



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเครื่องเฟอร์เมนเตอร์สำหรับไส้เดือนฝอย

โดย นาย ญัฐวรธ ชนประดิษฐ์กุล และคณะ

8 สิงหาคม 2546

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเครื่องเฟอร์นิเจอร์สำหรับใส่เดือนฝอย

คณะผู้ทำการวิจัย

1. นาย ัญญวรรธ ชนประดิษฐ์กุล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2. นาย นพพร สระแก้ว ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอพีที ไชยเอนทิฟิค
3. น.ส. กรรติน์ เนรมิตมานสุข ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
4. น.ส. รุ่งอรุณ ขุนณรงค์ บริษัท ยูนิซีดส์ จำกัด

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยโครงการพัฒนาเครื่องเฟอร์นิเจอร์สำหรับใส่เดือนฝอย ขอขอบพระคุณ

1. ร.ศ.ดร. วราวุฒิ คุรุส่ง
2. ร.ศ.ดร. เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ
3. อ.ปราโมทย์ ธรรมรัตน์

งานวิจัยชิ้นนี้มีอาจสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีได้หากปราศจากความอนุเคราะห์ของท่านผู้ทรงคุณวุฒิซึ่งที่ได้กล่าวมานี้

คณะผู้ทำการวิจัย

การพัฒนาถังหมักขนาด 100L สำหรับทดลองเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอย

S. carpocapsae (Weiser)

The Development of a 100 - liter Fermenter Vessel for Study on the Mass Propagation of Entomopathogenic Nematode *S. carpocapsae* (Weiser)

บทคัดย่อ

การทดลองเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอย *S. carpocapsae* (Weiser) ในถังหมักขนาด 100 ลิตร ที่สร้างขึ้นเองภายในประเทศโดยมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้แก่อุณหภูมิ, อัตราการป้อนอากาศ (Air Flow Rate), อัตราเร็วรอบในการกวน พบว่าถังหมักที่สร้างขึ้นสามารถเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยให้เจริญเติบโตจนครบวงจรชีวิตได้ สามารถเก็บผลผลิตได้ 180,000 ตัว/มล. ใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงขยายไส้เดือนฝอย 1 วงจรชีวิต 13 วัน ซึ่งนานการเลี้ยงในถังหมักขนาด 6 ลิตร ประมาณ 1 วัน (ปกติ 9-12 วัน) มีประสิทธิภาพการเข้าทำลายแมลงสูงถึง 65.83%

การทดลองแก้ปัญหาการเกิดฟองล้นภายในถังหมักซึ่งมีผลทำให้ Working Volume ของถังหมักลดลงโดยใช้ใบพัดกวนที่พัฒนาขึ้นเอง โดยใช้ใบพัดกวนทางด้านบนของเครื่องเป็นใบพัดตีฟองแบบ Silicone และใบพัดทางด้านล่างเป็นใบพัดกวนแบบ Up-Pumping Impeller แทนการใช้ใบพัดกวนแบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) เดิมประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีโดยเฉพาะในถังหมักขนาด 6 ลิตร สามารถลดปัญหาการเกิดฟองและสามารถเพิ่มปริมาณการป้อนอากาศ (เพิ่ม Air Flow Rate) ในช่วงที่ไส้เดือนฝอยเจริญเติบโตจนเข้าสู่ระยะผสมพันธุ์-สร้างไข่และออกลูกอ่อน ซึ่งเป็นช่วงที่ไส้เดือนฝอยต้องการปริมาณออกซิเจนสูงได้โดยไม่เกิดฟองล้น

Abstract

A 100-liter fermenter was developed for studying on the mass propagation of Entomopathogenic Nematode *S. carpocapsae* (Weiser). The control parameters were temperature, air flow rate, and stirred speed. The result showed that *S. carpocapsae* could propagate in a 100-liter fermenter in circle life of 13 days, the production yield was 180,000 nematode/ml and the percentage of insect destroying was 65.83%. The used of Silicone impeller and Up-Pumping impeller, instead of a standard impeller showed good results of preventing foam from overflow from the vessel, especially in case of a 6-liter vessel. The installation of new impellers also allowed a vessel to be operated at higher air flow rate, which should increase production yield.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 เหตุผลและความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	11
1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	11
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	13
บทที่ 2 ไล้เดือนฝอยและวิธีการทดลอง	
2.1 ไล้เดือนฝอยและวงจรชีวิต	14
2.2 การศึกษาลักษณะของไบโกลนที่เหมาะสมในถังหมักขนาด 6 ลิตร	16
บทที่ 3 การออกแบบถังหมักขนาด 100L	
3.1 รายละเอียดของเครื่อง Fermenter	28
3.2 ตำแหน่งและอุปกรณ์ของพอร์ต	29
3.3 รายละเอียดของไล้กรองอากาศขาเข้า	30
3.4 ชุดรักษาความดันขณะทำการฆ่าเชื้อ	31
3.5 ชุดส่งกำลังขับเคลื่อนไบโกลน	32
3.6 ขนาดและชนิดของไบโกลนในถังหมักขนาด 100L	33
3.7 ขั้นตอนการใช้งานถังหมักขนาด 100L	36
3.8 รายละเอียดเครื่องทำน้ำเย็น	37
3.9 รายละเอียดเครื่องผลิตไอน้ำ	39
บทที่ 4 การทดสอบการอบนึ่งฆ่าเชื้อเพื่อตรวจสอบรอยเชื่อมในถังหมักขนาด 100 ลิตร	
4.1 การทดลอง Batch ที่ 1	41
4.2 การทดลอง Batch ที่ 2	42
4.3 การทดลอง Batch ที่ 3	42
4.4 การทดลอง Batch ที่ 4	43
4.5 การทดลอง Batch ที่ 5 & 6	44
4.6 การทดลอง Batch ที่ 7	44
4.7 การทดลอง Batch ที่ 8	45
4.8 การทดลอง Batch ที่ 9	46
4.9 การทดลอง Batch ที่ 10	47

บทที่ 5 การทดลองเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยในถังหมักขนาด 100 ลิตร	
5.1 วัสดุอุปกรณ์	48
5.2 วิธีการทดลอง	48
5.3 ผลการทดลอง	51
5.4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	53
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง อุปสรรคปัญหา และข้อเสนอแนะ บรรณานุกรม	56
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การคำนวณทางกลของถังหมักขนาด 100 ลิตร	i
ภาคผนวก ข. แบบร่างของถังหมักขนาด 100 ลิตร	x
ภาคผนวก ค. รูปถังหมักขนาด 100 ลิตร พร้อมอุปกรณ์ประกอบ	xvii
ภาคผนวก ง. บทความสำหรับเผยแพร่	xxiii

บทที่ 1

บทนำ

1.1 เหตุผลและความเป็นมา

1. การศึกษาและพัฒนาการเลี้ยงไส้เดือนฝอย

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศกสิกรรม ปัจจุบันการเกษตรแผนใหม่ได้เปลี่ยนรูปแบบการเพาะปลูกภายในประเทศจากเดิมที่เป็นการเพาะปลูกเพื่อการบริโภคภายในครัวเรือนมาเป็นการเพาะปลูกเพื่อการค้าในระดับอุตสาหกรรมและการส่งออกซึ่งต้องมีการแข่งขันสูงทั้งในด้านของปริมาณและคุณภาพ ส่งผลให้การใช้สารเคมีและยากำจัดศัตรูพืชมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งนอกจากจะมีผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารเคมีทั้งในผลิตภัณฑ์และสิ่งแวดล้อมอันก่อให้เกิดปัญหามลพิษและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ รวมทั้งมนุษย์แล้ว การใช้สารเคมีติดต่อกันเป็นระยะเวลานานยังทำให้แมลงศัตรูพืชเกิดการดื้อยาอีกด้วย การนำสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น เชื้อไวรัส เชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา รวมทั้งไส้เดือนฝอย มาควบคุมแมลงศัตรูพืช โดยวิธีชีววิธี (Biological control) ถือเป็นทางออกที่ดีวิธีหนึ่งในการลดอัตราการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย

บริษัท ยูนิซีดส์ จำกัด (Uniseeds Company Limited) เป็นบริษัทที่ดำเนินธุรกิจด้านผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (Agrobusiness) โดยบริษัทได้ทำการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ออกสู่ตลาดในหลายลักษณะ ได้แก่ เมล็ดพันธุ์พืชชนิดต่างๆ (ข้าวโพด, ถั่วเขียว), ผลิตภัณฑ์ผักเพื่อการส่งออก (กระเจี๊ยบมอญ, ห้วหอม) และสารเคมีที่ใช้เพื่อการเกษตร โดยผลิตภัณฑ์หลักที่สำคัญ ได้แก่ **ไส้เดือนฝอยกำจัดแมลงยูเนมา (*Steinemema carpocapsae*)** ใช้เป็นศัตรูธรรมชาติของแมลงศัตรูพืช สามารถใช้กำจัดหนอนและแมลงได้หลายชนิด เช่น หนอนกินใต้ผิวเปลือกทองกอง ตัวอ่อนด้วงหมัดผักในหัวผักกาด ด้วงงวงมันเทศ หนอนเจาะสมอฝ้าย หนอนกระทู้หอมในดาวเรือง เบญจมาศ หนอนใยผัก หนอนกระทู้ผัก เป็นต้น

ไส้เดือนฝอยจัดเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กชนิดหนึ่ง ลำตัวไม่มีปล้อง ผ่นลำตัวและทางเดินอาหารพัฒนาดี มีชีวิตอยู่ในลักษณะที่เป็น Free-living หรือในลักษณะที่เป็นตัวเบียนอาศัยอยู่ในสัตว์และพืชอื่นๆ ถ้าเข้าไปอยู่ในสัตว์ (animal parasites) มักเรียกว่าเป็นพยาธิ (helminths) สำหรับไส้เดือนฝอยที่เข้าไปอยู่ในแมลง (entomopathogenic nematodes) และมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ควบคุมแมลงศัตรูพืช ซึ่งกำลังเป็นที่สนใจและมีการวิจัยพัฒนาการเลี้ยงขยายไส้เดือนฝอยเป็นระดับการค้าได้แก่ไส้เดือนฝอย *Steinernema carpocapsae* ในวงศ์ *Steinernematidae* ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถกำจัดแมลงศัตรูพืชได้หลายชนิดในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมโดยตัวอ่อนของไส้เดือนฝอยจะเข้าสู่แมลงศัตรูพืชทางช่องเปิดต่างๆ เช่น ปาก รูหายใจ ทวาร คูคกินน้ำ

เลือด (Haemocoel) ของแมลงศัตรูพืช แล้วจับถ่ายแบคทีเรียในลำไส้ออกมา แบคทีเรียนี้จะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและสร้างมลพิษ ทำให้แมลงศัตรูพืชตายภายใน 24-48 ชั่วโมง

- สามารถกำจัดแมลงได้มากกว่า 200 ชนิด
- ไม่มีอันตรายต่อคนและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทุกชนิด รวมทั้งไม่เป็นศัตรูพืช
- ไม่มีกลิ่นเหม็น ไม่มีพิษตกค้างในพืชผล และไม่ก่อให้เกิดมลพิษในสภาพแวดล้อม
- มีความทนทานต่อแรงดันน้ำสูงทำให้สามารถพ่นไส้เดือนฝอยผ่านรูหัวฉีดของเครื่องพ่นสารชนิดต่างๆ ได้ รวมทั้งสามารถทนต่อ สารกำจัดศัตรูพืช (Pesticide) และสารกำจัดวัชพืช (วัชร, 2533)

มีรายงานการนำไส้เดือนฝอยชนิดนี้มาใช้ควบคุมแมลงศัตรูได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในต่างประเทศมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางและผลิตเป็นการค้าในหลายๆประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ออสเตรเลีย สาธารณรัฐประชาชนจีน ฯลฯ

การทดลองของ Kaya (1985) รายงานว่า ไส้เดือนฝอย *Steinernema* (= *Neoplectana*) และ *Heterorhabditis* สามารถป้องกันกำจัดแมลงเจาะทำลายไม้ *Prionoxystus robiniae* (Peck) ซึ่งทำลายต้นโอ๊กได้ผล นอกจากนี้ Kaya และคณะ(1993) ยังพบว่าพฤติกรรมของไส้เดือนฝอยมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมลง โดยไส้เดือนฝอย *S. carpocapsae* ส่วนใหญ่จะอยู่นิ่งๆใกล้ผิวดินเพื่อรอแมลงมา ขณะที่ไส้เดือนฝอย *H. bacteriophora* จะเคลื่อนที่ค้นหาแมลงอาศัย.

Klein (1990) พบว่า การใช้ไส้เดือนฝอย *H. bacteriophora* สามารถควบคุมหนอนดั่งที่เป็นศัตรูสนามหญ้า *Popillia japonica* ได้นานกว่า 1 ปี และตามรายงานของ Georgis และคณะ (1991) ซึ่งศึกษาความคงทนของไส้เดือนฝอยในสภาพแวดล้อมพบว่า ไส้เดือนฝอยสามารถทำให้หนอนดั่งศัตรูสนามหญ้าตาย 84-98% และหลังจากนั้น 4 สัปดาห์ หนอนจะตายเพียง 17-21% และไส้เดือนฝอยสามารถเจริญเติบโตจนครบวงจรชีวิตได้ หากในดินมีปริมาณหนอนพอเพียงที่จะเป็นแหล่งอาหาร

สำหรับงานวิจัยในประเทศไทยได้มีการดำเนินการพัฒนานำไส้เดือนฝอยมาทดลองกำจัดแมลงศัตรูพืชในธรรมชาติ พบว่ามีประสิทธิภาพในการเข้าทำลายแมลงศัตรูพืชที่สำคัญได้หลายชนิด เช่น หนอนกระทู้หอม หนอนกระทู้ผัก หนอนคืบกะหล่ำ หนอนใยผัก หนอนเจาะยอดผัก หนอนเจาะสมอฝ้าย หนอนคืบลำไย Tobacco bud worm หนอนกินรังผึ้ง หนอนกินใต้ผิวเปลือก หนอนกอสี่ขมู หนอนกอล้วย หนอนห่อใบข้าว ดั่งงวงม้นเทศ ปลวก ฯลฯ (วัชร และ คณะ 2534)

วัชร และคณะ(2534) ได้เริ่มดำเนินการวิจัยทดลองเพาะเลี้ยงไส้เดือนฝอย *Steinemema carpocapsae* เพื่อขยายปริมาณด้วยหนอนเจาะสมอฝ้าย (*Heliothis armigera*) และได้นำไปทดสอบประสิทธิภาพในธรรมชาติ โดยใช้ทดลองควบคุมหนอนกินผิวใต้เปลือกลองกอง ลางสาด (*Cossus sp.* และ

Microchlora sp.) ในสภาพที่มีความชื้นพอเหมาะ (60-80%) พบว่าไส้เดือนฝอย *S.carpocapsae* อัตรา 2 ล้านตัวในน้ำ 1 ลิตร โดยพ่น 3-5 ลิตรต่อต้น สามารถฆ่าหนอนได้ 80%.

