คำนำ

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะการเลี้ยงปลาเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญ หลังจากการจับสัตว์น้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ เริ่มมีความไม่แน่นอน และมีแนวโน้มในปริมาณที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องมาจากปัญหาทางด้านสภาพแวดล้อมของแหล่งน้ำ ปัญหาความตื้นเขินของแม่น้ำ ลำคลอง และต้นทุนน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับความต้องการทางด้านการอุปโภค และบริโภคสัตว์น้ำมีจำนวนเพิ่มขึ้น จึงทำให้สัตว์น้ำยังไม่พอเพียงกับความต้องการ อย่างไรก็ตาม การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเลี้ยงปลายังมีข้อจำกัดหลายอย่างอาทิเช่น ปัญหาทางด้านเทคโนโลยี ระบบการเพิ่มผลผลิต การเลือกพันธุ์ปลาที่เหมาะสม พื้นที่รวมถึงสถานที่ในการเลี้ยง ตลอดจนธุรกิจด้านการส่งออกต่างประเทศ อีกทั้งปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีแนวโน้มเปลี่ยนจากการเลี้ยงในระดับความหนาแน่นต่ำซึ่งนิยมทำในระบบเปิดโดยใช้น้ำจากธรรมชาติเข้าสู่การเลี้ยงแบบพัฒนา (ระดับความหนาแน่นสูง) และในระบบปิดซึ่งมีการบำบัดและหมุนเวียนน้ำอยู่ภายในระบบ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดมีข้อดีคือสามารถเพิ่มผลผลิต ป้องกันการติดโรค และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยง แต่การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบนี้มักประสบปัญหาแอมโมเนียสะสมในระดับความเข้มข้นสูง ซึ่งมีสาเหตุจากการให้อาหารในปริมาณมาก การขับถ่ายของสัตว์น้ำ และจากการย่อยสลายของโปรตีนในอาหารที่เหลือจากการบริโภคโดยแบคทีเรียภายในบ่อเลี้ยง

การพัฒนาระบบการเลี้ยงเป็นการเลี้ยงระบบปิดซึ่งจะสามารถเพิ่มผลผลิต ป้องกันการติดโรค ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงและควบคุมคุณภาพน้ำได้ การจัดการเลี้ยงปลานิลในระบบปิดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับท้องถิ่นภาคเหนือ เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย เพื่อให้ลดต้นทุนในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้อีก ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมมาใช้ โดยคำนึงถึงต้นทุนการผลิตมาประกอบจึงอาจเป็นทางเลือกหนึ่งของเกษตรกรเพาะเลี้ยงปลานิลเพื่อให้การผลิตปลานิลให้ได้มาตรฐานและมีคุณภาพเพื่อการส่งออกได้ เพิ่มขึ้น

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาระบบการเลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกพืชผักแบบไม่ใช้ดินโดยเทคนิคการใช้สารอาหารจากน้ำที่ใช้เลี้ยงปลามาปลูกพืชผัก

2. เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของปลานิลและพืชผัก โดยใช้ระบบผสมผสาน

3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพในบ่อเลี้ยงปลานิลโดยอาศัยการปลูกพืชผักแบบไม่ใช้ดินในการบำบัด

4. เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มผลผลิตปลานิลและผลผลิตพืชผัก

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. นำองค์ความรู้ที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างการเลี้ยงปลานิลอย่างเดียวกับการเลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน

2. เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลทางวิชาการในการส่งเสริมความรู้แก่เกษตรกร สถาบันการศึกษาและบุคคลทั่วไปที่สนใจ

3. เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มผลผลิตของปลานิลร่วมกับการปลูกพืชผัก

4. เพื่อเป็นแนวทางในการประกอบอาชีพ หรือเป็นการหารายได้เสริมแก่เกษตรผู้เลี้ยงปลา

5. การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์และบูรณาการเข้ากับหลักสูตรของสถานศึกษาที่เกี่ยวข้อง และยังสามารถถ่ายทอดไปยังหน่วยงานของรัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้อง

ตรวจเอกสาร

การเลี้ยงปลาแบบระบบปิดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental friendly closed – system) เป็นระบบการเลี้ยงที่ใช้ประโยชน์จากระบบการบำบัดน้ำที่มีประสิทธิภาพ ทั้งการใช้วัสดุกรองแบบไม่มีชีวิต เช่น ไบโอบอล ฟองน้ำ เศษปะการัง เป็นต้นและวัสดุกรองแบบมีชีวิต เช่น พืชน้ำหรือการปลูกพืชแบบไร้ดิน (Hydroponic) เพื่อดูดซับธาตุอาหารต่างๆ ในบ่อเลี้ยงปลาทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำและยังป้องกันการเกิดโรคที่มาจากน้ำได้อีกทางด้วย และยังมีผลพลอยได้ที่เป็นตะกอนจากสิ่งขับถ่ายของปลาซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นปุ๋ยหมักหรือเป็นปุ๋ยเม็ดอัดแห้งเพื่อใช้ประโยชน์ในการปลูกไม้น้ำประดับต่างๆ โดยการวิจัยครั้งนี้มีแนวคิดในการพัฒนาการเลี้ยงปลานิลระบบปิดโดยใช้ระบบกรองชีวภาพร่วมกับการปลูกพืชแบบไร้ดินที่สามารถผลิตได้ทั้งปลาและพืชผักได้ในคราวเดียวกันเพื่อพัฒนาระบบการผลิตอาหารแบบ Food safety

ปลานิล มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oreochromis niloticus* (Linn.) จัดลำดับลักษณะทางอนุกรมวิธานได้ดังนี้ (Nelson, 1994)

Phylum Chordata
Class Actinopterygii
Subclass Neopterygii
Order Perciformes
Suborder Labroidei
Family Cichlidae
Genus *Oreochromis*
Species *Oreochromis niloticus*

ความเป็นมา

ปลานิลได้ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกโดยพระจักรพรรดิอากิฮิโต เมื่อครั้งดำรงพระอิสริยยศมงกุฎราชกุมารแห่งประเทศญี่ปุ่น ทรงจัดส่งปลานิลขนาดความยาวเฉลี่ยประมาณ 9 เซนติเมตร จำนวน 50 ตัว มาทูลเกล้าฯ ถวายแด่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช เมื่อวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 1008 ในระยะแรกพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ได้ทรงกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้ปล่อยลงในบ่อดินพื้นที่ประมาณ 10 ตารางเมตร ในบริเวณสวนจิตรลดาพระราชวังดุสิต หลังจากเลี้ยงได้ประมาณ 5 เดือนเศษ ปรากฏว่ามีลูกปลาเกิดขึ้นในบ่อเป็นจำนวนมาก และในวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 1008 ทรงย้ายพันธุ์ปลาด้วยพระองค์เอง จากบ่อเดิมไปปล่อยในบ่อใหม่ ที่ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้เจ้าหน้าที่สวนหลวง ขุดบ่อจำนวน 6 บ่อ มีเนื้อที่เฉลี่ย บ่อละ 70 ตารางเมตร ด้วยพระวิสัยทัศน์ที่กว้างไกล ทรงมีพระราชประสงค์ให้พันธุ์ปลาชนิดนี้ แพร่ขยายพันธุ์ อันจะเป็นประโยชน์แก่พสกนิกรของพระองค์ ดังนั้นเมื่อวันที่ 17 มีนาคม

พ.ศ. 1009 ทรงเห็นว่าปลาชนิดนี้เป็นปลาที่เลี้ยงง่าย ออกลูกดก และเติบโตเร็วในเวลาเพียง 1 ปี มีความยาวถึง 1 ฟุต และมีน้ำหนักประมาณครึ่งกิโลกรัม ได้ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ พระราชทานชื่อปลาชนิดนี้ว่า "ปลานิล" และได้พระราชทานปลานิล ขนาดความยาว 3-5 เซนติเมตร จำนวน 10,000 ตัว ให้แก่กรมประมง เพื่อนำไปขยายพันธุ์ที่แผนกทดลองและเพาะเลี้ยงในบริเวณเกษตรบางเขน และสถานีประมงต่าง ๆ อีกจำนวน 15 แห่ง ทั่วพระราชอาณาจักร เพื่อดำเนินการขยายพันธุ์พร้อมกัน ซึ่งต่อมาปลานิลได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการเพาะเลี้ยงและแพร่ขยายพันธุ์ออกไปอย่างรวดเร็ว จนกระทั่ง ในปัจจุบันปลานิลได้กลายเป็นปลาหลักที่นำมาส่งเสริมให้ราษฎรเลี้ยง เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนอาหารโปรตีนของราษฎรในชนบท (สำนักงานประมงจังหวัดอ่างทอง, 2550)

