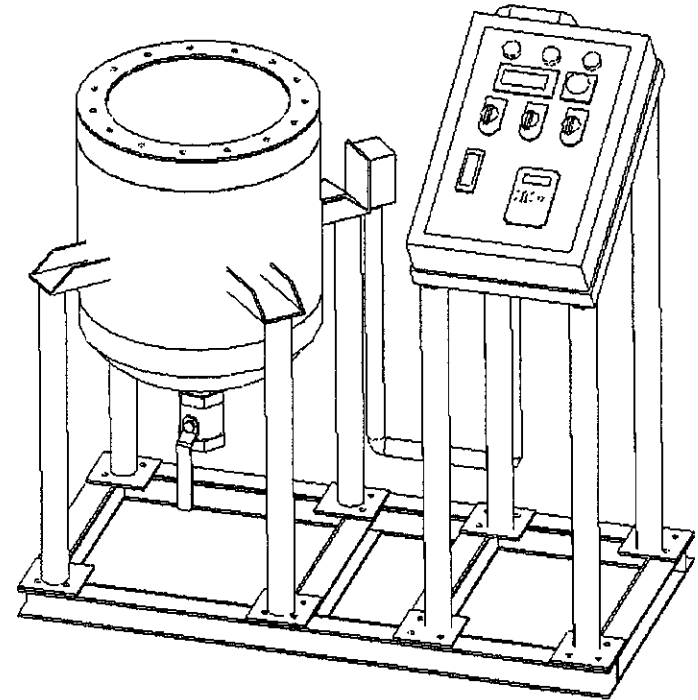
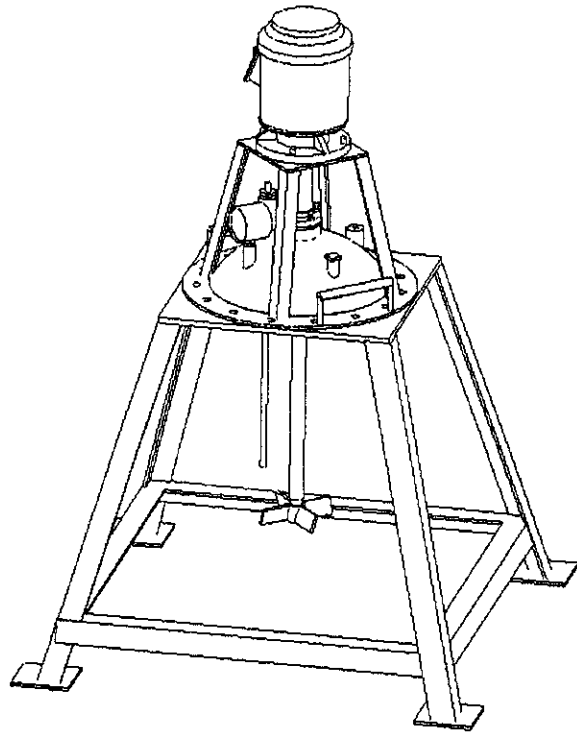
ลำดับท	รายการ	รายละเอียด
1	มอเตอร์	ขนาด ¼ แรงม้า
2	ถังผลิตไคโตซาน	ขนาด 30 ลิตร
3	กล่องควบคุม	ปุ่มเปิด/ปิด, ปุ่มปรับความเร็วมอเตอร์ ปุ่มปรับอุณหภูมิ
4	วาล์วนิรภัย	ขนาด 2 บาร์
5	เทอร์โมคัปเปิล	0 – 500 องศาเซลเซียส
6	เกดต์วัดความดัน	ขนาด 7 บาร์
7	ช่องเติมสาร	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว
8	ช่องเสียบสายไฟมอเตอร์, เทอร์โมคัปเปิล	-
9	บอลล์วาล์ว	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว
10	ฐานวางถังผลิตไคโตซาน	แบบ C-Channel 3x5 นิ้ว