วัชรวิ และคณะ(2537) ได้ทดลองใช้ไส้เดือนฝอยควบคุมหนอนกระทู้หอม (หนอนหนังเหนียว) ในดาวเรืองซึ่งเป็นพืชตัดดอก และหนอนชนิดนี้มีความทนทานต่อยาฆ่าแมลง โดยการทดสอบพบว่า การพ่นไส้เดือนฝอยในอัตรา 2,000 ตัว/มล. หรือไส้เดือนฝอย 40 ล้านตัว/น้ำ 1 ปี๊บ โดยใช้เครื่องพ่นยา โยกสะพายหลังพ่นบนยอดดาวเรืองหลังเพาะเมล็ดดาวเรือง 15 วัน ในตอนเย็นหลังการรดน้ำในแปลง และปรับสภาพหัวพ่นให้ละเอียด ช่วงแรกๆที่มีปริมาณหนอนระบาดมากให้พ่นทุก 5 วัน หลังจากนั้น อาจพ่นทุก 7-10 วัน สามารถลดปริมาณหนอนได้ถึง 80% นอกจากนี้ยังให้ประโยชน์ถึงสองทาง คือ สามารถลดการใช้สารเคมี และมด แมลงปอซึ่งเป็นตัวห้ำสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และเข้าทำลายแมลง ศัตรูพืชได้อีกทางหนึ่งด้วย

วิโรจน์ และคณะ(2538) ได้ทำการศึกษาการทำให้เกิดโรคของไส้เดือนฝอย *Steinernema carpocapsae* กับปลวกงาน *Odonotermes feae* ในสภาพห้องปฏิบัติการพบว่า เปอร์เซ็นต์ของไส้เดือนฝอยเข้าสู่ปลวกงานสูงที่สุดที่ความชื้นของดิน 15% และอุณหภูมิ 25°C โดยไส้เดือนฝอยสามารถเจริญเติบโตภายในปลวกงานจนครบวงจรชีวิตใช้เวลา 12 วัน และการพ่นไส้เดือนฝอยที่อัตราความหนาแน่น 10,000-1,000,000 ตัว ลงบนดินในกล่องพลาสติกขนาด 30x12x20 ซม. จะทำให้ปลวกงานตายภายใน 24 ชั่วโมง และไส้เดือนฝอยสามารถทำให้เกิดโรคกับปลวกงานได้นาน 7 สัปดาห์

จากความสำเร็จของงานวิจัยที่ได้กล่าวมา จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาการเลี้ยงไส้เดือนฝอยศัตรูแมลงธรรมชาติให้ได้ปริมาณมากในระดับการค้า ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วไส้เดือนฝอย *Steinernema carpocapsae* จะเจริญเติบโตภายในแมลงอาศัยเท่านั้น แต่ในปัจจุบันสามารถพัฒนาระบบการเลี้ยงแบบใหม่โดยการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในอาหารเทียมบนฟองน้ำ(อาหารแข็งกึ่งเหลว) หรืออาหารเหลว

ในการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในอาหารเทียม ทำได้โดยแยกเอาแบคทีเรีย *Xenorhabdus nematophilus* (Poinar and Thomas, 1966) ที่ติดอยู่ที่ลำไส้ของไส้เดือนฝอยและต้องอาศัยการเจริญเติบโตแบบซึ่งกันและกันออก แล้วนำมาเลี้ยงขยายปริมาณเพื่อนำไปผสมในอาหารเทียมเลี้ยงไส้เดือนฝอย (วัชรวิ และพิมลพร, 2535) โดยการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในอาหารเทียมบนฟองน้ำ(อาหารแข็งกึ่งเหลว) มีวิธีการดังนี้

1. เตรียมอาหาร ซึ่งสูตรอาหารที่ใช้จะแตกต่างกันไปตามเทคนิคของผู้ผลิต
2. นำอาหารมาขยำนขึ้นฟองน้ำสังเคราะห์ที่ตัดเป็นชิ้นขนาดลูกเต๋าแล้วนำมาใส่ถุง ปิดปากถุงให้สนิทจากนั้นนำไปอบฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นเวลา 20 นาที
3. หลังอบหนึ่งและทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว นำ stock แบคทีเรียที่เตรียมไว้มาหยดให้ทั่ว

4. นำเข้าเก็บที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 1 วันก่อนนำใส่เดือนฝอยลงเลี้ยงในถุง จากนั้นก็รอเก็บผลผลิตซึ่งกระบวนการนี้จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 21 วัน

วิธีการนี้จะให้ผลผลิตใส่เดือนฝอยประมาณ 8-10 ล้านตัว/ 1 ถุงการผลิต มีต้นทุนการผลิตประมาณ 20 บาท/ใส่เดือนฝอย 4 ล้านตัว(1ถุงจำหน่าย) และถึงแม้วิธีการนี้จะให้ผลผลิตดีและมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการเลี้ยงใส่เดือนฝอยจากแมลงอาศัย ซึ่งมีต้นทุนการผลิตประมาณ 36 บาท/ใส่เดือนฝอย 4 ล้านตัว(1ถุงจำหน่าย) แต่มีข้อเสียที่ใช้ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวใส่เดือนฝอยนานทำให้มีข้อจำกัดในการผลิตเป็นปริมาณมากเมื่อเทียบเป็นปริมาณผลผลิตต่อเดือน

การเลี้ยงเพิ่มปริมาณใส่เดือนฝอยในอาหารเทียมแบบอาหารเหลว มีวิธีการดังต่อไปนี้

1. เตรียมอาหารที่ได้รับการพัฒนาสูตรและทดลองมาเรียบร้อยแล้วว่าใส่เดือนฝอยจะมีอัตราการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและให้ผลผลิตสูง
2. นำอาหารมาใส่ใน Flask ปิดจุกสำลีแล้วหุ้มด้วยกระดาษอลูมิเนียม แล้วนำไปอบฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นเวลา 20 นาที
3. หลังอบหนึ่งทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว นำ stock แบคทีเรียที่เตรียมไว้มาหยดลงในขวดเขย่าให้ทั่วแล้วนำไปวางไว้บนเครื่อง Shaker
4. ต้องควบคุมอุณหภูมิในห้อง Shaker ไว้ที่ 25°C ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วันก่อนนำใส่เดือนฝอยลงเลี้ยงใน Flask จากนั้นก็รอเก็บผลผลิตซึ่งกระบวนการนี้จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 9-10 วัน

วิธีการนี้จะให้ผลผลิตใส่เดือนฝอยประมาณ 3 แสนตัว/1 มล. และมีต้นทุนการผลิตเพียง 7-8 บาท/ใส่เดือนฝอย 4 ล้านตัว(1ถุงจำหน่าย) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลี้ยงบนอาหารแข็งกึ่งเหลว วิธีการนี้จะให้ผลผลิตดีกว่าและมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า ปัจจุบันวิธีการยังนี้เป็นที่นิยมนำมาใช้เพื่อเลี้ยงเพิ่มปริมาณใส่เดือนฝอย แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อจำกัดทางด้านพื้นที่เพราะต้องใช้ Flask เป็นจำนวนมาก ใช้แรงงานมาก มีความยุ่งยากในการควบคุมคุณภาพการผลิตในแต่ละ Batch นอกจากนี้ยังไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตให้ทันกับความต้องการของตลาดในช่วงที่มีหนอนหรือแมลงศัตรูพืชระบาดหนัก

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันแล้วว่า การเลี้ยงเพิ่มปริมาณใส่เดือนฝอยจะให้ผลผลิตดีที่สุดและไม่มีปัญหาเรื่องการควบคุมคุณภาพสามารถทำได้โดยการเลี้ยงแบบใช้อาหารเหลวในถังหมัก (Fermenter) ซึ่งเหมาะในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม กลุ่มงานวิจัยการปราบศัตรูพืชทางชีวภาพ กองกัญและสัตววิทยา กรมวิชาการเกษตร โดยอาจารย์วัชรวิ สมสุข และคณะได้ทำการทดลองเลี้ยงเพิ่มปริมาณใส่เดือนฝอยโดยใช้อาหารเหลวในถังหมักขนาด 6 ลิตร พบว่าให้ผลผลิตเป็นที่น่าพอใจและมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการเลี้ยงใน Flask โดยวิธีการเลี้ยงเพิ่มปริมาณใส่เดือนฝอยโดยใช้อาหารเหลวในถังหมักขนาด 6 ลิตร มีวิธีการดังต่อไปนี้

1. เตรียมอาหารเหลวที่ได้รับการพัฒนาสูตรและทดลองมาเรียบร้อยแล้วใส่ในถังหมัก
2. นำไปอบฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นเวลา 30 นาที
3. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่า pH และ DO (Dissolved Oxygen) โดยการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในถังหมักนั้น จะไม่มีการควบคุมค่า pH และ DO แต่จะทำการตรวจวัดค่าเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH และ DO ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและวิจัยถึงปัจจัยที่อาจมีผลต่อการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในระดับต่อไป
4. นำ stock แบคทีเรียที่เตรียมไว้มาใส่ลงในถังหมักโดยผ่าน Peristaltic Pump ติดตั้งเครื่องหล่อเย็นควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 28°C
5. กวนของผสมด้วยอัตรา 350 rpm และควบคุมให้อากาศไหลเวียนตลอดเวลาโดยจะป้อนอากาศเข้าทางท่อของ Gas Mixture
6. เมื่อทดลองตรวจนับแบคทีเรียในถังหมักได้ปริมาณตามที่ต้องการ นำไส้เดือนฝอยมาใส่ลงในถังหมักโดยผ่าน Peristaltic Pump และปรับลดอุณหภูมิไว้ที่ 25°C
7. รอเก็บผลผลิตซึ่งกระบวนการนี้จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 7-10 วัน

การเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในการผลิตระดับอุตสาหกรรมโดยใช้ถังหมัก โดยอาจารย์ วชิร สมสุข และกลุ่มงานวิจัยการปราบศัตรูพืชทางชีวภาพ กองกัญและสัตววิทยา กรมวิชาการเกษตรนั้น การเกิดฟองล้นถือเป็นปัญหาสำคัญในการเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยในถังหมักเพราะทำให้ Working Volume ของถังหมักลดลงไม่สามารถใช้ถังหมักให้เต็มประสิทธิภาพได้ และเนื่องจากไส้เดือนฝอยเป็นจุลินทรีย์ที่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารเคมีได้ไวมาก ดังนั้นการควบคุมฟองในถังหมักโดยใช้สารกำจัดฟอง (Antifoam) จึงก่อผลกระทบต่อไส้เดือนฝอยระยะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะโตเต็มวัยจากผลการทดลองใช้สารกำจัดฟองกว่า 5 ชนิด พบว่า ไส้เดือนฝอยชะงักการเจริญเติบโตและไม่สร้างไข่ถึงแม้ว่าจะใช้สารนั้นๆตามอัตราแนะนำต่ำสุดแล้วก็ตาม ดังนั้นการลดฟองในถังหมักเพื่อลดการสูญเสียอาหารและผลผลิตจึงควรทดลองใช้วิธีทางกลเช่น การออกแบบและเลือกใช้ใบพัดกวนให้มีลักษณะที่เหมาะสม โดยใบพัดกวนดังกล่าวต้องมีคุณสมบัติเด่นคือ สามารถกวนอาหารให้เข้ากันได้ดี ละลายออกซิเจนให้เข้ากับอาหารได้สูง เพื่อลดปริมาณการให้อากาศกับถังหมักที่ความเร็วในการกวนไม่เกิน 400 รอบ/นาที จึงจะสามารถลดฟองในถังหมักลงได้

2. การพัฒนาถังหมักในระดับอุตสาหกรรม

การจะสร้างหรือออกแบบถังหมักเพื่อใช้ในการหมักผลิตภัณฑ์ใดๆนั้น งานวิจัยหลายชิ้น (J.Y. Oldshue et al, 1978; J.Y. Oldshue et al, 1983; M. Schutte et al, 1992; P. Kaufman et al, 1997; T.A. Post, 1998; R.Carranza, 2000) แสดงให้เห็นว่าการหมักผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันตัวถังหมักจะมีลักษณะ

ทางกล (Mechanical Design) และปัจจัยเหมาะสม (Optimal Parameters) ที่เป็นตัวควบคุมกระบวนการหมักให้ได้ผลผลิตสูงสุด (Maximum Yield) แตกต่างกันไปซึ่งโดยทั่วไปได้แก่ อัตราการถ่ายโอนของมวลและความร้อน (Mass and Heat Transfer) อัตราการถ่ายโอนของออกซิเจน (Oxygen Transfer Rate) การละลายกลับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในถังหมัก (Carbon Dioxide Resorption) การกระจายตัวของชีวมลิวในของเหลว (Solids Suspension) และแรงเฉือนของของเหลว (Fluid Shear Rate) โดยปัจจัยที่กล่าวมาจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลในถังหมัก (Flow Patterns) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามชนิดของใบกวน (Impeller Type) ขนาดของใบกวน (Impeller Size) ความเร็วรอบของการกวน (RPM) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (D/T) จำนวนและระยะการติดตั้งใบกวน อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (Z/T)

อัตราการถ่ายโอนของมวลและความร้อน (Mass and Heat Transfer)

อัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างสาร (Mass Transfer Rate) ในถังหมักจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเจริญเติบโต (ปฏิกิริยา) ของสารชีวมลิวเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงสุด (Maximum Yield) อย่างไรก็ตามค่า maximum yield จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ (Variable) อื่นๆของถังหมักด้วย J.Y. Oldshue พบว่าถังหมักที่ดูภายนอกคล้ายกันจะมีรายละเอียดขององค์ประกอบที่แตกต่างกันเสมอ ถังหมักที่มีอัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างสารเท่ากันจะให้ปริมาณผลผลิตต่างกันถ้าองค์ประกอบอื่นๆของถังหมักแตกต่างกันออกไป (J.Y. Oldshue et al, 1978)

อัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer) เกิดจากปฏิกิริยาการเจริญเติบโต (Cell Metabolism) ที่เกิดขึ้นในถังและแรงเฉือนของของเหลว (Fluid Shear Rate) กับใบกวนเมื่อกระบวนการหมักผ่านไประยะหนึ่งความหนืดของของเหลวจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงเฉือนของของเหลวในถังหมักมีค่าเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน (M. Schutte et al, 1992; P. Kaufman et al, 1997) ดังนั้นถังหมักที่ดีจะต้องมีระบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และมีความเหมาะสมอยู่เสมอได้

อัตราการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนสู่ของเหลว (Gas-Liquid Oxygen Transfer)

อัตราการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนสู่ของเหลว (Gas-Liquid Oxygen Transfer) มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของชีวมลิว (Micro-organisms) โดยทำให้ค่า Maximum yield เปลี่ยนแปลงไปแล้วส่งผลกระทบต่อ Ultimate total yield ที่ได้ในแต่ละ batch โดยทั่วไปถังหมักจะต้องมีอัตราการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนสู่ของเหลวสูงกว่าอัตราการใช้ออกซิเจนของชีวมลิว (Oxygen Uptake Rate) อยู่เสมอ (J.Y. Oldshue et al, 1978; J.Y. Oldshue et al, 1983; M. Schutte et al, 1992)

อัตราการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนสู่ของเหลวสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการควบคุมรูปแบบการไหล (Flow Pattern) ปรับความเร็วรอบของใบกวน และอัตราส่วนกำลังของใบกวนต่ออัตรา

การป้อนออกซิเจน (Mixer H.P.: Gas Rate) (J.Y. Oldshue et al, 1978; M. Schutte et al, 1992) ถ้าอัตราส่วน Mixer H.P.: Gas Rate มีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนสู่ของเหลวจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (D/T) จะมีช่วงกว้างขึ้นซึ่งทำให้ง่ายต่อการการออกแบบ อย่างไรก็ตามแรงเฉือนของของเหลวในถังหมักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของใบกวนด้วยซึ่งหากชีวโมเลกุลที่ทำการหมักเป็นชนิดที่มีความอ่อนไหวต่อแรงเฉือนก็จะทำให้ปริมาณผลผลิตต่อ Batch ลดลง (J.Y. Oldshue et al, 1978)

เพื่อควบคุมรูปแบบการไหลวนในถังหมักให้ได้ผลผลิตสูงสุด การพัฒนาเริ่มจากการทดลองใช้อากาศผ่านเข้าไปในถังเพียงอย่างเดียว (Air Agitation) โดยยังไม่มี baffles ใบกวน หรือองค์ประกอบอื่นร่วมด้วย การเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนสามารถทำได้โดยการพ่นอากาศผ่านเข้าทางด้านล่างของถัง (Sparging Air) หรือใช้ ท่อชักนำการไหล (Draft Tube) (J.Y. Oldshue et al, 1983) รายงานของ Robinson และ Moo-Young แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราการป้อนอากาศเท่ากัน ระบบที่ใช้ใบกวนร่วมด้วยจะให้อัตราการถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Rate) ดีกว่าระบบที่ป้อนอากาศเพียงอย่างเดียว การควบคุมการไหลวนโดยการป้อนอากาศเพียงอย่างเดียวสามารถทำได้หากกระบวนการหมักไม่ต้องการออกซิเจนมากนัก (low Uptake Rate) นอกจากนั้นการป้อนอากาศเพียงอย่างเดียวยังไม่มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการผสม (Blending) การกระจายตัวของชีวโมเลกุลในของเหลว (Solids Suspension) และการถ่ายโอนของความร้อน (Heat Transfer) ดังนั้นการใช้ใบกวนในระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง (Robinson และ Moo-Young, 1982)

แรงเฉือนของของเหลว (Fluid Shear Rate)

เมื่อกระบวนการหมักผ่านไประยะหนึ่งความหนืดของของเหลว (Relative Viscosity) จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงเฉือนของของเหลว (Fluid Shear Rate) ในถังหมักมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนสู่ของเหลวจะลดลง และหากชีวโมเลกุลที่ทำการหมักเป็นชนิดที่มีความอ่อนไหวต่อแรงเฉือนก็จะทำให้ปริมาณผลผลิตต่อ Batch ลดลง Oldshue et al ทดลองแก้ไขโดยการปรับค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (D/T) เพื่อให้แรงเฉือนลดลงผลปรากฏว่าสามารถเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้นและมีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยน้ำหนักของผลผลิตต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเปลี่ยน D/T ในถังหมักที่ทำการทดลองไม่เป็น function หรือมีอัตราส่วนที่มีความสัมพันธ์เมื่อปริมาตรถังหมักเพิ่มขึ้น (Scale Up) (การเพิ่มปริมาตรถังหมักจะทำให้อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (Z/T) ที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงไป ปัจจุบันจะออกแบบอยู่ในช่วง 2:1 – 4:1 ถ้าเป็น air lift fermenter อัตราส่วนอาจสูงได้ถึง 10:1 (P. Kaufman et al, 1997; T.A. Post, 1998)) ดังนั้นในการออกแบบถังหมักที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นจะต้องมีความระมัดระวังต่ออัตราส่วนของ Variable ต่างๆอยู่เสมอ (J.Y. Oldshue et al, 1978)

ในปี 1983, J.Y. Oldshue et al, แสดงให้เห็นเพิ่มเติมอีกว่า ขนาดของใบกวนจะต้องใหญ่พอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานในถังและสามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลที่ดีเมื่อความหนืดของของเหลวเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วรอบของใบกวนควรจะสามารถปรับเปลี่ยนได้ (เป็นแบบ two-speed motor) โดยที่เวลาเริ่มต้นของกระบวนการหมักจะใช้ความเร็วรอบต่ำ แล้วเพิ่มความเร็วรอบขึ้นเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ระบบนี้จะให้ปริมาณผลผลิต (Maximum Yield) สูงกว่าระบบที่ใช้ความเร็วรอบของใบกวนคงที่ตลอดกระบวนการหมัก (J.Y. Oldshue et al, 1983)

การกวนและเทคโนโลยีในการออกแบบใบกวน (Mixing Process and Impeller Technology)

นอกเหนือจากการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบและเพิ่มกำลังของใบกวนแล้ว การเพิ่มจำนวนใบกวน (Impellers Number) จำนวนของใบพัด (Blades Number) ขนาดของใบกวน (Impeller Size) และระยะการติดตั้งใบกวน (Spacing of Impellers) ก็มีส่วนช่วยในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลได้ (M. Schutte et al, 1992; P. Kaufman et al, 1997; T.A. Post, 1998; R.Carranza, 2000)

โดยทั่วไปใบกวนแบ่งได้เป็นสองชนิด คือ

1.) ใบกวนให้ของไหลไหลในแนวแกน (Axial-Flow Impeller) จะเป็นแบบให้กระแสของของเหลวไหลในแนวนานกับแกนของใบกวน ใบกวนชนิดนี้ที่ใช้กันมากได้แก่

- Propeller ความเร็วรอบจะสูง เหมาะกับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ กระแสการไหลจะเป็นคอลัมน์หมุนวนปั่นป่วน (Turbulent Swirling Column) หรือหมุนเป็นเกลียว(Helix) ออกจากใบพัด

2.) ใบกวนให้ของไหลไหลในแนวรัศมี (Radial-Flow Impeller) เป็นใบกวนแบบที่ก่อให้เกิดกระแสในแนวสัมผัส (Tangential) และแนวรัศมี(Radial) ใบกวนชนิดนี้ได้แก่

- Paddle ลักษณะประกอบด้วยใบพัดเป็นแผ่นแบนวางในแนวตั้ง หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำของเหลวจะเคลื่อนในแนวรัศมีและแนวสัมผัสเท่านั้น ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งยกเว้นจะออกแบบใบกวนให้มีลักษณะเอียง

- Turbine มีลักษณะคล้ายกับ Paddle แต่มีจำนวนใบมากกว่า มีขนาดสั้นกว่า หมุนด้วยความเร็วสูง ให้กระแสของของเหลวจะไหลในแนวรัศมีและแนวสัมผัส ใช้ได้ดีกับของเหลวที่มีความหนืดช่วงกว้างๆ

ในช่วงเริ่มต้นของการศึกษาออกแบบการผสม (Mixing) ในถังหมักนักวิจัยพบว่า ความเร็วแบบรัศมีและตามแนวแกนจะมีประโยชน์มากและจำเป็นในการผสมทำให้ของเหลวผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ใบกวนที่นิยมใช้กันมากจึงเป็นแบบที่ให้ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial Flow Flat Blade Impeller) เนื่องจากให้อัตราการถ่ายโอนมวลและการกระจายตัวของออกซิเจนสูง (M. Schutte et al, 1992; P. Kaufman et al, 1997; T.A. Post, 1998) ส่วนความเร็วในแนวสัมผัสไม่ค่อยมีประโยชน์และ

จะชักนำให้เกิดปรากฏการณ์การไหลวนที่ผิวของของเหลว (Vortex) ซึ่งหากมีอนุภาคของแข็ง หรือ อนุภาคนาโนขนาดเล็ก และถึงมีขนาดใหญ่ อนุภาคจะถูกเหวี่ยงออกไปโดยแรงหมุนเหวี่ยง (Centrifugal) และตกอยู่ได้ขอบถังในบริเวณที่ของเหลวไหลวนไปไม่ถึง (Death Zone) ก่อให้เกิดการรวมกัน (Coagulation) แทนที่จะเสริมการผสม ซึ่งปรากฏการณ์การหมุนวนสามารถป้องกันได้โดยการติดตั้ง baffles หรือ ท่อชักนำการไหล (Draft Tube) ซึ่งมีข้อดีคือทำให้แรงเฉือนของของเหลวในถังหมักมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (W.L. McCabe, 1993)

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างใบกวนที่ให้ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial Flow) และใบกวนที่ให้ความเร็วตามแนวแกน (Axial Flow) พบว่าใบกวนที่ให้ความเร็วตามแนวรัศมีจะมีค่าแรงเฉือนของของเหลวสูงสุด (Maximum Shear Rate) สูงขึ้นตามปริมาตรของถังหมักที่เพิ่มขึ้น (Scale Up) แต่แรงเฉือนของของเหลวในถังที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นจะลดลงถ้าใช้ใบกวนที่ให้ความเร็วตามแนวแกน ดังนั้นสำหรับชีวโมเลกุลที่มีความอ่อนไหวต่อแรงเฉือนถังหมักที่ใช้ใบกวนตามแนวแกนจะให้ผลผลิตที่ดีกว่า (P. Kaufman et al, 1997) นอกจากนี้ในถังขนาดใหญ่ที่ติดตั้งใบกวนมากกว่าหนึ่งใบ การเลือกใช้ใบกวนทั้งทางด้านบน (Upper Impeller) และทางด้านล่าง (Bottom Impeller) เป็นใบกวนตามแนวรัศมี (Radial Flow Flat Blade Impeller) ยังมีข้อด้อยเนื่องจากใบกวนทางด้านล่างมีหน้าที่ลดขนาดของฟองอากาศ (Air Bubbles) ที่ป้อนเข้ามาทางด้านล่างของถังเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสแล้วการกระจายอากาศออก ในขณะที่ใบกวนทางด้านบนจะไม่สามารถลดขนาดของฟองอากาศได้อีกแต่จะทำหน้าที่ควบคุมการไหลวนภายในถังให้มีการผสม (Blending) ได้ดียิ่งขึ้นซึ่งไม่เหมาะกับการเลือกใช้ใบกวนตามแนวรัศมีเนื่องจากจะทำให้ของเหลวเกิดการไหลวนเป็นชั้น อัตราการผสมและการกระจายตัวของออกซิเจนต่ำลง ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักแต่ละ batch จะนานขึ้น (M. Schutte et al, 1992; P. Kaufman et al, 1997; T.A. Post, 1998)

การแก้ไขสามารถทำได้โดยการใช้ใบกวนทางด้านบนเป็นแบบที่ให้ความเร็วตามแนวแกนประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Axial Flow Impeller) ใบกวนชนิดนี้จะผลักของเหลวให้ไหลวนลงด้านล่างทำให้การผสมมีประสิทธิภาพดีขึ้น อัตราการเกิดผลผลิตสูงขึ้น หรืออาจเลือกใช้ Hydrofoil Impeller ซึ่งถูกออกแบบให้มีมุมการวางของใบพัดและมีขนาดของใบต่อพื้นที่กวาดใบสูง ใบกวนชนิดนี้นอกจากจะทำให้การผสมมีประสิทธิภาพดีขึ้นแล้วยังมีอัตราการกระจายออกซิเจนสูงกว่า High Efficiency Axial Flow Impeller (P. Kaufman et al, 1997; T.A. Post, 1998) อย่างไรก็ตามการจะเลือกใช้ใบกวนจะต้องมีความระมัดระวังและขึ้นอยู่กับชีวโมเลกุลที่ทำการหมักรวมทั้งองค์ประกอบอื่น ๆ อีกด้วย การเลือกใช้ใบกวนที่แตกต่างกันและมีองค์ประกอบอื่น ๆ แตกต่างกัน อาจจะทำให้ปริมาณผลผลิตที่ใกล้เคียงกันก็ได้ (M. Schutte et al, 1992; P. Kaufman et al, 1997)

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการจะสร้างหรือออกแบบถังหมักเพื่อใช้ในการหมักผลิตภัณฑ์ใด ๆ นั้น ลักษณะทางกลของถังหมักและปัจจัยเหมาะสมที่เป็นตัวควบคุมกระบวนการหมักให้ได้

ผลผลิตสูงสุด (Maximum Yield) จะมีความแตกต่างกันออกไป การเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในระดับอุตสาหกรรมโดยใช้ถังหมัก (Fermentor) นั้น ตัวถังหมักยังต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพงและถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับการหมักโดยทั่วไป มิได้มีความเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงผลิตภัณฑ์ใดๆ โดยเฉพาะ ถังหมักขนาด 6 ลิตร มีราคาสูงถึง 4 ล้านบาท อีกทั้งถังหมักที่นำเข้าจากต่างประเทศมักมีอุปกรณ์เกินกว่าความจำเป็นในการนำมาใช้เลี้ยงไส้เดือนฝอย (pH and DO controller) นอกจากนี้ยังไม่สามารถจัดปัญหาการเกิดฟองที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีนในกระบวนการผลิตซึ่งทำให้ Working volume ของถังหมักลดลง ไม่สามารถใช้ถังหมักให้เต็มประสิทธิภาพได้

หากประเทศไทยมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาจนสามารถออกแบบและผลิตถังหมักให้มีราคาถูก มีความเหมาะสมในการเพาะเลี้ยงไส้เดือนฝอย ตลอดจนสามารถแก้ไขปัญหาการเกิดฟองในกระบวนการผลิตทำให้สามารถใช้ถังหมักให้เต็มประสิทธิภาพได้ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา ออกแบบและสร้างถังหมักขนาด 100 ลิตรสำหรับใช้ในการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอย *Steinernema carpocapsae* ในระดับอุตสาหกรรมโดยใช้อาหารเหลว โดยถังหมักจะถูกออกแบบและพัฒนาให้มีความเหมาะสมในการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอย และแก้ไขปัญหาการเกิดฟองในกระบวนการผลิตดังนี้

1. ระบบการฆ่าเชื้อ (Sterilization) ในถังหมักขนาด 100 ลิตรจะใช้ Steam Generator แบบ In-situ แทนการอบฆ่าเชื้อที่ใช้กันอยู่เดิมในถังหมักขนาด 6 ลิตร ซึ่งการใช้ Steam Generator จะมีความสะดวกและรวดเร็วกว่าเพราะจะไม่มีการเคลื่อนย้ายถังหมัก นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องถอดและประกอบอุปกรณ์ทุกครั้งเมื่อต้องการทำความสะอาดถังหมัก
2. ลักษณะทางกล (Mechanical Design) และระบบการกวน (Agitation) ภายในถังจะถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อการกระจายตัวของออกซิเจนและอัตราการถ่ายโอนของมวล เพื่อควบคุมกระบวนการหมักให้ได้ผลผลิตต่อ Batch สูงสุด (Maximum Yield)
3. ทดลองขจัดปัญหาการเกิดฟองที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีนในกระบวนการผลิตโดยใช้เทคนิค Up-Pumping หรือออกแบบถังหมักให้มีใบกวนทางด้านบนสุดของถัง ทำให้ค่า Working volume ของถังหมักมีปริมาณเพิ่มขึ้นสามารถใช้ถังหมักให้เต็มประสิทธิภาพได้
4. มีระบบการควบคุมความเร็วของใบกวน (Motor Speed Controller) เพื่อควบคุมให้ความเร็วรอบสัมพันธ์กับความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาการหมัก และสัมพันธ์กับระดับของเหลวในถัง
5. ถังหมักด้านนอกมีลักษณะเป็น jacket มีน้ำหล่อเย็น (Refrigeration System) และระบบการควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control System) สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิภายใน

ถึงหมักให้มีความเหมาะสมทั้งในระหว่างการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย และการเพาะเลี้ยงไส้เดือนฝอยได้

6. มี computer software เชื่อมต่อกับ pH และ DO indicator ทำการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า pH และ DO เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงปัจจัยที่อาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของไส้เดือนฝอยในระดับต่อไป
7. หากโครงการนี้ประสบผลสำเร็จ ในอนาคตอาจมีการพัฒนาสร้างถังปั่นแยกและชั้นถาดกรอง สำหรับกระบวนการล้างและกรองเพื่อเก็บผลผลิตไส้เดือนฝอยซึ่งทำให้กระบวนการล้างและกรองมีความสะดวก ลดระยะเวลาในการล้างกรองสามารถรองรับปริมาณการผลิตให้ทันกับความต้องการของตลาดได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อการพัฒนา และออกแบบสร้างถังหมัก (Fermenter) ขนาดบรรจุ 100 ลิตร สำหรับการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอย *Steinemema carpocapsae* ในระดับอุตสาหกรรมโดยใช้อาหารเหลว
2. เพื่อศึกษาและแก้ไขปัญหาการเกิดฟองในกระบวนการผลิตทำให้สามารถใช้ถังหมักได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ
3. เพื่อทดแทนการนำเข้าถังหมักจากต่างประเทศ ทั้งยังเป็นการสนับสนุนผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรม

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

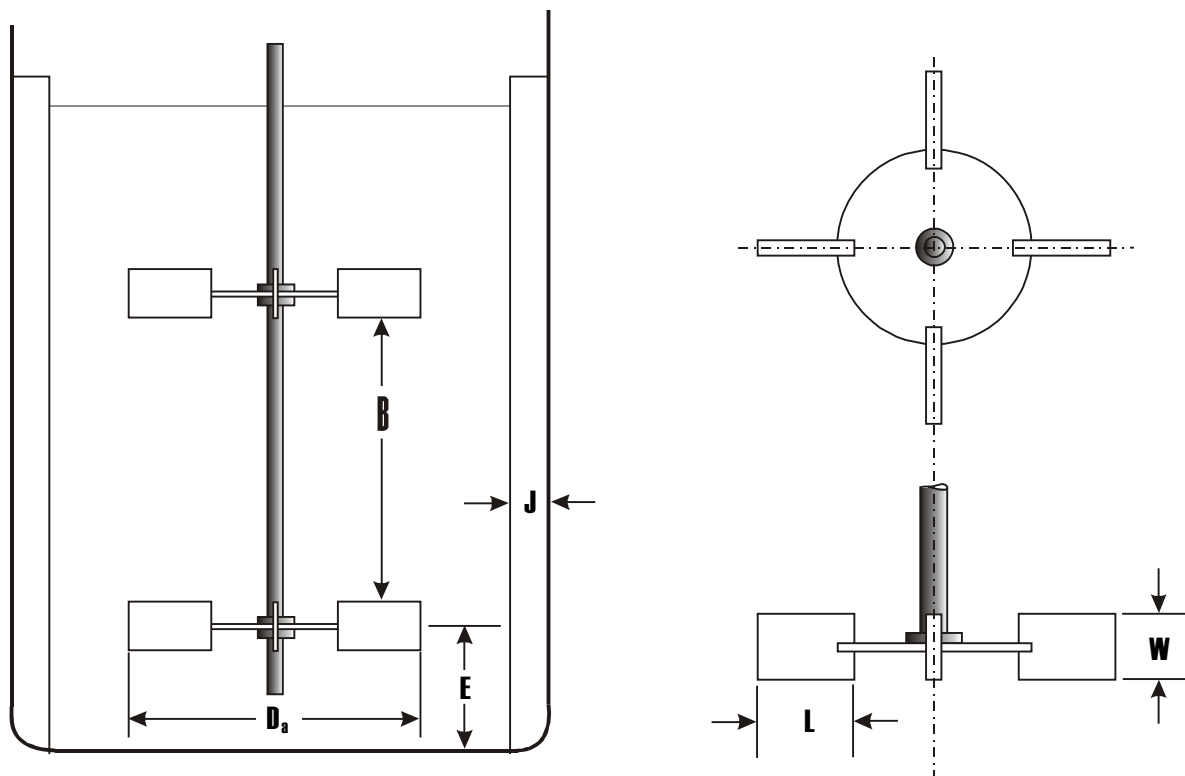
1. สืบค้นและศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ หนังสือ และสิ่งตีพิมพ์ทางวิชาการทั้งในและต่างประเทศ
2. ศึกษากระบวนการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยโดยใช้อาหารเหลวในถังหมักขนาด 6 ลิตรอย่างละเอียด ทั้งการเตรียมอาหาร การเตรียมเชื้อแบคทีเรีย และการเตรียมไส้เดือนฝอยเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการเลี้ยงในถังหมักขนาด 100 ลิตร
3. ออกแบบและสร้างถังหมัก ขนาด 100 ลิตร โดยมีปัจจัยที่ต้องทำการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 ชนิดของใบกวน (Impellers)

- Radial Flow Flat Blade Impeller
- High Efficiency Axial Flow Impeller

- Hydrofoil Impeller

3.2 ระยะการติดตั้งของใบกวน



3.3 เทคนิคการจัดปัญหาการเกิดฟองที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีนในกระบวนการผลิต

- 1) ออกแบบและใช้เทคนิคการติดตั้ง Hydrofoil Impeller ในลักษณะผลักของเหลวให้มีการไหลวนขึ้นทางด้านบนของถัง (Up-Pumping) วิธีการนี้จะป้องกันปรากฏการณ์รวมตัวกันของฟองขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coalescence) (P. Kaufman et al, 1997; P. Kaufman et al, 1998)
- 2) ติดตั้งใบกวน (Paddle หรือ Turbine) สำหรับกวาดหรือตีฟองทางด้านบนของถังหมัก หรืออาจใช้ใบกวนเป็นซิลิโคนแบบเส้นเพื่อตีฟองทางด้านบนของถังหมักให้แตก การใช้ใบกวนเป็นซิลิโคนแบบเส้นมีข้อดีที่จะไม่รบกวนรูปแบบการไหลในถังกวนเมื่อใช้ความเร็วรอบสูง

3.4 การป้องกันการปรากฏการณ์การหมุนวน(Prevention of Swirling)

โดยการติดตั้ง Baffles เพื่อกำจัดการไหลในแนวสัมผัส ลักษณะของ baffles จะเป็นแผ่นตั้งในแนวตั้งติดให้ตั้งฉากกับผนังของถัง ขนาดและจำนวนของ baffles จะมีผลต่อรูปแบบการไหลในถังกวน

4. ทดลองเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยโดยใช้อาหารเหลือในถังหมักขนาด 100 ลิตรที่สร้าง
ขึ้น
 5. สรุปผลและเขียนรายงานการวิจัย
- สถานที่ศึกษา
1. กรมวิชาการเกษตร บางเขน
 2. บริษัท ยูนิซีดส์ จำกัด
 3. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย

- 1 เป็นการเริ่มต้นการพัฒนาโครงการวิจัยออกแบบและสร้างเครื่อง FERMENTER สำหรับการผลิตเชื้อแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่มีประโยชน์ต่อภาคเกษตรกรรมในระดับอุตสาหกรรม โดยวิธีการหมัก
- 2 ได้เทคนิควิธีการเพาะเลี้ยงไส้เดือนฝอย *Steinemema carpocapsae* ที่มีความสามารถในการควบคุมศัตรูพืชสามารถป้องกันกำจัดหนอนและแมลงได้หลายชนิด เช่น หนอนกินได้ผิวเปลือกถั่วลิสง ตัวอ่อนด้วงหมัดผักในหัวผักกาด ด้วงงวงมันเทศ หนอนเจาะสมอฝ้าย หนอนกระทู้หอมในดาวเรือง เบญจมาศ หนอนใยผัก หนอนกระทู้ผัก เป็นต้น เพื่อเผยแพร่แก่เกษตรกร และผู้ประกอบการที่สนใจ
- 3 ได้พัฒนาดังหมัก (Fermenter) สำหรับเพาะเลี้ยงไส้เดือนฝอย *Steinemema carpocapsae* ที่ใช้ควบคุมศัตรูพืชทางชีวภาพ ให้มีราคาถูกลง และมีค่าใช้จ่ายในการเพาะเลี้ยงต่ำ
- 4 ได้ตั้งหมักต้นแบบสำหรับเพาะเลี้ยงไส้เดือนฝอย *Steinemema carpocapsae* ที่ใช้ควบคุมศัตรูพืชทางชีวภาพ และเผยแพร่แก่เกษตรกรและผู้ประกอบการที่สนใจลงทุน
- 5 ได้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการควบคุมศัตรูพืชของเกษตรกรโดยใช้วิธีการทางชีวภาพ
- 6 สามารถนำเทคนิควิธีการเพาะเลี้ยงไส้เดือนฝอย *Steinemema carpocapsae* และถังหมักที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาถังหมักเพื่อผลิตเชื้อแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ปุ๋ยน้ำชีวภาพจากอินทรีย์วัตถุทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เพื่อประโยชน์แก่เกษตรกรอีกด้วย

- เดือนที่ 1-6
- เสร็จสิ้นการศึกษากระบวนการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอย
 - เสร็จสิ้นการออกแบบและคำนวณรายละเอียดทางกลของถังหมัก

บทที่ 2

ไส้เดือนฝอยและวิธีการทดลอง

การศึกษาการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอย

โดยใช้อาหารเหลวในถังหมักขนาด 6 ลิตร

2.1 ไส้เดือนฝอยและวงจรชีวิต

2.1.1 ชีวิตวิทยาของไส้เดือนฝอย

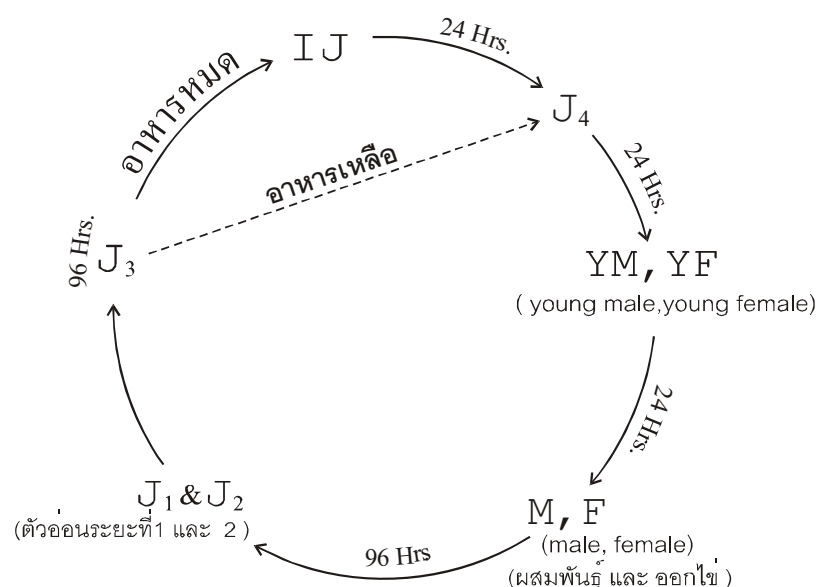
ไส้เดือนฝอย *Steinernema Carpocapsae* เป็นไส้เดือนฝอยที่ทำให้เกิดโรคกับแมลงหลายชนิด และมีลักษณะเด่นตรงที่ไม่มีอันตรายต่อมนุษย์หรือสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่งถือเป็นสิ่งดึงดูดใจให้นำมาใช้ควบคุมแมลงศัตรูพืชทางชีววิทยาทดแทนการใช้สารเคมีที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและยังเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและเกษตรกรผู้ใช้ ไส้เดือนฝอย *Steinernema Carpocapsae* จัดอยู่ใน ไฟล์ม นิมาโทด (Phylum Nematoda) วงศ์ Steinernematidae ปกติจะเฉพาะเจาะจงอยู่ร่วมกับ Symbiotic Bacteria ที่มีชื่อว่า *Xenorhabdus nematophilus* จัดเป็นแบคทีเรียในวงศ์ Enterobacteriaceae เป็นแบคทีเรียแกรมลบ มีลักษณะเป็นรูป rod shape ไม่สร้างสปอร์ ไม่มีระยะต้านทาน (Resistant stage) จึงไม่สามารถดำรงชีวิตในสภาพแวดล้อมในธรรมชาติทั่วไปได้ ปกติจะพบแบคทีเรียชนิดนี้จะอาศัยอยู่ในผนังลำไส้ของไส้เดือนฝอยวงศ์ Steinernematidae เท่านั้น (วัชรวิ, 2533; วิไลวรรณ, 2540) ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกับไส้เดือนฝอยจะเป็นแบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน กล่าวคือไส้เดือนฝอยทำหน้าที่ช่วยป้องกันอันตรายและเป็นพาหะพาแบคทีเรียเข้าสู่ตัวแมลง ในขณะที่แบคทีเรียทำหน้าที่ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์อื่นที่อาศัยอยู่ในช่องว่างลำตัวแมลง และเป็นแหล่งธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการสืบพันธุ์ของไส้เดือนฝอย (Akhurst, 1983; Poinar and Thomas, 1966)