ชีววิทยาบางประการ

ปลานิล เป็นพันธุ์ปลาที่มีถิ่นฐานดั้งเดิมแถบบริเวณลุ่มแม่น้ำไนล์ ในแอฟริกาตะวันออกและบริเวณแถบน้ำเซเนกัลและไนเจอ ในแอฟริกาตะวันตก ปลานิลมีลักษณะตัวแบนข้าง มีริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน หลังโค้งขึ้นเล็กน้อย จมูกมีข้างละรู ปากขนาดปานกลาง มุมปากอยู่ระหว่างดากับจมูก มีลายพาดขวาง 9-10 แถบ ครีบหลังมีอันเดียวมีฐานยาว ประกอบด้วยก้านครีบอ่อน 9-10 อัน ก้านครีบแข็ง 16-18 ก้าน เกล็ดเป็นชนิดเรียบ ลำตัวจะมีสีต่าง ๆ เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อม คือมีสีน้ำตาลปนเหลือง สีเขียวเข้มหรือสีน้ำเงิน ตรงกลางเกล็ดมีสีเข้ม บริเวณส่วนอ่อนของครีบหลัง ครีบก้น และครีบหางนั้นมีจุดสีขาวและดำตัดขวาง แลดูคล้ายลายข้าวตอกอยู่โดยทั่วไป มีเกล็ดบนเส้นข้างลำตัว 33 เกล็ด เกล็ดข้างลำตัวจากครีบหลังถึงเส้นข้างลำตัว 5 เกล็ด และจากเส้นข้างลำตัวลงมาถึงส่วนหน้าของครีบก้น 13 เกล็ด ที่แก้มมีจุดเข้ม 1 จุด ปลานิลมีฟันขนาดเล็กบนขากรรไกร และบริเวณคอหอย ไม่มีกระเพาะแท้เหมือนปลากินเนื้อ ขนาดของปลานิลมีความยาวเกือบ 50 ซม. น้ำหนัก 3 - 4 กิโลกรัม เป็นปลาที่วางไข่ตลอดปี แม่ปลาจะวางไข่ปีละ 3 - 4 ครั้ง มีทางเดินอาหารส่วนที่ต่อจากหลอดคอพัฒนามีโครงสร้างคล้ายกระเพาะหรืออาจเรียกว่า กระเพาะดัดแปลง (modified stomach) ซึ่งสามารถหลั่งน้ำย่อยอาหารได้ ท่อทางเดินอาหารมีความยาว 5 - 8 เท่าของความยาวลำตัว ซึ่งมีประโยชน์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและการดูดซึมอาหาร รวมทั้งเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์บางชนิดที่สามารถสังเคราะห์สารอาหารประเภทวิตามินได้ด้วย (ศักดิ์ชัย, 2536)

อุปนิสัยการกินอาหารและคุณสมบัติบางประการของปลานิล

ปลานิลกินอาหารได้ทุกชนิด เช่น ไรน้ำ ตะไคร่น้ำ สาหร่าย แหน ตัวอ่อนของแมลง และสัตว์เล็กๆ ที่อยู่ในแหล่งน้ำ แต่การเลี้ยงจะให้อาหารสมทบเป็นหลัก เช่น ปลายข้าว มันสำปะหลัง รำข้าว ปลาป่น และพืชผักต่าง ๆ ให้มีส่วนผสมของโปรตีนประมาณ 20 % ปลานิลเป็นปลาที่โตเร็ว เมื่อได้รับการเลี้ยงดูอย่างถูกต้อง เมื่อใช้เวลาในการเลี้ยง 4 - 6 เดือน จะได้ปลาขนาด 100 - 480 กรัม

ปลานิลเป็นปลาที่กินอาหารตลอดเวลา กลางวันไม่ค่อยกินอาหาร จะกินอาหาร ในเวลากลางคืน แต่การย่อยจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ปลานิลกินอาหารได้ทั้งบนผิวน้ำ กลางน้ำ และ พื้นท้องบ่อ ทำให้สามารถกินอาหารได้หลากหลายประเภท โดยอาหารที่กินแตกต่างกันเล็กน้อย ตามขนาด ปลานิลขนาด 1 - 2 นิ้วกินแพลงก์ตอนและตัวอ่อนของกุ้ง ปู รวมทั้งสาหร่ายเส้นสาย ปลานิลขนาด 3 - 5 นิ้ว กินแพลงก์ตอน

และตัวอ่อนของกุ้ง และปู แต่อาหารส่วนใหญ่เป็นแพลงก์ตอนพืช จำพวกไดอะตอม สาหร่ายสีเขียว และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน รวมทั้งสิ่งมีชีวิตและสิ่งเน่าเปื่อยตามก้นบ่อ มีทางเดินอาหารยาวประมาณ 5 - 7 เท่าของลำตัว ทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยและดูดซึมอาหาร ปลานิลไม่มีกระเพาะแท้ แต่มีเนื้อเยื่อซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกระเพาะ ที่สามารถหลั่งน้ำย่อยเพื่อลดความเป็นกรด - ด่าง ระหว่างการย่อยได้ จึงสามารถย่อยโปรตีนจากสาหร่ายและแพลงก์ตอนได้สูง 68.65 % ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการใช้ประโยชน์จากสารอาหารทั้งโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ (นิวุฒิ, 2547; ศักดิ์ชัย, 2536; Diana *et al.*,1985)

ความต้องการสารอาหาร

ปลานิลขนาดเล็กต้องการโปรตีนสูงกว่าปลาขนาดใหญ่ โดยลูกปลาระยะเริ่มกินอาหาร (น้ำหนักน้อยกว่า 1 กรัม) ต้องการโปรตีน 40 - 50 % ปลาวัยอ่อน (น้ำหนัก 1 - 10 กรัม) ต้องการโปรตีน 30 - 40 % ปลาวัยรุ่น (น้ำหนัก 10 - 30 กรัม) ต้องการโปรตีน 28 - 35 % ปลาโตเต็มวัย (น้ำหนักมากกว่า 30 กรัม) ต้องการโปรตีนในอาหาร 25 - 30 % ในกรณีที่เลี้ยงในบ่อดิน ซึ่งมี อาหารธรรมชาติที่ให้โปรตีนสูงทั้งปริมาณ และคุณภาพสามารถลดระดับโปรตีนในอาหารลง เหลือเพียง 20 - 25 % (ดีรี, 2542)

ระบบการเพาะเลี้ยงปลานิล

ปัจจุบันระบบการเพาะเลี้ยงปลานิลมีหลายรูปแบบ ทั้งลักษณะการเลี้ยงเชิงพาณิชย์ มีการให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปเป็นอาหารเพียงอย่างเดียว หรือการเลี้ยงเชิงพาณิชย์ผสมผสาน กับเชิงนิเวศน์ที่มีการสร้างอาหารธรรมชาติ เช่น แพลงก์ตอนพืช ให้เกิดขึ้นในบ่อเลี้ยง ซึ่งเป็นที่ เข้าใจกันในลักษณะ "การสร้างน้ำเขียว" นั่นเอง การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หากมีการสร้างอาหารธรรมชาติภายในบ่อ จะเป็นการเพิ่มระบบห่วงโซ่อาหารขึ้นในบ่อ ซึ่งเชื่อว่าปัจจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปัจจัยทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในระบบห่วงโซ่อาหารที่เพิ่มขึ้นนั้น จะส่งเสริมเกื้อกูลต่อผลผลิตสัตว์น้ำ ที่เพาะเลี้ยง ประกอบกับดูดซับสารอาหารส่วนเกินที่จะมีผลต่อคุณภาพน้ำ และการเจริญเติบโต ของสัตว์น้ำ (Mischke and Paul, 754) โดยทั่วไปผลผลิตของสัตว์น้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณอาหารธรรมชาติที่มีในน้ำ หรือที่เรียกว่าผลผลิตขั้นปฐมภูมิ และผลผลิตขั้นปฐมภูมิก็มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งรวมเรียกว่า ความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตในน้ำ ที่เป็นอาหารสัตว์น้ำ มีตั้งแต่ขนาดเล็กเซลล์เดียว จนถึงสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดใหญ่ สามารถจับต้องได้ เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ สัตว์พื้นท้องน้ำ ตัวอ่อนแมลงชนิดต่างๆ หนอนแดง เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2547)

ระบบในการกำจัดของเสียในการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด

Landau (1992) ได้ให้คำจำกัดความของระบบปิดไว้ว่า เป็นระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่เกือบทั้งหมด (95 - 100 %) โดยมีการกรองเอาเศษอาหารที่เหลือตกค้าง สิ่งขับถ่ายของปลาและของเสียอื่น ๆ ออกก่อนที่จะหมุนเวียนน้ำมาใช้ใหม่ จะมีน้ำเพียงบางส่วนเท่านั้นที่หายไปเนื่องจากการระเหยและการทำงานของระบบ ซึ่งน้ำส่วนที่หายไปนี้อาจมีการเติมเข้าไปทดแทนได้เพื่อเป็นการรักษาปริมาณน้ำในระบบ

ให้คงที่ สอดคล้องกับที่ Lee and Newman (1997) ได้กล่าวไว้ว่า ระบบปิดเป็นระบบที่ไม่มีการเติมน้ำใหม่เข้าไปในระบบ แต่จะมีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยจะมีการกรองเอาเศษอาหารที่เหลือ สิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำ และของเสียอื่น ๆ ออกก่อนที่จะนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยข้อดีของระบบปิดคือ ใช้น้ำในปริมาณที่น้อย และไม่ก่อปัญหามลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม แต่ข้อเสียของระบบปิดก็คือ จะมีการสะสมเศษอาหารที่เหลือและของเสียที่ปลาขับถ่ายออกมา ซึ่งถ้าสะสมมากขึ้นจะทำให้น้ำที่ใช้เลี้ยงปลาเกิดการเน่าเสียอย่างรวดเร็ว เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงปลา การแก้ปัญหานี้โดยทั่วไปใช้วิธีการเปลี่ยนถ่ายน้ำทุก 7 - 10 วัน ซึ่งระยะเวลาในการเปลี่ยนถ่ายน้ำจะมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับชนิดของปลาขนาดของปลา ความหนาแน่นของการเลี้ยง เป็นต้น การเปลี่ยนถ่ายน้ำบ่อย ๆ อาจก่อความยุ่งยากและเสียเวลา ในที่สุดผู้เลี้ยงปลาจึงอาจเกิดความเบื่อหน่ายในการเลี้ยงได้

ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในการเลี้ยงปลาระบบปิด

ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงปลาระบบปิดคือ การเกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลา อันเนื่องมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ ดังนี้

1. อาหารที่ใช้เลี้ยงปลา ถ้ามีการให้อาหารปลามากเกินไป และคุณภาพของอาหารปลาไม่ดีทำให้อาหารจมตัวเร็ว ก็จะเหลือเศษอาหารตกค้างอยู่ในตู้เลี้ยงปลา และเมื่อมีเศษอาหารเหลือจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำก็จะใช้เศษอาหารที่เหลือเพื่อการเจริญเพิ่มจำนวนทำให้น้ำขุ่นได้ และสารต่าง ๆที่เกิดจากเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ก็อาจเป็นพิษต่อปลาได้เช่นกัน นอกจากนั้นถ้าเกิดการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรคอาจทำให้ปลาติดโรค ปลาจะอ่อนแอ และในที่สุดอาจตายได้ ดังนั้นอาหารที่ใช้เลี้ยงปลาจึงควรเหมาะสมกับชนิดและขนาดของปลา คุณภาพของอาหารและปริมาณที่ให้แก่ปลาโดย Pe'nzes (1986) แนะนำว่าปริมาณอาหารปลาที่ให้ปลาควรจะกินให้หมดภายใน 2 – 3 นาทีหรือไม่ควรเกิน 30 นาที

2. การขับถ่ายของเสียจากปลา ของเสียนี้เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของปลาและขับถ่ายออกมาจากตัวปลา โดย Spotte (1979) ได้อธิบายไว้ว่า ปลาจะขับถ่ายของเสียออกมาทั้งทางเหงือก ทางไตและทางผิวหนังการสะสมของเศษอาหารที่เหลือ และสิ่งขับถ่ายจากปลาในตู้เลี้ยงปลาระบบปิด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในตู้เลี้ยงปลา โดยน้ำเกิดการเน่าเสียและเกิดสารประกอบไนโตรเจนขึ้นในตู้เลี้ยงปลา เช่น แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ซึ่งถ้าเกิดการสะสมจนถึง ระดับหนึ่งจะเกิดความเป็นพิษต่อปลาได้ Gross *et al.* (2000) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสาร ประกอบไนโตรเจนในบ่อปลาและได้รายงานว่า อาหารปลาสำเร็จรูปที่ให้แก่ปลาจะประกอบด้วยโปรตีน 3-25 เปอร์เซ็นต์ หรือไนโตรเจนอินทรีย์ 4 – 5.8 เปอร์เซ็นต์ และปลาจะนำไนโตรเจนในอาหารไปใช้ได้ 25 – 30 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นจะเข้าสู่ระบบนิเวศในบ่อปลา ปริมาณไนโตรเจนในบ่อปลาจะมาจากอาหารที่ให้แก่ปลามากที่สุดและเกิดการ mineralization ไปเป็นแอมโมเนีย โดยเฉลี่ย 59 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งปลาจะขับ

แอมโมเนียออกมาจากเหงือกมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากแอมโมเนียแล้วก็ยังมีของเสียอื่น ๆ ที่ปลาขับออกมาปนอยู่ด้วยเล็กน้อย เช่น กรดอะมิโน ยูเรีย และกรดยูริค (วีระพงศ์, 2536)

การกำจัดของเสียและสารประกอบไนโตรเจนในบ่อปลาระบบปิด

วิธีการกำจัดของเสียและสารประกอบไนโตรเจนในบ่อปลาระบบปิด โดยเฉพาะแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทจะมีวิธีการขั้นพื้นฐานอยู่ 3 วิธี ได้แก่ วิธีการทางกายภาพ วิธีการทางเคมี และวิธีการทางชีวภาพ ซึ่งอาจใช้เพียงวิธีเดียวหรือใช้ร่วมกันหลายวิธีก็ได้ (Alderton, 1983;Wilkie, 1985; Scott, 1996)

1. วิธีการทางกายภาพ (mechanical method)