ภาคผนวก ข ภาพแสดงรายละเอียดถึงกวนผสม

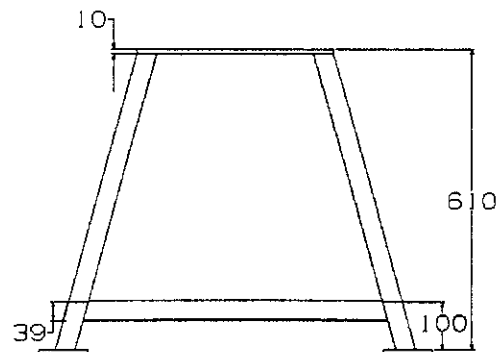
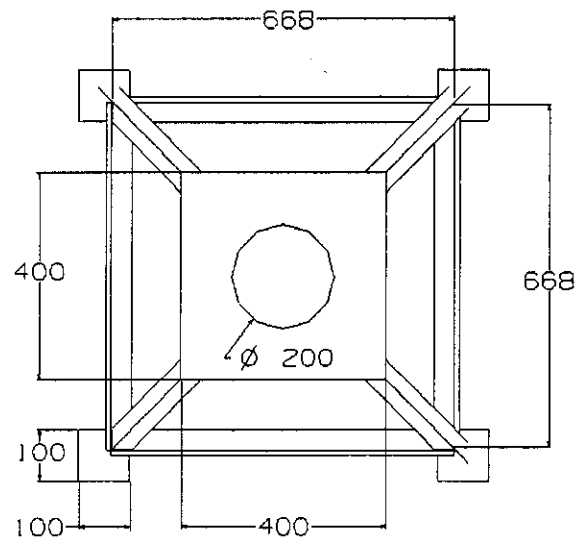
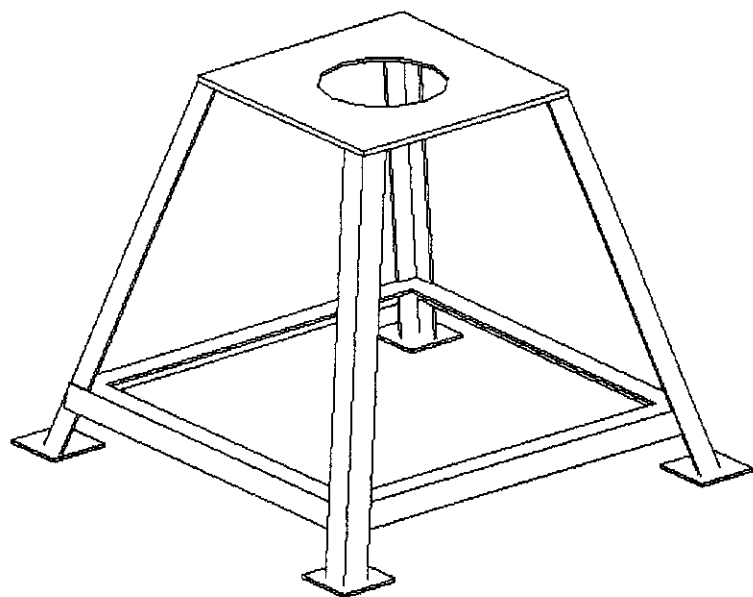