2.1.2 วงจรชีวิตของไส้เดือนฝอย

ลักษณะวงจรชีวิตของไส้เดือนฝอย *Steinernema Carpocapsae* จะประกอบด้วยระยะตัวอ่อน (Juvenile) ซึ่งมีทั้งหมด 4 ระยะ (J1 – J4) ระยะตัวเต็มวัยเพศผู้ และเพศเมีย (Adult) ซึ่งไส้เดือนฝอยระยะนี้จะผสมพันธุ์ และวางไข่ จากนั้นจะฟักเป็นตัวอ่อนตามลำดับ สำหรับระยะเข้าทำลายแมลงของไส้เดือนฝอยจะเป็นตัวอ่อนวัยที่ 3 (J3) เรียกไส้เดือนฝอยระยะนี้ว่า Infective Juvenile หรือระยะ IJ ไส้เดือนฝอยระยะนี้จะมีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสรีรวิทยาให้มีความสามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้เป็นอย่างดีจนรอเข้าทำลายแมลงที่อาศัย (วิไลวรรณ, 2540) นอกจากนี้เชื้อแบคทีเรีย *Xenorhabdus nematophilus* ซึ่งปกติจะต้องอาศัยอยู่ในลำไส้ของไส้เดือนฝอยและรอให้ไส้เดือนฝอยเป็นตัวพาหะนำเชื้อแบคทีเรียเข้าทำลายแมลงที่อาศัยก็จะมีคุณสมบัติทางสรีรวิทยาโดย

ธรรมชาติที่พิเศษกว่าระยะอื่นๆเช่นกัน โดยแบคทีเรียในระยะนี้จะมีความสามารถทนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้นานแม้จะไม่มีแมลงอาศัยถ้ามีสภาพอากาศและความชื้นที่เหมาะสม (วัชรวิ, 2538)

สำหรับการเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยในถังหมักขนาด 6 ลิตรนั้น สามารถอธิบายวงจรชีวิตได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรชีวิตไส้เดือนฝอย *Steinernema Carpocapsae* สำหรับการเลี้ยงขยายพันธุ์ในถังหมักขนาด 6 ลิตร

ไส้เดือนฝอยในวัย Infective Juvenile (IJ) ซึ่งเป็นวัยที่มีความสามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อม และถือเป็นวัยที่มีความแข็งแรงมากที่สุดจะถูกนำมา Inoculate ใส่ลงในถังหมัก ไส้เดือนฝอยระยะ IJ จะพัฒนาเป็นตัวอ่อนระยะที่ 4 (J4) ภายใน 24 ชั่วโมง และพัฒนาเป็นไส้เดือนฝอยตัวเต็มวัยเพศผู้และเพศเมีย (Male, Female) ภายใน 48 ชั่วโมง ตัวเต็มวัยจะเริ่มผสมพันธุ์และสร้างไข่ โดยไข่จะฟักเป็นตัวอ่อนภายในเวลา 24 ชั่วโมง ได้ไส้เดือนฝอยตัวอ่อนซึ่งจะพัฒนาเข้าสู่ตัวอ่อนวัยที่ 1 และ 2 (J1 และ J2) ในเวลา 96 ชั่วโมง ไส้เดือนฝอยระยะ J1 และ J2 จะพัฒนาเป็นตัวอ่อนระยะที่ 3 (J3) จนกระทั่งเป็น Infective Juvenile ตั้งแต่ 90% ขึ้นไปใช้ระยะเวลาประมาณ 96 ชั่วโมง การพัฒนาของไส้เดือนฝอยจากระยะ J3 ไปเป็น IJ นั้นมีความสำคัญมากเพราะการเตรียมอาหารนั้นจะต้องมีการคำนวณให้อาหารหมดในระยะนี้พอดี เมื่ออาหารหมดไส้เดือนฝอยจะพัฒนาเข้าสู่ระยะ IJ คือปากและทวารของไส้เดือนฝอยจะปิด การทำงานของระบบย่อยอาหารจะลดลง และจะมีการสะสมสารอาหารไว้ในร่างกายบริเวณ hypodermal glands และ intestinal cell (Poinar and Himsworth, 1967) ทำให้ไส้เดือนฝอยในระยะนี้มี

ความแข็งแรงและอดทนต่อสภาพแวดล้อมมากกว่าปกติ สามารถนำมาเลี้ยงกรองและบรรจุในฟองน้ำส่งขายให้แก่เกษตรกรได้ แต่ถ้าหากเมื่อถึงระยะนี้แล้วอาหารในถังที่ใช้เลี้ยงยังไม่หมดไส้เดือนฝอยจะพัฒนาเข้าสู่ระยะ J4 และเข้าสู่วงจรชีวิตระยะอื่นๆต่อไป ซึ่งไส้เดือนฝอยที่นอกเหนือจากระยะ II จะไม่สามารถนำมาบรรจุขายให้แก่เกษตรกรได้เนื่องจากมีความอดทนต่ำไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้

2.2 การศึกษาลักษณะของไบโวกวที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยในถังหมักขนาด 6 ลิตร

2.2.1 วัสดุ อุปกรณ์

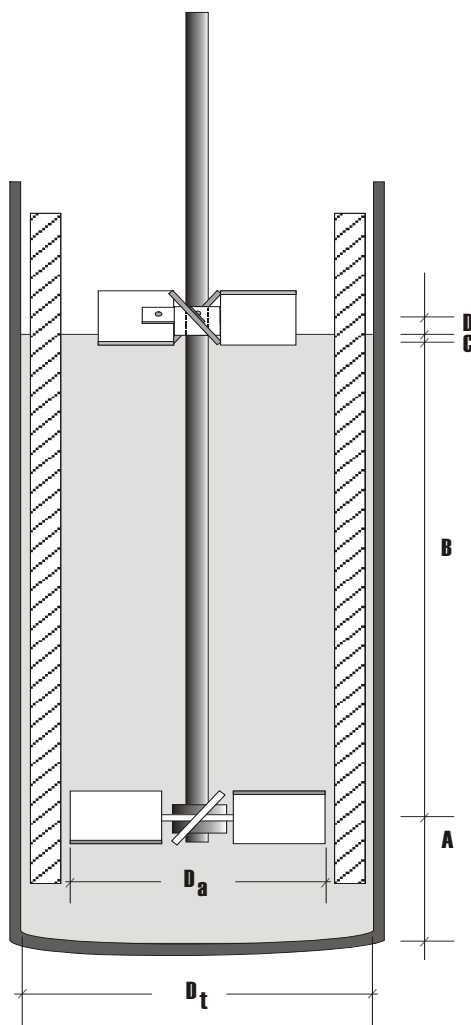
- ชุดทดลองการเลี้ยงขยายไส้เดือนฝอยในถังหมักขนาด 6 ลิตร จำนวน 2 ชุด สำหรับไบโอดแบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) 1 ชุด และไบโอดทดลอง 1 ชุด ซึ่งประกอบไปด้วย;
 - control unit
 - cooling unit
 - culture vessels
 - gasmix unit
 - air pump
- ไบโอดกวน 4 แบบ และไบโอดสำหรับตีฟองทำด้วยซิลิโคน 1 แบบ (ตารางที่ 2.1)
- อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร Tsb₃ NBTA และ YS broth
- สารเคมีต่างๆ ได้แก่;
 - คลอโรกซ์ 0.1%
 - โซเดียม 0.1%
 - ฟอรั่มาลีน 0.1% และ
 - แอลกอฮอล์ 75%
- ไส้เดือนฝอย *S. carpocapsae* พ่อแม่พันธุ์ระยะ II
- แบคทีเรีย *X. nematophilus*
- หนอนกินรังผึ้ง *G. mellonella*
- อุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ สำลี ทรายออลูมินัม ปากคืบ ถาดสำหรับทดสอบประสิทธิภาพการเข้าทำลายแมลง

2.2.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- ศึกษาลักษณะการกวนเบื้องต้นของใบพัดกวนแบบต่างๆ ในอาหารเหลวสูตร Tsb₃ เพื่อคัดเลือกใบพัดที่มีความเหมาะสม ก่อนนำไปทดลองเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยในถังหมักขนาด 6 ลิตร (Pre-Experiment) โดยใบพัดที่ดีจะต้องมีลักษณะดังนี้
 - สามารถกวนอาหารให้เข้ากันได้ดี
 - สามารถละลายออกซิเจนให้เข้ากับอาหารได้สูง ในช่วงความเร็วในการกวน 400 รอบ/นาที
 - สามารถลดฟองได้เมื่อให้อากาศกับถังหมักในอัตราสูงสุดที่ 8 ลิตร/นาที
- นำใบพัดกวนที่คัดเลือกได้จากข้อ 1 มาใช้ทดลองเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยในถังหมักขนาด 6 ลิตร โดยเตรียมปริมาณอาหารขนาด 3 ลิตร ทำการติดตั้งใบพัดแบบต่างๆ และใบพัดแบบดีฟอง (Silicone) เข้าด้วยกัน โดยจะติดใบพัดกวนทางด้านล่างของถังและใบพัดแบบใช้ดีฟองอยู่ด้านบนให้ขอบใบพัดด้านล่างของใบพัดดีฟองสัมผัสกับผิวหน้าของอาหารพอดี (ขอบใบพัดจมอยู่ในอาหารประมาณ 1 mm.) เพื่อป้องกันไม่ให้ฟองล้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และในการทดลองเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยโดยใช้ใบพัดแบบต่างๆ ที่ได้รับการคัดเลือกแต่ละ Batch จะต้องทำการเลี้ยงควบคู่กับการใช้ใบพัดแบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดลองเสมอ

ชื่อของใบกวน	ชนิดของใบกวน	ขนาดใบ			Da/Dt	จำนวนใบ	มุมของใบ
		Diameter	W (mm)	L (mm)			
Silicone (ดีฟองด้านบน)	Axial Flow Impeller	110.0	45.0	45.0	0.70	4	50°
BIOSTAT B	Bladed Disc Turbine	63.5	12.7	19.1	0.40	6	-
แบบที่ 1	Axial Flow Impeller	64.0	40.0	40.0	0.40	4	35°
แบบที่ 2	Impeller	55.0	20.0	50.0	0.34	3	50°
แบบที่ 3	Up-Pumping Impeller	64.0	18.0	30.0	0.40	4	30°
แบบที่ 4	Up-Pumping Impeller	95.0	34.0	42.0	0.60	4	20°

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาด และมิติ (Dimensions) ของใบพัดแบบต่างๆ

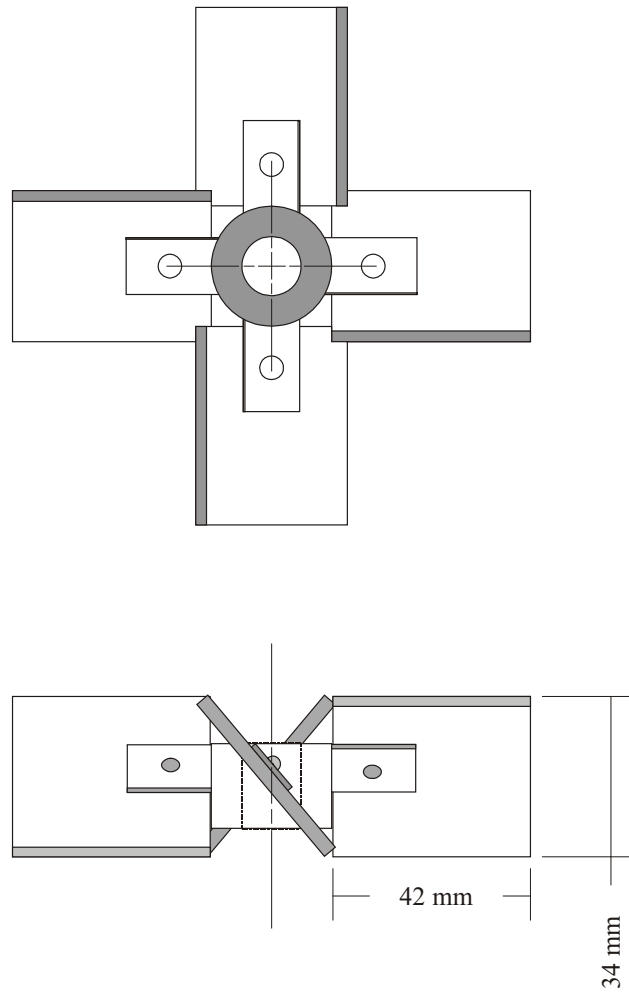


D_t = Diameter of Tank = 160 mm D_a = Diameter of Impeller (Table 2.1)