วิธีการนี้เป็นวิธีการขั้นต้นที่อาศัยการกรองเพื่อกรองของเสียที่แขวนลอยอยู่ในน้ำแต่ไม่สามารถใช้กำจัดสารประกอบไนไตรเจนได้ การกรองของเสียที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะใช้เครื่องกรองน้ำซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ แต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป แต่หลักการทั่วไปจะเหมือนกันคือ เครื่องกรองจะดูดน้ำที่มีอนุภาคของของเสียและตะกอนต่าง ๆที่แขวนลอยอยู่ในน้ำให้ผ่านวัสดุกรอง แล้วไหลกลับเข้าสู่ตู้ปลาเหมือนเดิม น้ำที่ผ่านวัสดุกรองแล้วนั้นจะเป็นน้ำที่สะอาดขึ้น วัสดุกรองที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีหลายชนิด เช่น ใยสังเคราะห์ หิน กรวด ทราย และพลาสติกเป็นต้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องกรองน้ำให้สามารถกรองน้ำได้รวดเร็วขึ้น และมีความละเอียดมากขึ้น เช่น ใช้ไดอะตอมเป็นวัสดุกรอง ทำให้สามารถกรองตะกอนที่มีขนาดเล็กได้ เครื่องกรองนอกจากจะช่วยกรองสิ่งสกปรกต่าง ๆ ในตู้ปลาแล้ว ยังทำให้เกิดการหมุนเวียนน้ำทำให้น้ำในตู้ปลามีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งตู้ และทำให้น้ำมีโอกาสสัมผัสออกซิเจนได้มากขึ้น (ศิริวัฒน์, 2544)อย่างไรก็ตาม วิธีการทางกายภาพเป็นเพียงวิธีการขั้นต้นในการกำจัดของเสียในตู้เลี้ยงปลาจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการอื่น ๆ ในการกำจัดของเสียส่วนที่ละลายปนอยู่ในน้ำซึ่งไม่อาจใช้วิธีการกรองกำจัดได้ ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Wungkobkiat *et al.* (1997) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนภายใต้การบำบัดโดยใช้เครื่องกรองน้ำในตู้เลี้ยงปลาทองระบบปิด ในการศึกษาใช้ปลาทอง 30 ตัวต่อตู้เลี้ยงปลาซึ่งมี ขนาด 40 x 75 x 70 ลูกบาศก์เซนติเมตร และบรรจุน้ำในตู้ประมาณ 90 ลิตร ปลาทองที่ใช้มีน้ำหนักตัวเฉลี่ยประมาณ 15 กรัมต่อตัว และให้อาหารปลาสำเร็จรูปวันละ 5 กรัม พบว่า ถึงแม้จะใช้เครื่องกรองน้ำและมีจุลินทรีย์ตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นเองภายหลัง ก็ไม่สามารถกำจัดแอมโมเนียและไนไตรท์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อปลาได้

2. วิธีการทางเคมี (chemical l method)

ระบบนี้เป็นการนำเอากระบวนการทางเคมีมาประยุกต์ใช้ เช่น การนำผงถ่านกัมมันต์(activated carbon) มาใช้ดูดซับและเก็บสารอินทรีย์ และสารประกอบอื่น ๆที่ละลายปนอยู่ในน้ำไว้ผงถ่านกัมมันต์จึงมีอายุการใช้งานสั้น นอกจากนี้ยังมีวิธีการทางเคมีอื่น ๆ อีก เช่น การใช้ ionexchange resin หรือ reverse osmosis หรือ electrodialysis เพื่อกำจัดสารพิษในน้ำ (Haugen *et al.*,2002)

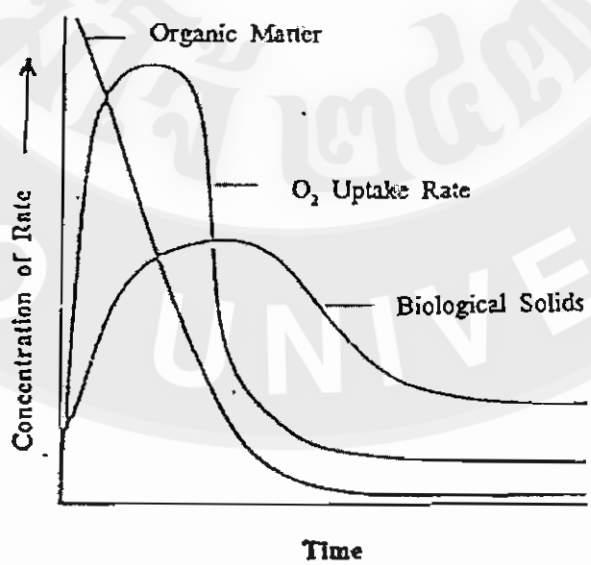
3. วิธีการทางชีวภาพ (biological method)

วิธีการทางชีวภาพเป็นวิธีการที่อาศัยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติและที่ใส่เพิ่มลงไปภายหลังเพื่อช่วยย่อยสลาย และกำจัดของเสียต่าง ๆ ในน้ำ และเปลี่ยนสารประกอบที่เป็นพิษให้กลายเป็นสารประกอบที่ไม่เป็น

พิษ เช่น ammonia stripping, breakpoint chlorination (Gonzales, 1995) หรือการใช้ระบบไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียให้กลายเป็นไนไตรท์ และเปลี่ยนไนไตรท์ให้กลายเป็นไนเตรท ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยที่สุด

การบำบัดน้ำเสียทางชีววิภาพ

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ สามารถกำจัดสิ่งสกปรกซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ รวมทั้งของแข็งแขวนลอยในรูปสารอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพ โดยอาศัยสิ่งมีชีวิต ได้แก่ จุลินทรีย์ เช่นแบคทีเรีย (bacteria) เชื้อรา (fungi) โปรโตซัว (protozoa) โรติเฟอร์ (rotifer) และสาหร่าย (algae)ในการกิน ทำลาย ย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลงด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารในการดำรงชีวิตเพื่อการเจริญเติบโตและสร้างพลังงาน ในการใช้สารอาหารหรือในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์อาจจะมีการทำงานร่วมกันหลายชนิดก็ได้ โดยจุลินทรีย์บางชนิดเริ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ซับซ้อนก่อน จากนั้นจะมีชนิดอื่นๆย่อยสลายส่วนที่เหลือ หรือมิฉะนั้นก็อาจจะเป็นการเอาผลหรือของเสียที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ มาทำการย่อยสลายต่อจนเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้อีกต่อไป (end products)เมื่อเริ่มการทำงานค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะมีค่าสูง ส่วนปริมาณจุลินทรีย์จะมีค่าต่ำและมีอัตราการใช้ออกซิเจนต่ำ ต่อจากนั้นจุลินทรีย์เริ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ก็จะเริ่มใช้ออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นและเจริญเติบโต เป็นผลให้มีจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วแต่เมื่ออาหารเริ่มขาดแคลนจนไม่เพียงพอในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ ปริมาณจุลินทรีย์และอัตราความต้องการออกซิเจนก็จะลดลงตามลำดับ ดังภาพที่ 1 สำหรับในระบบบำบัดน้ำเสียจริงซึ่งมีน้ำเสียไหลเข้าระบบอย่างต่อเนื่องจุลินทรีย์ก็จะย่อยสลายสารอินทรีย์และเพิ่มปริมาณอยู่ตลอดเวลาและอัตราการใช้ออกซิเจนสูงตลอดเวลาเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ที่มา : สุรพล (2531)

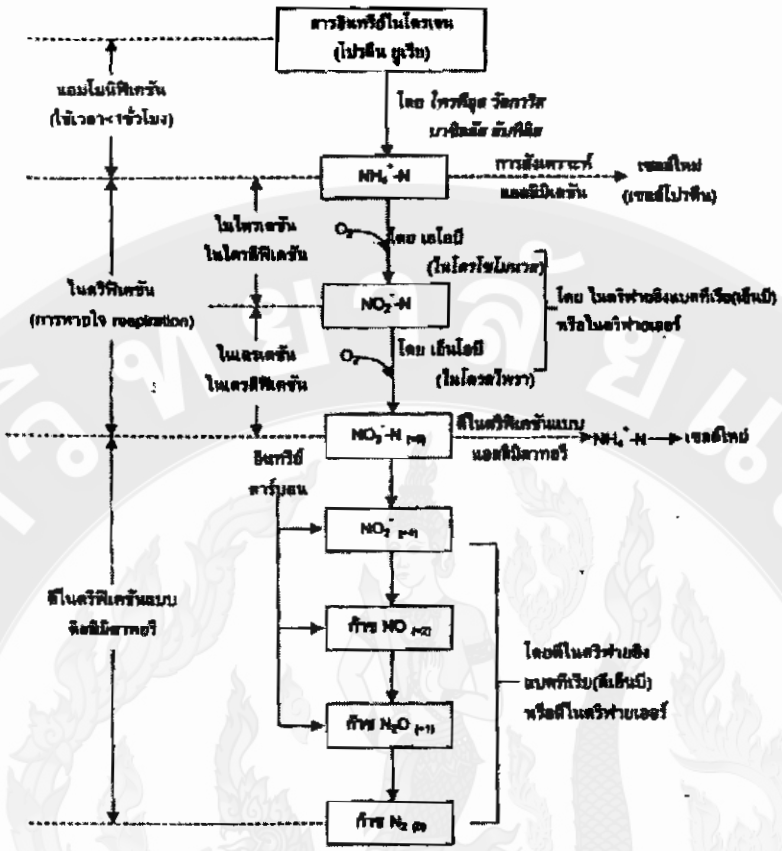
วิธีการทางชีวภาพเป็นวิธีการที่อาศัยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติและที่ใส่เพิ่มลงไปภายหลังเพื่อช่วยย่อยสลาย และกำจัดของเสียต่างๆในน้ำ และเปลี่ยนสารประกอบที่เป็นพิษให้กลายเป็นสารประกอบที่ไม่เป็นพิษ เช่น ammonia stripping, breakpoint chlorination หรือ การใช้ระบบไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียให้กลายเป็นไนไตรท์ และเปลี่ยนไนไตรท์ให้กลายเป็นไนเตรท ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยที่สุด (วิธู , 2546)