หน่วย : มิลลิเมตร

ภาคผนวก ค ภาพแสดงการวางชุดกวนผสม

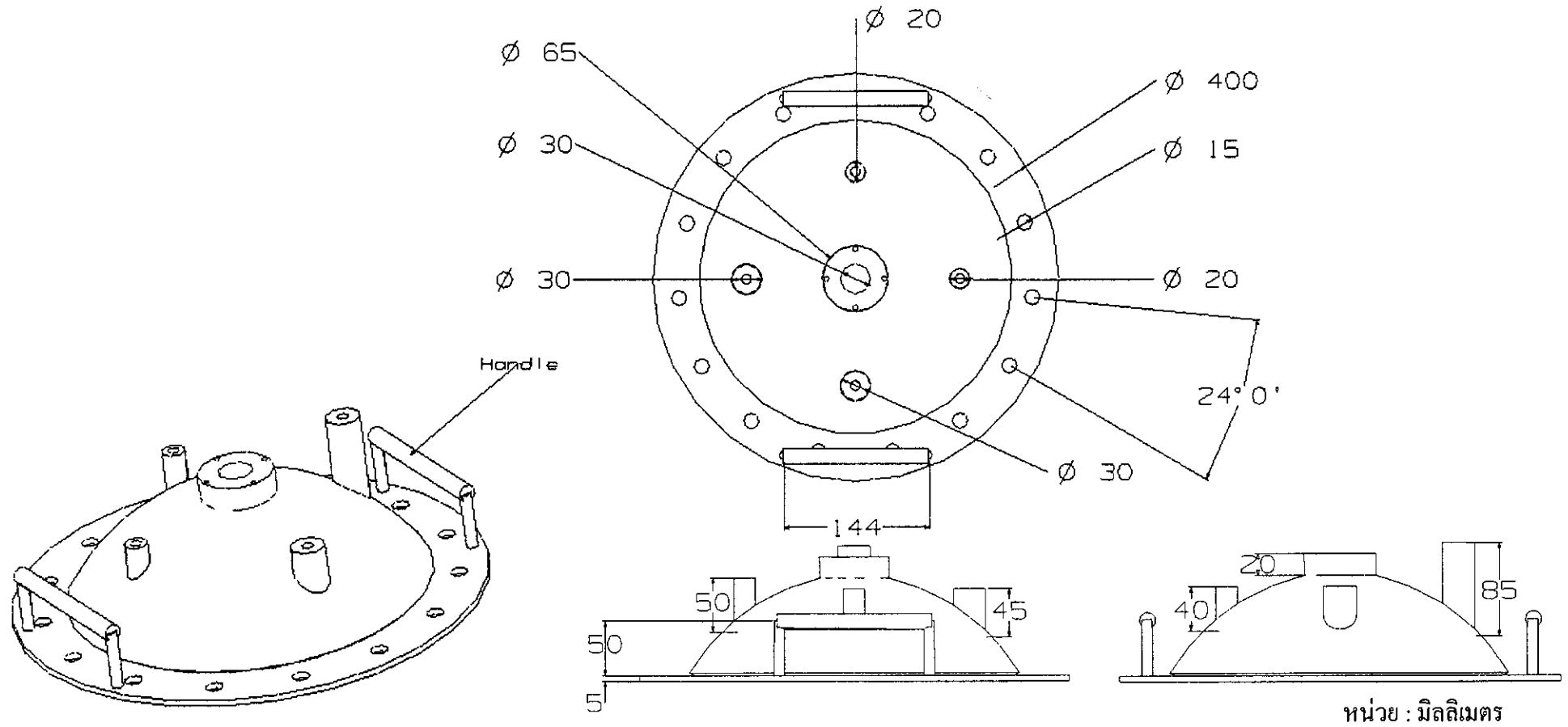


ภาคผนวก ง ภาพแสดงรายละเอียดชิ้นรอกชุดกวนผสม

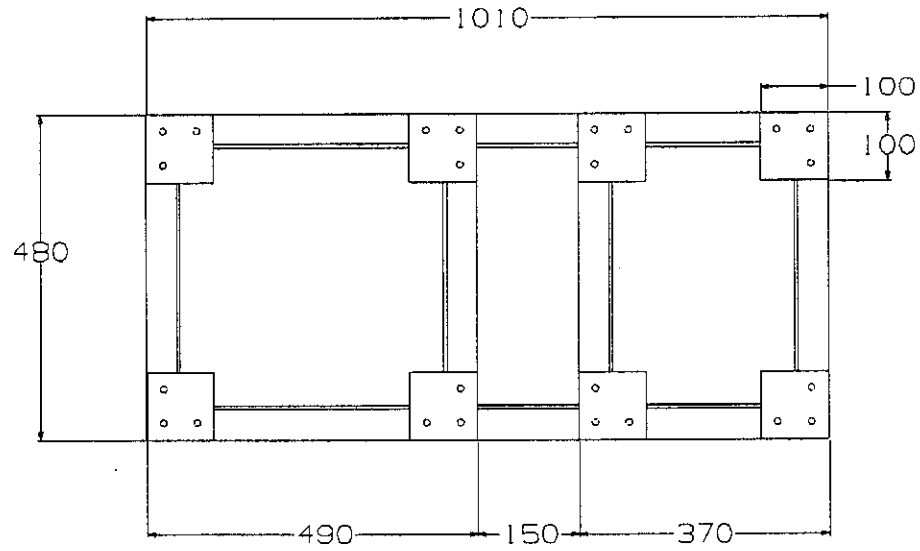
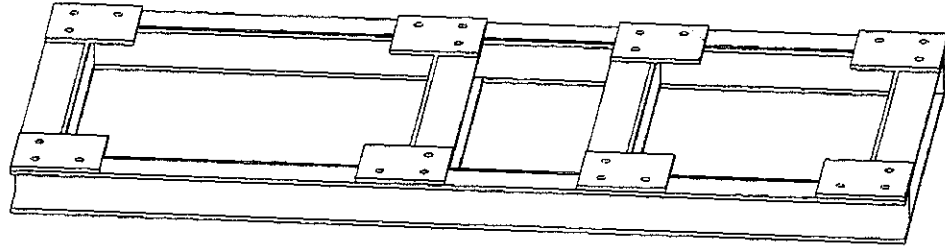


หน่วย : มิลลิเมตร

ภาคผนวก จ ภาพแสดงรายละเอียดผ่านของถังกวนผสม



ภาคผนวก ฉ ภาพแสดงรายละเอียดฐานรองเครื่องต้นแบบผลิตไคโตซาน



หน่วย : มิลลิเมตร