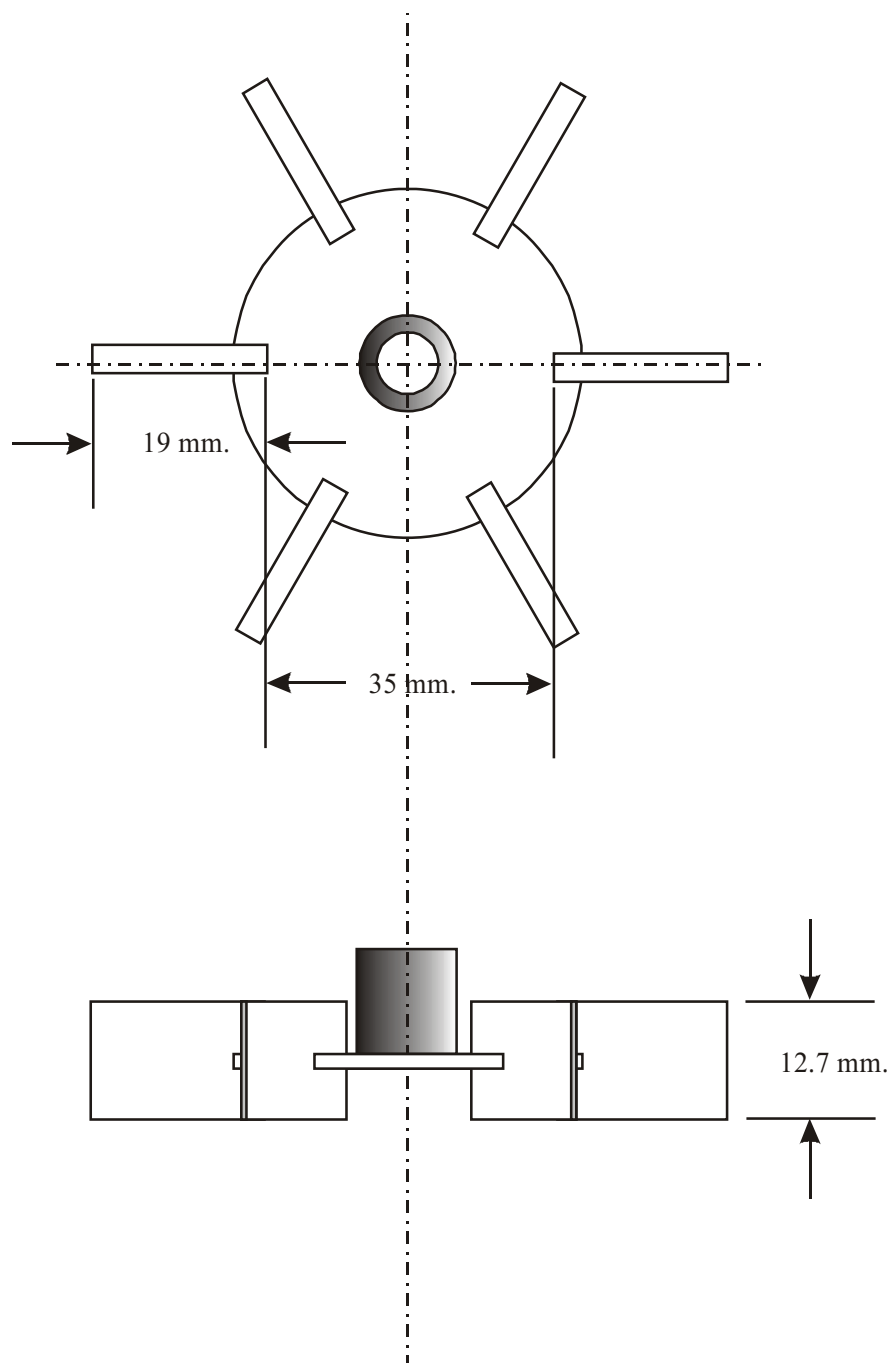
A ~ 50 mm B ~ 10 mm C = 1-2 mm D = 15 mm

ระยะห่างระหว่างใบ = 120 mm

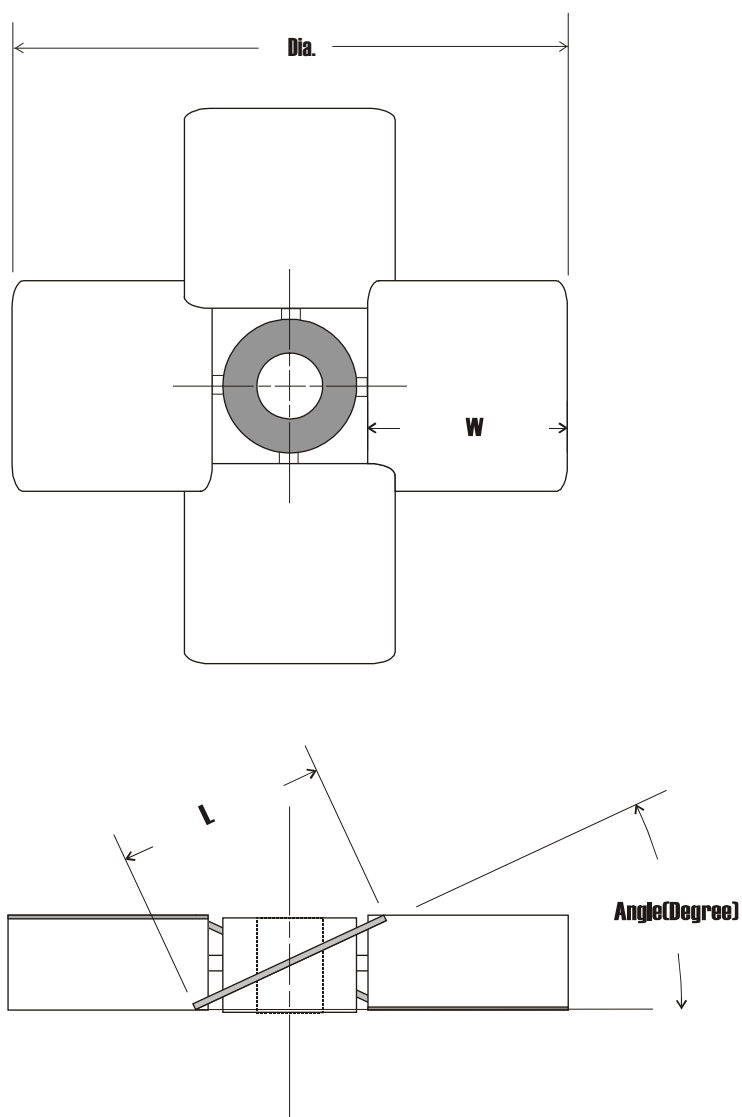
รูปที่ 2.2 แสดง Dimension และการติดตั้งใบกวนในถังหมักขนาด 6 ลิตร (เตรียมอาหาร 3 ลิตร)



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะและ Dimension ของใบพัดที่ใช้ดีฟองแบบ Silicone (Upper Impeller)



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะและ Dimension ของใบพัดแบบมาตรฐาน BIostat[®] R (Bottom Impeller)



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะและ Dimension ของใบพัดที่แบบ Up-Pumping Impeller (Bottom Impeller)

2.2.3 วิธีการทดลองเลี้ยงไส้เดือนฝอยในถังหมักขนาด 6 ลิตร

1. เตรียมอาหารเหลวสูตร Tsb₃ ที่มีการพัฒนาและทดลองมาเรียบร้อยแล้วว่าสามารถใช้เลี้ยงและขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยได้ใส่ลงในถังหมัก
2. นำไปอบฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นเวลา 30 นาที
3. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่า pH และ DO (Dissolved Oxygen)

Calibrate pH indicator = 6 - 9.5

Calibrate DO indicator = 0 – 100%

โดยการพัฒนาการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในถังหมักในปัจจุบันนี้ ทางกรมวิชาการเกษตรยังไม่มีการควบคุมค่า pH และปริมาณ DO แต่จะทำการตรวจวัดค่าเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH และ DO ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและวิจัยถึงปัจจัยที่อาจมีผลต่อการเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในระดับต่อไป

4. นำ stock แบคทีเรีย (500 mL) ที่เตรียมไว้มา Inoculate ใส่ลงในถังหมักโดยผ่าน Peristaltic Pump ติดตั้งเครื่องหล่อเย็นควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 28°C กวนของผสมด้วยอัตรา 350 rpm และควบคุมให้มีอากาศไหลเวียนตลอดเวลาโดยจะป้อนอากาศเข้าทางท่อของ Gas Mixture
5. ทดลองตรวฉับแบคทีเรียในถังหมักหลังจากเลี้ยงแบคทีเรียในถังหมักเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ้าได้ปริมาณแบคทีเรียตามที่ต้องการแล้ว จึงนำไส้เดือนฝอย (500 mL) มา Inoculate ใส่ลงในถังหมักโดยผ่าน Peristaltic Pump และปรับลดอุณหภูมิมาไว้ที่ 25°C โดยการ feed จะต้อง feed แบคทีเรียและไส้เดือนฝอยให้หมดภายในเวลา 20 นาที เนื่องจากแบคทีเรียจะขาดออกซิเจนได้ไม่เกิน 30 นาที
6. รวเก็บผลผลิตและตรวฉับปริมาณไส้เดือนฝอย (yield) ที่เลี้ยงขยายพันธุ์ได้ ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 10 - 12 วัน

เวลาและสถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการ กลุ่มงานวิจัยการปราบศัตรูพืชทางชีวภาพ กองกฤษฎีและสัตววิทยา กรมวิชาการเกษตร ระหว่างเดือน พฤษภาคม – กรกฎาคม 2544

2.2.4 ผลการทดลอง

2.2.4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

Batch	ชนิดของใบกวน		ความเร็วรอบ ในการกวน (รอบ/นาที)	อัตราการให้อากาศ สูงสุดโดยที่ฟองไม่ ล้น (ลิตร/นาที)	ผลการทดลองเบื้องต้น
	ด้านบน	ด้านล่าง			
1	Silicone	BIOSTAT [®] B	400	8	อาหารเข้ากันได้ดี เกิดฟองเต็มถังแต่ไม่ล้น
2	แบบที่ 1 Axial Flow Impeller	BIOSTAT [®] B	400	3	ฟองล้น
3	Silicone	แบบที่ 2 (Impeller)	400	4	ฟองล้น
4	Silicone	แบบที่ 3 Up-Pumping	400	8	อาหารเข้ากันได้ดี ฟองน้อยมาก
5	Silicone	แบบที่ 4 Up-Pumping	400	8	อาหารเข้ากันได้ดี ฟองน้อยมาก

ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองเบื้องต้น โดยใช้ใบพัดกวนแบบต่างๆ ในอาหารเหลวสูตร Ts_{b3}

2.2.4.2 ผลการทดลองเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในในถังหมัก เปรียบเทียบผลผลิตระหว่างใบพัด แบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) กับใบพัดทดลอง

ชนิดของใบกวน	ผลผลิต (ตัว/มล.)	ประสิทธิภาพ การทำลายแมลง (%)	ระยะเวลาในการเลี้ยง ขยายพันธุ์ 1 วงจร (วัน)
แบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT [®] B)	254,000	41.83	12
แบบที่ 3	251,000	40.0	12
แบบที่ 4	ไม่ได้ผลผลิต	-	-

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบผลผลิต (Yield) และประสิทธิภาพการเข้าทำลายแมลงของไส้เดือนฝอย *S. carpocapsae* ที่เลี้ยงขยายในถังหมักเป็นเวลา 1 วงจรด้วยอาหารเหลวสูตร Ts_{b3} โดยใช้ใบพัดกวนแบบต่างๆ

2.2.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

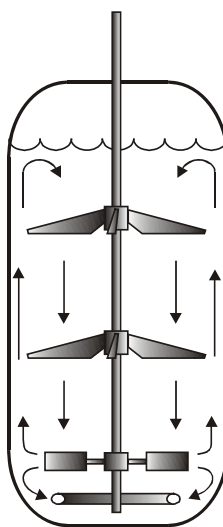
2.2.5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

การเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยในถังหมักขนาด 6 ลิตร โดยใช้อาหารเพียง 3 ลิตร นั้นแต่เดิม กรมวิชาการเกษตรเลือกใช้ใบพัดกวนทั้งทางด้านบน (Upper Impeller) และทางด้านล่าง (Bottom Impeller) ของถังเป็นแบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) หรือ 6 Bladed Disc Turbine ขนาด Diameter = 6.35 cm (2.5 inch.) มีระยะห่างระหว่างใบ (B) = 10.5 cm ที่ อัตราการป้อนอากาศ = 8-10 ลิตร/นาที่ ที่ความเร็วรอบของใบกวนเริ่มต้น = 350-400 รอบ/นาที่ ซึ่งมักจะเกิดปัญหาฟองล้นภายหลัง จากที่ไส้เดือนฝอยเจริญเติบโตจนเข้าสู่ระยะผสมพันธุ์ สร้างไข่และออกลูกอ่อน (หลัง 120 ชั่วโมง เป็นต้นไป) ทำให้ปริมาณผลผลิต (Yield) ที่ควรจะได้ลดลงเนื่องจากไส้เดือนฝอยจะไหลล้นออกตาม ฟองด้วย นอกจากนี้ยังสร้างความยุ่งยากต่อผู้ควบคุมการผลิต (Operator) เพราะจะต้องทำการควบคุม และปรับความเร็วรอบของใบพัด กับอัตราการป้อนอากาศให้สัมพันธ์กันอยู่ตลอดเวลาหากมีปริมาณ ฟองมากเกินไปหรืออัตราการละลายของออกซิเจน (Dissolve Oxygen) น้อยจนเกินไป

จากการทดลองเบื้องต้น (Pre-Experiment) โดยทำการเปลี่ยนใบพัดตามตารางที่ 2.1 ที่ความเร็ว รอบของใบกวนเริ่มต้น = 400 รอบ/นาที่ พบว่า

1. การเปลี่ยนใบพัดทางด้านบนของถัง (Upper Impeller) เป็นใบพัดตีฟองแบบ Silicone และ ใบพัดทางด้านล่างถัง (Bottom Impeller) ยังคงเป็นแบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) เช่นเดิม เปรียบเทียบกับการใช้ใบพัดแบบมาตรฐานเครื่องทั้งทางด้านบนและด้านล่าง การใช้ใบพัดตีฟองแบบ Silicone เข้าช่วยจะให้ผลดีกว่า รูปแบบการไหลวนของอาหารใน ถังจะเข้ากันได้ดี เกิดฟองเต็มถังแต่จะไม่ล้นออกนอกถังเพราะฟองจะถูกใบพัด Silicone กวาดและดึงกลับลงมาละลายผสมในอาหารเช่นเดิม ซึ่งหากเปรียบเทียบกับใช้ใบพัดแบบ มาตรฐานเครื่องทางด้านบน ฟองที่เกิดขึ้นจะไหลล้นออกนอกถังทางท่อระบายอากาศ เนื่องจากใบพัดแบบมาตรฐานเครื่อง (6 Bladed Disc Turbine) จะให้กระแสไหลวนใน แนวรัศมี (Radial-Flow Impeller) ก่อให้เกิดกระแสในแนวสัมผัส (Tangential) และแนว รัศมี (Radial) ร่วมกับใบพัดแบบมาตรฐานเครื่องทางด้านล่าง รูปแบบการไหลวนของ อาหารในถังจะเข้ากันได้ดีก็จริงแต่จะทำให้เกิดฟองมากและใบพัดไม่ได้มีลักษณะที่จะ กวาดฟองลงมาทางด้านล่างได้
2. การใช้ใบพัดทางด้านบนของเครื่องเป็นแบบ Axial Flow Impeller (แบบที่ 1) และใบพัด ทางด้านล่างยังคงเป็นแบบมาตรฐานเครื่อง พบว่าทำให้เกิดฟองค่อนข้างมาก ที่อัตราการ ป้อนอากาศเพียง 3-4 ลิตร/นาที่ ฟองจะไหลล้นออกทางด้านบนของถังซึ่งอาจเนื่องมาจาก ใบพัดแบบ Axial Flow Impeller จะก่อให้เกิดกระแสของของไหลไหลในแนวแกน (แนว