วิธู (2546) กล่าวว่าการเกิดไนเตรทการเลี้ยงปลาระบบปิดเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับวงจรไนโตรเจน โดยเมื่อปลากินอาหารแล้วจะขับถ่ายของเสียออกมา รวมทั้งเศษอาหารที่ปลากินไม่หมด ของเสียและเศษอาหารเหล่านี้จะถูกแบคทีเรีย ในกลุ่ม heterotrophs ย่อยสลาย ต่อไปกลายเป็นแอมโมเนียในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจนก็ได้โดยกระบวนการที่เรียกว่าแอมโมนิฟิเคชัน(ammonification) จากนั้นแอมโมเนียจะถูกออกซิไดส์กลายเป็นไนไตรท์และไนเตรทในที่สุด โดยกระบวนการที่เรียกว่า ไนตริฟิเคชัน(nitrificaiton)โดยจุลินทรีย์ในกลุ่มไนตริไฟอิงแบคทีเรียกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนียให้กลายเป็นไนไตรท์และออกซิไดส์ไนไตรท์ให้กลายเป็นไนเตรท โดยแบคทีเรียพวกเฮเทอโรโทรป (heterotrophs) หรือออโตโทรป (autotrophs) ก็ได้ แต่ส่วนใหญ่จะเกิดจากพวกออโตโทรปเป็นสำคัญ กระบวนการไนตริฟิเคชันจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่ ขั้นตอนการออกซิไดส์แอมโมเนียได้เป็นไนโตรท์ ดังแสดงในสมการที่ 1 โดย ammonia oxidizing bacteria ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ที่รู้จักกันดีได้แก่ *Nitrosomonas* sp. และขั้นตอนการออกซิไดส์ไนไตรท์ได้เป็นไนเตรท ดังแสดงในสมการ ที่ 2 โดย nitrite oxidizing bacteria ตัวอย่างของแบคทีเรียในกลุ่มนี้ที่รู้จักกันดี ได้แก่ *Nitrobacter* sp.

$$2NH_4^+ + 3O_2 \longrightarrow 2NO_2^- + 4H^+ + 2H_2O \qquad (1)$$

$$2NH_2^- + 3O_2 \longrightarrow 2NO_3^- + 4H^+ \qquad (2)$$

ธงชัย (2544) กล่าวว่าเป็นการกำจัดไนโตรเจนทางชีววิทยาที่อาศัยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียเนื่องจากจุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนเป็นธาตุอาหาร ระบบบำบัดน้ำเสียจึงต้องได้รับไนโตรเจนที่เพียงพอ แหล่งไนโตรเจนอาจเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนหรือแอมโมเนีย รวมทั้งไนเตรทก็อาจเป็นแหล่งไนโตรเจนได้เช่นกันแบคทีเรียทำให้การกำจัดไนโตรเจนเกิดได้สมบูรณ์มีอยู่ 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีหน้าที่ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (ในรูปรีดิวซ์) ให้เป็นไนเดรต จากนั้นแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งจะถูกลดรูปไนโตรเจนนี้ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนออกจากระบบ ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบนี้จะเริ่มต้นที่กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (ammonofication) ก่อนกระบวนการอื่นๆ



ภาพที่ 2 ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ ที่มา: ธงชัย (2544)

1. ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน

ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน คือ กระบวนการที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (โปรตีนและยูเรีย) ไปอยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนีย) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ไนโตรเจนมีเนอรัลไลเซชัน (Nitrogen Minerailzation) ซึ่งมีจุลินทรีย์หลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดังกล่าว และแอมโมเนียในปฏิกิริยาเกิดขึ้นมาจากกรดอะมิโนที่แปรรูปมาจากสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ถูกลดรูปอะมีน ซึ่งมีทั้งแบบออกซิเดทีฟและรีดักทีฟ ส่วนการไฮโดรไลซ์ของยูเรียโดยเอนไซม์ยูรีเอสก็จะปล่อยแอมโมเนียได้เช่นกัน แอมโมเนียที่เกิดจากปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันอาจถูกกำจัดได้ 2 ทาง ทางที่หนึ่ง คือ ถูกจุลินทรีย์ดึงไปใช้เป็นสารอาหารและใช้ในการสร้างเซลล์ หรือทางที่สอง คือ ถูกจุลินทรีย์พวกออโตโทรปเปลี่ยนให้เป็นไนโตรท์และไนเตรทตามลำดับ ซึ่งเรียกการกำจัดทางที่สองนี้ว่า ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (มั่นสิน, 2547)

2. ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางชีวภาพที่ทำให้สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจนเปลี่ยนเป็นสารประกอบไนโตรท์ (NO_2) และสารประกอบไนเตรท (NO_3) ตามลำดับ ในปฏิกิริยา

นี้จำเป็นต้องใช้ออกซิเจน จึงเกิดในสภาวะที่มีออกซิเจนอย่างเพียงพอ และเกิดขึ้นบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Membrane) ของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย โดยมีแอมโมเนียเป็นตัวให้อิเลคตรอน (Electron Donor) มีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้าย (Terminal Electron Acceptor) และมีเอนไซม์แอมโมเนียโมโนออกซิเจนเนส (Ammonia monooxygenase, AMO) ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย ได้เป็นไฮดรอกซิลเอมีน (NH_2OH) (สิทธิโชค ,2547)

3. ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยารีดักชันที่ทำให้สารประกอบไนเตรทเปลี่ยนเป็นสารประกอบไนไตรท์และก๊าซไนโตรเจน ตามลำดับ โดยอาศัยแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (Denitrifying Bacteria) ซึ่งสามารถใช้ไนเตรท (NO_3) เป็นตัวรับอิเล็คตรอนแทนออกซิเจน ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันประเภทนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่ไม่มีแหล่งคาร์บอนภายนอก โดยใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ (มั่นสิน, 2547)

แบคทีเรียที่พบในกระบวนกรองชีวภาพ

1. ไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying bacteria) ไนตริฟายอิงแบคทีเรียเป็นแบคทีเรียกลุ่ม Stricly acrobic chemolithotrophic bacteria พบได้ทั้งในดิน น้ำจืด น้ำทะเลหรือในน้ำเสีย ใช้ออกซิเจนในการหายใจ แหล่งคาร์บอนได้จากสารอินนทรีย์คาร์บอนไดออกซ์หรือไบคาร์บอเนต (ธงชัย, 2544) และใช้การออกซิไดซ์สารประกอบไนโตรเจนให้เป็นพลังงาน เจริญเติบโตช้า โดยเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส พีเอช 7.5-8.0 จะหยุดการเจริญเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า 42 องศาเซลเซียส ไนตริฟายอิงแบคทีเรียแบ่งการทำงานออกเป็น 2 กลุ่มคือ (สุธาสินี, 2546)

(1) แบคทีเรียออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia Oxidizing Bacteria: AOB) แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ แอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรียประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ beta-proteobacteria และ gamma-proteobacteria ที่รู้จักกันดีคือ สกุล *Nitromonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosococcus* และ *Nitrosolobus* ปริมาณและสกุลที่พบเป็นชนิดเด่นขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียในระบบบำบัด

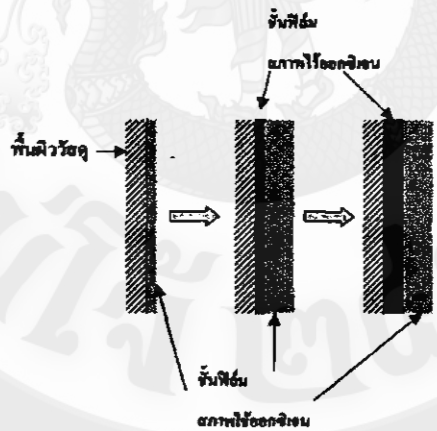
AOB เป็นแบคทีเรียชนิด obligate chemolithoautotroph แต่บางครั้ง AOB สามารถใช้สารประกอบอินทรีย์ได้ ปัจจุบันพบว่า autorophic AOB บางชนิดเมื่ออยู่ในสภาวะออกซิเจนต่ำสามารถใช้ไนไตรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนเกิดเป็น N_2O หรือ NO ตัวอย่างเช่น *Nitrosomonas eutropha* และ *Nitrosomonas europaea* สามารถทำให้เกิดได้ทั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันเมื่อเจริญในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด โดยสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็น ไนไตรต์ได้ภายใต้สภาวะ Anoxic

(2) แบคทีเรียออกซิไดซ์ไนโตรต์ (Nitrite Oxidizing Bacteria : NOB) ได้แก่แบคทีเรียสกุล *Nitrococcus* และ *Nitrobacter* ซึ่งเป็น alpha-proteobacteria และ *Nitrospira* โดยสกุลที่รู้จักกันดีคือ *Nitrobacter* แต่ในปัจจุบันพบว่าสกุลที่มีบทบาทมากในน้ำทะเลคือ *Nitrospira* แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถออกซิไดซ์ไนไตรต์ให้เป็นไนเตรตโดยใช้เอ็นไซม์ nitrite oxidoreductase ที่ membrane-bound ได้ ATP และ NADH

2. ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Denitrfying bacteria) ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Facultative anacrobic bacteria พบในดินแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย และในทะเล ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียมีหลายสกุลเช่น *Bacillus*, *Citrobacter*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Enterobacter*, *Halobacterium* และ *Pseudomonas* สามารถหายใจได้ทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้จึงต้องใช้สารอินทรีย์ได้แก่ เมทานอล เอทานอล อะซิเตท กลูโคส ฯลฯ เป็นแหล่งคาร์บอน) ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจนได้โดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งแบคทีเรียจะใช้ไนเตรต ไนไตรต์ ไนตริคออกไซด์ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและใช้เมทานอลเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการ (สุธาสินี, 2546)

ตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) สำหรับระบบกรองชีวภาพ

สุธาสินี (2546) กล่าวว่าหลักการของระบบกรองทางชีวภาพคือมีวัสดุที่เรียกว่าตัวกรองชีวภาพ Biofilter ซึ่งก็คือวัสดุที่มีแบคทีเรียยึดเกาะอยู่ เช่นไนตริฟายอิงแบคทีเรียจะสร้าง Lipopolysaccharide ออกมาเป็นเมือกจับกับพื้นผิวของตัวกรอง การยึดเกาะดังกล่าวอาจเรียกว่าการตรึง (Immobilization) เกิดเป็นชั้นเรียกว่าฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ที่สามารถนำมาใช้บำบัดน้ำเสียที่ไหลผ่านตัวกรองชีวภาพได้ แบคทีเรียในระบบบำบัดส่วนใหญ่จะเติบโตเพิ่มจำนวนในตัวกรองชีวภาพ โดยเฉพาะไนตริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งมีอัตราการเจริญช้า จึงต้องใช้การตรึงเซลล์แบคทีเรียกับวัสดุเพื่อนำมาใช้เป็นตัวกรองชีวภาพ การเกาะของแบคทีเรียบนผิวตัวกรองจะกลายเป็นชั้นหนาขึ้นเรื่อยๆ



ภาพที่ 3 การเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ที่เกาะบนตัวกรองชีวภาพที่ระยะเวลาต่างๆ
ที่มา: สุธาสินี (2546)

วัสดุที่ใช้เป็นตัวกรองชีวภาพ ต้องพิจารณาถึงด้านกายภาพของผิวตัวกรองซึ่งมีความสำคัญต่อการยึดเกาะของแบคทีเรีย ยิ่งใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก มีความพรุนหรือขรุขระ ปริมาณแบคทีเรียที่ยึดเกาะจะมากตามไปด้วย มุทิตาและคณะ (2546) ศึกษาผลของการใช้ตัวกรองชีวภาพที่มีลักษณะเป็นเส้นใยพลาสติกสานเป็นรูปท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร ในบ่อเลี้ยงปลาทับทิมขนาด 30x30x1.2 เมตร จังหวัด

ปทุมธานี โดยจัดให้มีบ่อควบคุมที่มีการเติมอากาศผ่านสายยางพลาสติก ที่วางพาดจากขอบบ่อด้านหนึ่งไปยังฝั่งตรงข้าม ตลอดระยะความยาวของบ่อเป็นแถวขนานกันจำนวน 10 แถว เป่าอากาศผ่านหัวทรายเติมอากาศที่ต่ออยู่กับสายท่ออากาศทุกๆ ระยะ 1.5 เมตร โดยที่หัวทรายทุกหัวจะถูกต่อท่อให้หย่อนลงไปในน้ำที่ระดับความลึกประมาณ 30 เซนติเมตร สำหรับบ่อชุดทดลองจะมีระบบเติมอากาศแบบเดียวกับบ่อชุดควบคุมทุกประการ แต่จะมีการผูกตัวกรองชีวภาพที่มีความยาวเส้นละ 27 เมตร กับไม้ไผ่ที่ปักอยู่เป็นแนวเพื่อตรึงให้ตัวกรองจมลงใต้ระดับผิวน้ำประมาณ 10 ซม. จัดเป็น 10 แถว วางตัวขนานในแนวเดียวกับท่อเติมอากาศ และจัดแนวให้ฟองอากาศที่พ่นออกมาจากหัวทรายขึ้นผ่านที่ตัวกรองชีวภาพ ปล่อยปลาทับทิมน้ำหนักเริ่มต้นตัวละ 5.9 กรัม ความหนาแน่น 11 ตัว/ตารางเมตร ลงเลี้ยงในบ่อทดลองทั้งสองบ่อ มีการตรวจวัดคุณภาพน้ำ (สารอาหาร พีเอช ออกซิเจนละลายน้ำ อัลคาลินิตี บีโอดี ความโปร่งแสงของน้ำ คลอโรฟิลล์-เอ แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์) ทุก 2 สัปดาห์ และสุ่มชั่งวัดปลาทุก 4 สัปดาห์ตลอดระยะเวลาทดลอง 140 วัน ผลการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถช่วยลดแอมโมเนียในน้ำของบ่อทดลอง ทำให้ปริมาณแอมโมเนียในบ่อชุดทดลองต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ($p< 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) แต่ประสิทธิภาพของตัวกรองยังไม่เพียงพอที่จะบำบัดแอมโมเนียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในบ่อ ส่วนคุณภาพน้ำอื่นๆ ของทั้งสองบ่ออยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ ผลผลิตปลาทับทิมที่ได้จากบ่อทดลองทั้งสองบ่อไม่แตกต่างกัน โดยได้ผลผลิตปลาในบ่อทดลอง 4,320 กิโลกรัม/ไร่ และในบ่อควบคุม 4,368 กิโลกรัม/ไร่ อัตราแลกเนื้อในบ่อทดลองเป็น 1.27 และในบ่อควบคุมเป็น 1.24

1. วัสดุตัวกลาง (Supporting Media)