ขนานกับแกนของใบกวน) และใบพัดแบบมาตรฐานเครื่อง (6 Bladed Disc Turbine) ให้กระแสไหลวนในแนวรัศมี (Radial-Flow Impeller) ของเหลวจะถูกผลักให้ไหลลงทางด้านล่างแล้ววนขึ้นสู่ทางด้านบนถึง การไหลวนของอาหารเข้ากันได้ดีแต่ที่ผิวหน้าของของเหลวจะไม่เรียบ ทำให้เกิดฟองอากาศ (Air Bubble) ทางด้านบนของถังมาก การดึงให้ของไหลไหลวนลงมาด้านล่างของ Axial Flow Impeller ทำได้ไม่ทันกับการเกิดฟอง ฟองจึงล้นออกที่ทางด้านบนของท่ออากาศ



Axial Flow Upper Impeller

รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการไหลของใบพัดแบบ Axial Flow Impeller

3. การใช้ใบพัดกวนทางด้านบนของเครื่องเป็นใบพัดตีฟองแบบ Silicone และใบพัดทางด้านล่างเป็นใบพัดกวนแบบ Impeller (แบบที่ 2) พบว่าเกิดฟองมาก ที่อัตราการป้อนอากาศเพียง 3-4 ลิตร/นาที ฟองจะไหลล้นออกทางด้านบนของถังเช่นเดียวกับการทดลอง Batch ที่ 2 อาจเนื่องมาจากใบพัดกวนแบบที่ 2 มีลักษณะกึ่งกั้นน้ำซึ่งก่อให้เกิดกระแสปั่นป่วน (Turbulent Flow) ทางด้านล่างของถังไหลวนขึ้นไปรวมกับกระแสน้ำปั่นป่วนทางด้านบนของถังที่เกิดจากใบพัดตีฟองแบบ Silicone ทำให้การไหลวนของของไหลในถังเป็นแบบปั่นป่วนสูง (Complete Turbulent Flow) อัตราการกระจายของออกซิเจนสู่ของเหลวสูงแม้ที่อัตราการป้อนอากาศต่ำแต่ไม่สามารถควบคุมปัญหาการเกิดฟองได้
4. การใช้ใบพัดกวนทางด้านบนของเครื่องเป็นใบพัดตีฟองแบบ Silicone และใบพัดทางด้านล่างเป็นใบพัดกวนแบบ Up-Pumping Impeller (แบบที่ 3 และ 4) ให้ผลการทดลองดีที่สุด

ใบพัดกวนแบบ Up-Pumping Impeller จะก่อให้เกิดกระแสของของไหลไหลในแนวแกน (แนวขนานกับแกนของใบกวน) เช่นเดียวกับใบพัดแบบ Axial Flow Impeller แต่มุมใบพัดของ Up-Pumping Impeller จะมีลักษณะเอียงขึ้นและดึงให้กระแสของของเหลวไหลวนขึ้นตามแนวแกนของใบพัดแทนที่จะไหลวนลงด้านล่างของถัง เมื่อกระแสของของเหลวที่ไหลขึ้นทางด้านบนตามแนวแกนของใบพัดมาพบกับแรงผลักให้ของเหลวไหลลงของใบพัดตีฟองแบบ Silicone ของเหลวจะถูกผลักให้ไหลลงด้านล่างทางด้านข้างถังแล้วไหลวนขึ้นสู่ทางด้านบนดังใหม่ตามแรงดึงของ Up-Pumping Impeller ลักษณะกระแสไหลวนเช่นนี้ทำให้อาหารในถังจะเข้ากันได้ดีและลดปัญหาการเกิดฟองไหลล้นออกนอกถังลงได้

2.2.5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองเลี้ยงเพิ่มปริมาณไส้เดือนฝอยในในถังหมักระหว่างใบพัดแบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) กับใบพัดทดลอง

เมื่อนำใบพัดกวนแบบ Up-Pumping Impeller (แบบที่ 3 และ 4) มาทดลองเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยเปรียบเทียบกับใบพัดกวนแบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) ในถังหมักขนาด 6 ลิตร โดยเตรียมอาหารเพียง 3 ลิตร โดยใช้ใบพัดกวนทางด้านบนถึงเป็นใบพัดตีฟองแบบ Silicone พบว่าใบพัดกวนแบบที่ 3 สามารถนำมาเลี้ยงขยายพันธุ์ไส้เดือนฝอยได้จริง เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตและประสิทธิภาพการเข้าทำลายแมลงของไส้เดือนฝอยกับ Batch ที่ใช้ใบพัดกวนแบบมาตรฐานเครื่อง (BIOSTAT[®] B) พบว่าสามารถให้ผลผลิตและประสิทธิภาพการเข้าทำลายแมลงได้สูงใกล้เคียงกัน แต่ใบพัดกวนแบบที่ 3 ลดฟองในถังหมักได้ดีกว่าโดยเฉพาะเมื่อเลี้ยงขยายไส้เดือนฝอยจนถึงอายุ Batch ที่ 120 ชั่วโมงเป็นต้นไปอาหารจะเริ่มหนืดเนื่องจากไส้เดือนฝอยย่อยสลายโปรตีนไปบางส่วน และเริ่มเจริญเติบโตจนเข้าสู่ระยะผสมพันธุ์-สร้างไข่และออกลูกอ่อน ซึ่งเป็นช่วงที่ไส้เดือนฝอยต้องการออกซิเจนสูงต้องให้อากาศมาก (เพิ่ม Air Flow Rate) ดังนั้นจึงเกิดฟองมากตามไปด้วย ในระยะนี้จึงพบว่าใบพัดกวนแบบที่ 3 สามารถใช้งานได้ดีกว่าแบบอื่นๆ (ให้อากาศได้มากโดยที่ฟองไม่ล้น) แต่เนื่องจากใบพัดแบบที่ 3 มีมุมระหว่างใบพัดน้อยเกินไป (30°) ทำให้ระบบการกวนไม่ดีนัก ไส้เดือนฝอยจึงตกตะกอน (เกิด Dead Zone) เป็นเหตุให้ได้ผลผลิตและประสิทธิภาพการเข้าทำลายแมลงต่ำกว่าแบบมาตรฐานเครื่องเล็กน้อย ส่วนใบพัดแบบที่ 4 มีขนาดใหญ่และมุมระหว่างใบพัดแคบเกินไปไม่สามารถกวนให้ไส้เดือนฝอยกระจายตัวในอาหารได้ทั่วถึงเมื่อไส้เดือนฝอยเจริญเติบโตมากขึ้นมีความต้องการอากาศมากขึ้น ใบพัดแบบที่ 4 ไม่สามารถละลายอากาศได้เพียงพอกับความต้องการทำให้การเลี้ยงขยายพันธุ์ไม่ประสบผลสำเร็จ ไส้เดือนฝอยตายและไม่สามารถเก็บผลผลิตได้

จากการทดลองทั้งสองส่วนสามารถสรุปได้ว่า การลดปัญหาการเกิดฟองล้นในถังหมักสามารถทำได้โดยใช้ใบพัดทางด้านบนของถังหมัก (Upper Impeller) เป็นใบพัดตีฟองแบบ Silicon และใบพัดทางด้านล่าง (Bottom Impeller) เป็นแบบมาตรฐานเครื่อง (6 Bladed Disc Turbine) หรือเป็น Up-Pumping Impeller (แบบที่ 3) ใบพัดแบบที่ 3 มีมุมระหว่างใบน้อยเกินไป (30°) ดังนั้นจึงควรทดลองเพิ่มมุมระหว่างใบขึ้นเป็นประมาณ $40-45^\circ$ เพื่อป้องกันการเกิด Dead Zone ซึ่งมีผลทำให้ผลผลิตต่อ Batch ลดลง

2.2.6 อุปสรรคและปัญหา

1. ทำการทดลองต่อเนื่องได้ล่าช้าเนื่องจากไฟฟ้าขัดข้องบ่อยครั้งเพราะเป็นฤดูฝนและที่ห้องปฏิบัติการไม่มีเครื่องสำรองไฟ ซึ่งจัดเป็นอุปสรรคสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการทดลองเกี่ยวกับ Fermentor โดยเฉพาะกับการเลี้ยงขยายไส้เดือนฝอยซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่ต้องการอากาศตลอดเวลาโดยเฉพาะในระยะผสมพันธุ์ สร้างไข่และออกลูกอ่อน เมื่อไฟฟ้าขัดข้องช่วงนี้ไส้เดือนฝอยจะตายทั้งหมด
2. เนื่องจากในห้องปฏิบัติการมีการศึกษาไส้เดือนฝอยหลายชนิด และช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาเกิดการปนเปื้อนขึ้น จึงไม่สามารถผลิตขยายพ่อแม่พันธุ์สำหรับทดลองได้

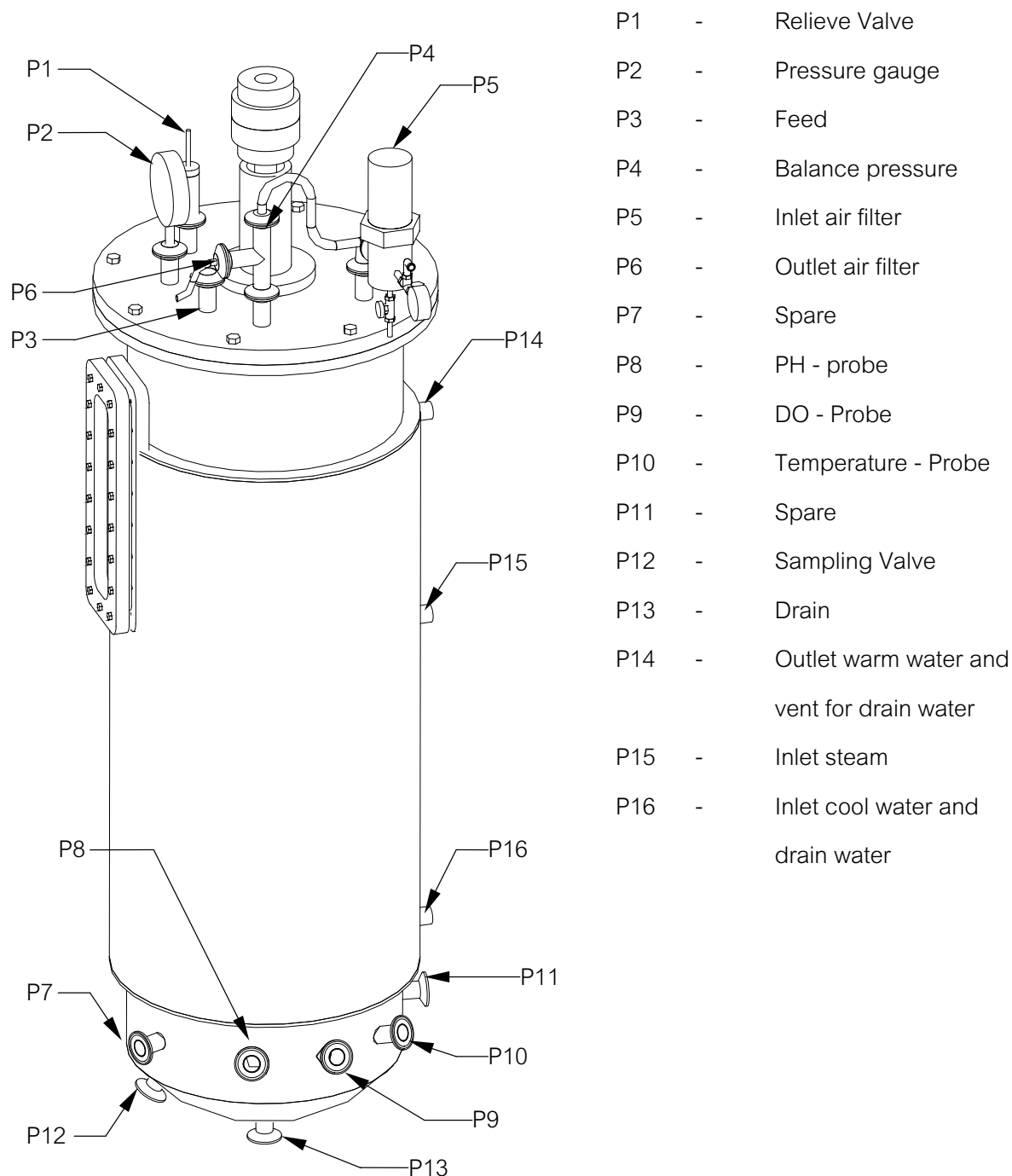
บทที่ 3

การออกแบบถังหมัก (FERMENTER) ขนาด 100L

รายละเอียด

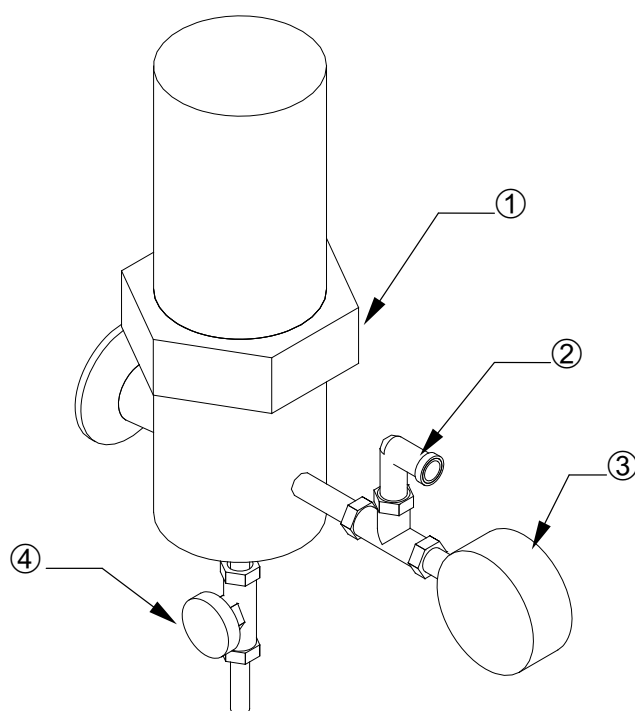
1. ถังหมักทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ขนาดผิวขนาด 150 กิต ความจุของถัง 130 ลิตร
2. แจ็คเก็ตทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 หุ้มรอบตัวถังเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับถัง
3. Baffle ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 เพื่อช่วยให้การกวนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
4. พอร์ต ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 จำนวน 12 พอร์ต
5. ช่องมองกระจก ทำจากวัสดุกระจกนิรภัยหนา 10 มม.
6. เฟลาใบกวนทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316
7. ใบกวน 3 แบบทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 และ 1 แบบทำจากวัสดุซิลิโคน
8. Mechanical Seal สำหรับป้องกันการติดเชื่อที่เฟลาใบกวน
9. ชุดส่งกำลังจากมอเตอร์
10. มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า(ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย)

ตำแหน่งและอุปกรณ์ของพอร์ต(Port Description)



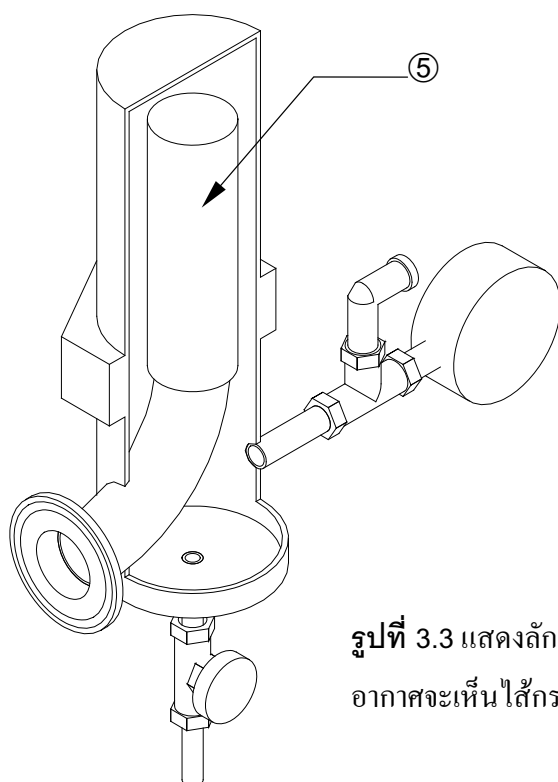
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะภายนอกของถังหมัก

รายละเอียดของไส้กรองอากาศขาเข้า(Inlet air filter)



- | | | |
|---|---|--|
| 1 | - | เสื้อของไส้กรอง(Filter Casing) |
| 2 | - | ข้อต่อสายยางลมเข้าถึงหมัก
ขนาด ϕ 8 มม.(Quick connect for
air inlet) |
| 3 | - | Pressure gauge 0 - 2 bar |
| 4 | - | Drain valve(Condensate) |
| 5 | - | ไส้กรองอากาศ(Air filter) |

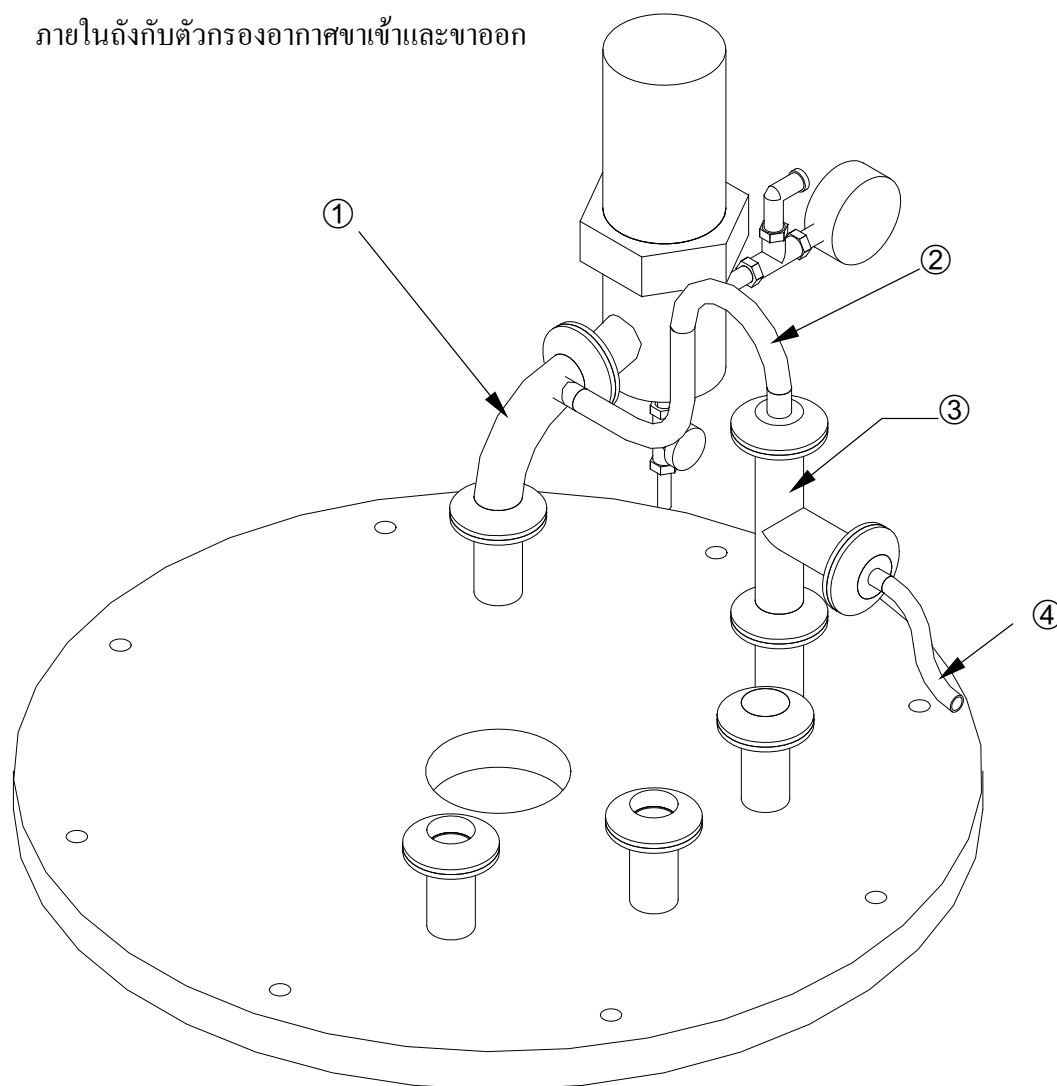
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของตัวกรองอากาศขาเข้า



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะภายในของตัวกรอง
อากาศจะเห็นไส้กรองอากาศซึ่งอยู่ภายใน

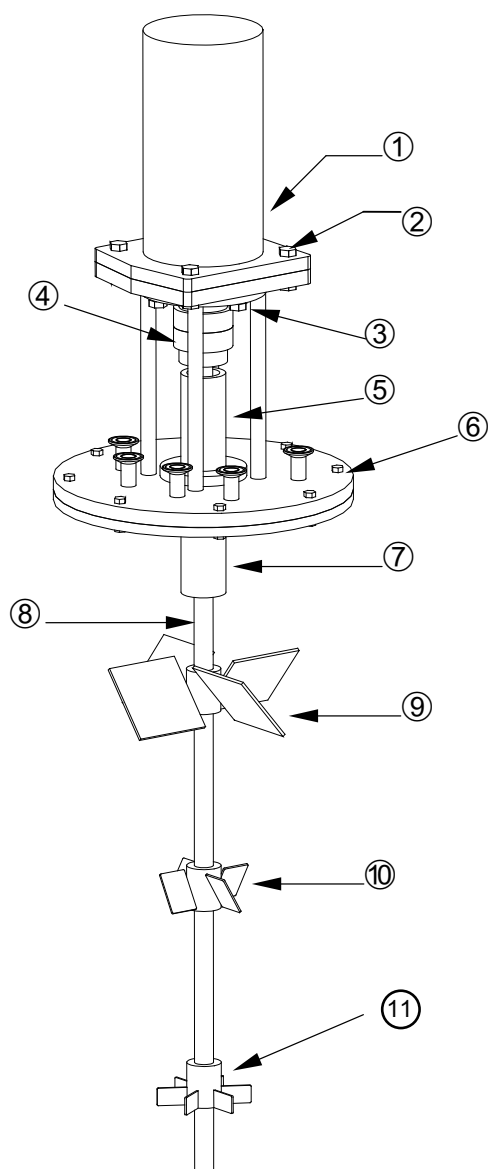
ชุดรักษาความดันขณะทำการฆ่าเชื้อ(Balance pressure set)

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการต่อระหว่างตัวรักษาความดัน
ภายในถังกับตัวกรองอากาศเข้าและขาออก



1. ข้องอ 90 สำหรับต่อกับด้านความดันของของเหลวส่วนล่างในถัง
2. สายยางซิลิโคนขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว สำหรับต่อเพื่อปรับความดัน ปกติอยู่ในสภาพปิด จะเปิดตอนทำการฆ่าเชื้อเท่านั้น
3. ข้อต่อสามทาง สำหรับต่อกับด้านความดันของไอน้ำส่วนบนเหนือระดับของเหลวในถัง
4. สายยางซิลิโคนขนาด $\frac{3}{8}$ นิ้ว สำหรับต่อกับไส้กรองอากาศขาออก ปกติอยู่ในสภาพเปิด จะปิดตอนทำการฆ่าเชื้อเท่านั้น

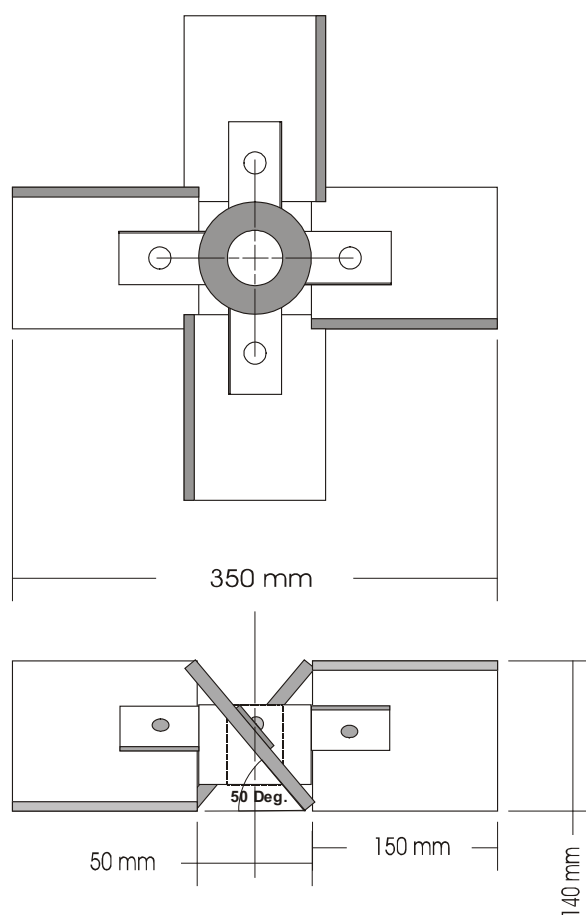
ชุดส่งกำลังขับเคลื่อนใบกวน



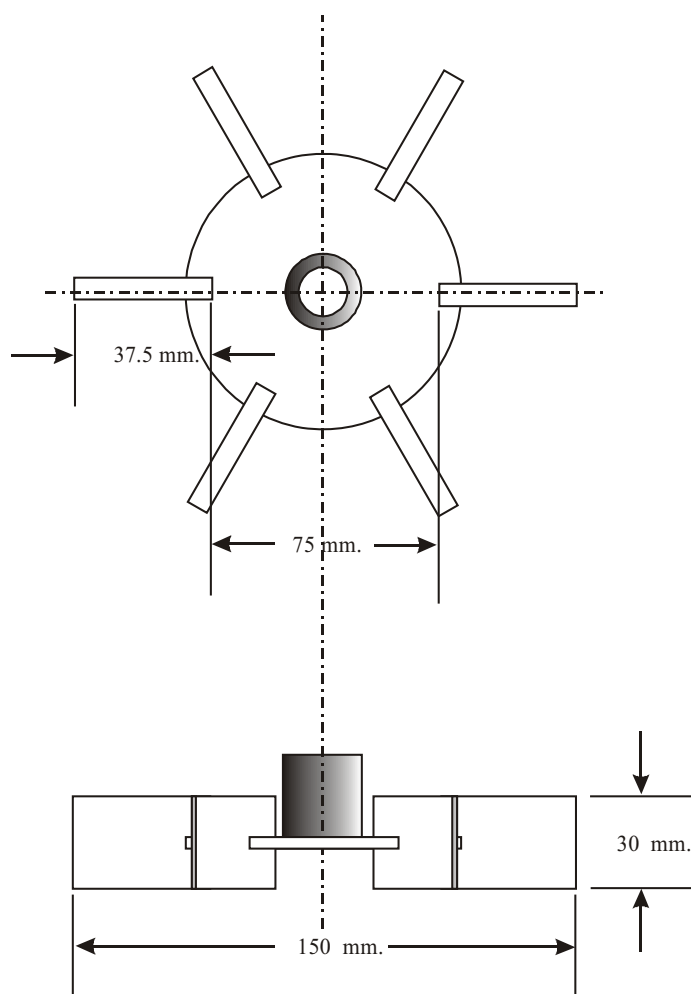
- 1 - มอเตอร์มีเกียร์ทดรอบในตัวขนาด 3 แรงม้าใช้กับไฟฟ้า 380 โวลต์ 3 เฟส (3เส้น)
- 2 - Bolt สแตนเลส เกรด 304 size M x 65 mm จำนวน 4 ตัว สำหรับยึดมอเตอร์ กับแท่นรองมอเตอร์
- 3 - Nut สแตนเลส เกรด 304 size M จำนวน 8 ตัว
- 4 - Coupling(ขอย) สำหรับส่งกำลังจากมอเตอร์สู่เพลา
- 5 - Housing สแตนเลส เกรด 316 สำหรับ ลูกปืน(bearing) ของหน้าแปลนด้านบน
- 6 - Bolt and Nut สแตนเลส เกรด 316 size M8 x 60 mm จำนวน 8 ชุด
- 7 - Housing สแตนเลส เกรด 316 สำหรับ ลูกปืน(bearing) ของหน้าแปลนด้านล่าง
- 8 - เฟลาสสแตนเลส เกรด 316 ขนาด 30 มม. ยาว 142 ซม.
- 9 - ใบกวนซิลิโคน สำหรับปิดฟองที่เกิดที่ผิวน้ำในถังหมัก
- 10 - ใบกวนแบบ Up-Pumping Impeller เพื่อดึงให้กระแสของเหลวไหลขึ้นในแนวแกน
- 11 - ใบกวนแบบมาตรฐาน BIOMASTER[®] R

รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของชุดส่งกำลังในการกวน

ขนาดของใบกวนในถังหมักขนาด 100L



รูปที่ 3.6 Dimension ใบพัดตีฟองแบบ Silicone (Upperv Impeller) ของถังหมักขนาด 100L



รูปที่ 3.7 Dimension ใบพัดตีฟองแบบมาตรฐาน BIOSTAT® R (Bottom Impeller)
ของถังหมักขนาด 100L