สิทธิโชค (2547) กล่าวว่าวัสดุตัวกลาง (Supporting Media) คือ วัสดุที่ใส่ลงไปในระบบบำบัดเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและเจริญเติบโต วัสดุตัวกลางมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากวัสดุตัวกลางมีส่วนช่วยในการกักชีวมวลไว้ภายในระบบบำบัด โดยชีวมวลจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุตัวกลาง ในการเลือกวัสดุหรือชนิดของวัสดุตัวกลางจึงมีความสำคัญมาก ดังนั้นในการสร้างและออกแบบระบบบำบัดเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดำเนินงานสูงควรต้องคำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุตัวกลางที่จุลินทรีย์สามารถเกาะได้ดี อีกทั้งไม่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันหรือการไหลลัดวงจรภายในระบบ ซึ่งอาจจะเลือกใช้วัสดุต่างๆ ได้แก่ หิน ถ่านหิน อิฐ แก้ว ดินเหนียว เปลือกหอย และวัสดุสงเคราะห์พลาสติก เป็นต้น

(1) วัสดุตัวกลางสังเคราะห์

ปัจจุบันวัสดุตัวกลางสังเคราะห์กำลังได้รับความนิยมอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีความเข้มข้นสูง วัสดุตัวกลางสังเคราะห์สามารถผลิตได้จากวัสดุต่างๆ หลายชนิด เช่น พลาสติก เซรามิค และโลหะ เป็นต้น ขนาดและรูปร่างของวัสดุสังเคราะห์จะมีหลากหลายชนิด เช่น ทรงกระบอก ทรงกลม รูปรังผึ้ง ขนาดตั้งแต่ชิ้นขนาดเล็กๆ จนกระทั่งถึงขนาดชิ้นใหญ่ก็ได้ ไม่ว่าจะขนาดและรูปร่างอย่างไรทุกแบบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก มีช่องว่างมากน้ำหนักเบาและไม่อุดตัน

(2) วัสดุตัวกลางธรรมชาติ จากคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางข้างต้น นอกจากวัสดุตัวกลางสังเคราะห์แล้วยังสามารถนำวัสดุตามธรรมชาติที่มีคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมมาใช้เป็นวัสดุตัวกลางธรรมชาติเพื่อทดแทนวัสดุตัวกลางสังเคราะห์ เพราะวัสดุตัวกลางสังเคราะห์ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจตามมา ได้แก่ ปัญหาขยะมูลฝอยพลาสติก และปัญหากรขาดดุลการค้า เป็นต้น วัสดุตัวกลางธรรมชาติธรรมชาติบางชนิดมีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือมากกว่าวัสดุตัวกลางสังเคราะห์ ตัวอย่างวัสดุตัวกลางธรรมชาติ ได้แก่ หิน กรวด อิฐหัก ไม้ ไม้ไผ่ ดินเหนียว กระเบื้องเผา เชือกและเปลือกหอย เป็นต้น

Mohammad and Emmanuel (2000)ได้ทดสอบประสิทธิภาพของ biofilter media (polypropylene plastic chips และ polyethylene blocks) ซึ่งเป็นการทดสอบเป็นเวลา 172 วัน สำหรับความสัมพันธ์ในการบำบัดแอมโมเนีย, คุณภาพน้ำ, การสะสมของเสีย, ต้นทุน, การเจริญเติบโต, การเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ, อัตราการรอดและการผลิตพันธุ์ปลา ผลที่ได้นั้นแสดงอัตราไนตริฟิเคชั่น (กระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำให้เป็นไนไตรท์ และไนเตรท โดยอาศัยทำหน้าที่ของแบคทีเรีย) และparameter คุณภาพน้ำไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) ระหว่างสื่อตัวกรองทั้ง 2 สื่อตัวกรองทั้ง 2 มีประสิทธิภาพในการดึงเอาความเป็นพิษของแอมโมเนียและการรักษาคุณภาพ parameter ที่มีการยอมรับและมีขีดจำกัดความปลอดภัยสำหรับการเจริญเติบโตและการรอด อย่างไรก็ตามจะมีการประหยัดมากกว่าเมื่อใช้ plastic chips ที่มีราคาถูก ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) เมื่อมีการทดลองระหว่าง chip และ block ในค่าเฉลี่ยของน้ำหนักตัว (264.1 และ 267.4 g. , ตามลำดับ) อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (1.17 และ 1.18 g. /ปลา/วัน) , FCR (2.04 และ 1.98 , ตามลำดับ)และอัตราการรอด(97.6 และ 98.2% , ตามลำดับ) กำลังการผลิตเฉลี่ยของปลา tilapia 215.0 kg.

2. ฟิล์มชีวภาพ (Biofilms) สิทธิโชค (2547) กล่าวว่าฟิล์มชีวภาพหรือชีวฟิล์ม หมายถึง กลุ่มเซลล์ของจุลินทรีย์และผลิตภัณฑ์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นและขับออกมานอกเซลล์ (Extracellular Polymer) โดยยึดเกาะอยู่บนผิวของของแข็ง (Substratum) ซึ่งของแข็งที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะของจุลินทรีย์ อาจเป็นสิ่งมีชีวิตหรือไม่มีชีวิตก็ได้

3. กระบวนการเกิดฟิล์มชีวภาพ จากการศึกษาสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่สามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ จุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ และจุลินทรีย์ที่เกาะติดกับพื้นผิววัสดุ (Fixed film) ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะกับตัวกลางนั้น มีความสามารถเกาะติดกับพื้นผิววัสดุได้ทุกสภาพ โดยจะมีความสามารถในการเกาะติดกับวัสดุที่มีความหยาบได้ดีกว่าพื้นผิวที่เรียบ ซึ่งการเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพบนผิวของตัวกลางเป็นผลมาจากกระบวนการทางกายภาพ และชีววิทยา ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การขนส่ง (Transportation) และการดูดซับ (Absorption) ของโมเลกุลสารอินทรีย์ไปยังผิวของตัวกลาง

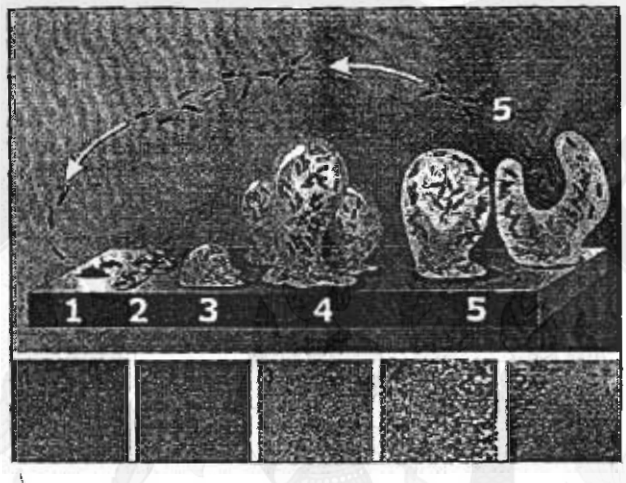
ขั้นตอนที่ 2 การขนส่ง (Transportation) ของเซลล์จุลินทรีย์ไปยังผิวของตัวกลาง

ขั้นตอนที่ 3 การเกาะยึด (Attachment) ของจุลินทรีย์

ขั้นตอนที่ 4 การแปลงรูป (Transformation) ของจุลินทรีย์เป็นฟิล์มชีวภาพ ณ บริเวณผิวของตัวกลาง

ขั้นตอนที่ 5 การหลุด (Detachment) ของฟิล์มชีวภาพบางส่วน เนื่องมาจากแรงเฉือนของน้ำ

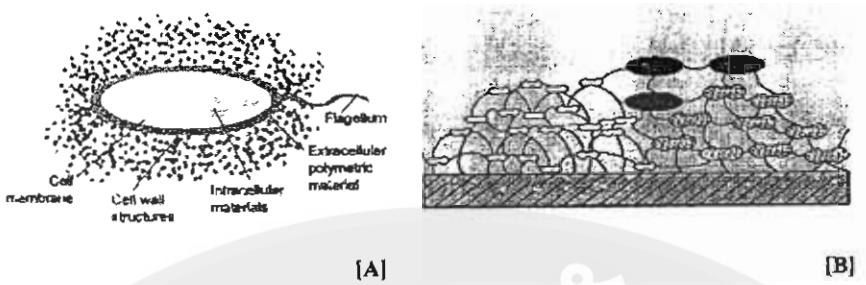
คุณสมบัติของฟิล์มชีวภาพที่เกาะบนผิวของวัสดุต่างๆ นั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการเช่น ชนิดของสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำ ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านผิวของวัสดุ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ลักษณะผิววัสดุที่ฟิล์มชีวภาพยึดเกาะ เป็นต้น



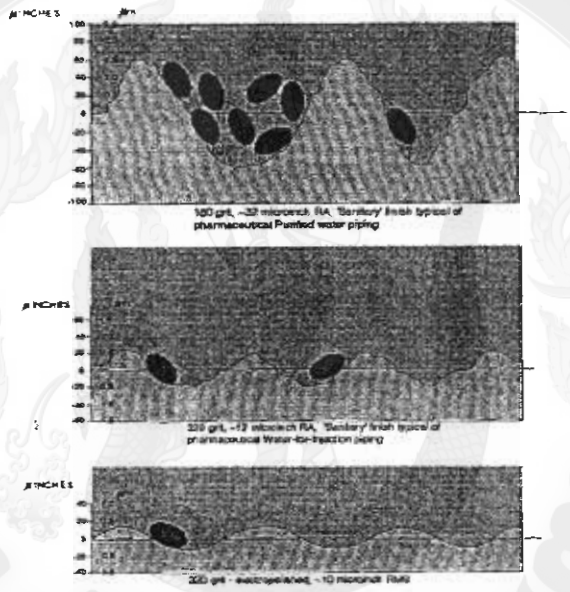
ภาพที่ 4 กระบวนการเกิดฟิล์มชีวภาพ ที่มา: สิทธิโชค (2547)

4. การเกาะยึดของฟิล์มชีวภาพ

กลไกในการเกาะยึดของจุลินทรีย์มีด้วยกันหลายรูปแบบ แต่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์จะสร้างเส้นใยขนาดเล็กรอบตัวเซลล์ เส้นใยเหล่านี้จะเกาะจับกันแน่นกับเส้นใยของเซลล์อื่นๆ ทำให้จุลินทรีย์สามารถเกาะติดหนาเป็นฟิล์มบนผิวตัวกลางได้ เส้นใยเหล่านี้ประกอบด้วย Polysaccharides และ Glycoprotein เรียกเส้นใยเหล่านี้ว่า Glycocaolyx เป็นเส้นใยสายโมเลกุลน้ำตาลชนิดที่มีกิ่ง (Branching sugar molecules) ตัวเซลล์ของจุลินทรีย์จะฝังจมอยู่ในเส้นใยดังกล่าวการรับสารอาหารและอากาศจะซึมผ่านเส้นใย โดยที่เส้นใยมีเอนไซม์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ทำให้โมเลกุลเล็กลงก่อนที่จะเข้าสู่เซลล์จุลินทรีย์ และจุลินทรีย์จะสามารถการเกาะติดกับวัสดุที่มีความหยาบได้ดีกว่าพื้นผิวที่เรียบ



ภาพที่ 5 (A) เซลล์ของจุลินทรีย์ (B) ลักษณะการยึดเกาะของจุลินทรีย์ ที่มา: สิทธิโชค (2547)



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบการเกาะยึดของจุลินทรีย์บนวัสดุที่มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกัน ที่มา: สิทธิโชค (2547)

5. การดำรงชีพของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพ

เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิววัสดุ จะนำสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เข้าสู่เซลล์ เช่น สารอาหารออกซิเจน และตัวรับอิเล็กตรอน (Electron accepter) พลังงานที่ได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึม จุลินทรีย์จะนำไปใช้สร้างเซลล์ใหม่ ซ่อมแซมโครงสร้างภายในเซลล์ การเจริญเติบโต และสร้างผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่เซลล์สร้างขึ้นนี้มีทั้งส่วนที่คงอยู่ในฟิล์มชีวภาพ เช่น Extracellular polysaccharide และแพร่ออกสู่ชั้นของเหลวง

กระบวนการต่างๆ จะสามารถดำเนินต่อไปได้ เซลล์จะต้องอยู่ในที่ที่มีสารอาหารเพียงพอ ฟิล์มชีวภาพที่อยู่ในสภาวะที่มีสารอาหารน้อยจะบางกว่าฟิล์มชีวภาพที่อยู่ในที่ที่มีสารอาหารมาก ถ้าบริเวณผิวของฟิล์มชีวภาพมีความเข้มข้นของสารอาหารต่ำ สารอาหารจะแพร่ลงไปในฟิล์มชีวภาพได้ไม่ลึกมาก ทำ

ให้เซลล์ที่อยู่ลึกลงไปไม่สามารถดำรงชีพได้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ฟิล์มชีวภาพบาง แต่ถ้าที่ผิวฟิล์มชีวภาพมีสารอาหารมากเพียงพอที่จะเกิการสะสมของฟิล์มชีวภาพขึ้น ทั้งจากการแบ่งเซลล์ของเซลล์ที่เกาะอยู่เดิมและเซลล์ใหม่ที่เข้ามาเกาะ เมื่อถึงจุดความหนาวิกฤติ (Critical thicknes) ก็จะเกิดการหลุดลอกของฟิล์มชีวภาพ

6. ความหนาแน่นของจุลินทรีย์

เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มชีวภาพจะประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ คือประมาณ 87-69% โดยน้ำหนัก และเซลล์จุลินทรีย์ยังประกอบด้วยน้ำสูงถึง 90% ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของฟิล์มชีวภาพจึงใกล้เคียงกับน้ำ ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพ จะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่าน อุณหภูมิ และชั้นความหนาของฟิล์มชีวภาพ

การเกาะติดของฟิล์มชีวภาพเมื่อมีความหนามาก ลักษณะชั้นของฟิล์มชีวภาพอาจแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ แอโรบิค และแอนแอโรบิค ดังแสดงในโดยความหนาของชั้นแอโรบิคประมาณ 250-300 ไมโครเมตร โดยความหนาของชั้นนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ซึ่งฟิล์มชีวภาพในระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ การกำจัดสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นเฉพาะผิวนอกบางๆ เท่านั้น ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกำจัด สามารถทำได้โดยเพิ่มความหนาของชั้นแอโรบิค

7. กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ของฟิล์มชีวภาพ ในการกำจัดสารอินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพ จะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. การขนส่งสารให้อิเล็กตรอนและออกซิเจน โดยจะถ่ายเทผ่านผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและผิวหน้าของฟิล์มชีวภาพ
2. สารอินทรีย์และออกซิเจนละลายน้ำแพร่ (Diffusion) ผ่านผิวสัมผัสสู่ชั้นของฟิล์มชีวภาพ
3. เกิดปฏิกิริยาชีวเคมี มีการใช้สารอินทรีย์และออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ในชั้นของฟิล์มชีวภาพ
4. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาชีวเคมี คือ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำไปยังผิวของฟิล์มชีวภาพที่สัมผัสกับของเหลว และจะแพร่สู่ขั้นของของเหลว

แต่อย่างไรก็ตามในน้ำเสีย จะมีอนุภาคของสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถแพร่กระจายได้ปะปนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งอนุภาคของสารอินทรีย์นี้จะถูกกำจัดโดยขั้นแรกจะเข้าไปเกาะที่ผิวของฟิล์มชีวภาพ และจะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์อยู่ภายนอกฟิล์มชีวภาพ เมื่อกลายเป็นสารละลายถึงสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นของฟิล์มชีวภาพต่อไป (สิทธิโชค, 2547)

สุวิมล (2545) ได้ทดลองพัฒนาระบบบำบัดไนเตรทสำหรับใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม โดยใช้ระบบบำบัดแบบท่อยาวที่ภายในบรรจุด้วยวัสดุพลาสติกทรงกลมสำหรับเป็นที่ยึดอาศัยของแบคทีเรีย งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 การทดลองโดยการทดลองแรกเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรีย อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันและการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟต์ (H[subscript 2]S) ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ที่สร้างขึ้นจากพลาสติกอคริลิคใสภายในบรรจุวัสดุกรองทรงกลมและน้ำเสียเทียมที่มีความเข้มข้นของไนเตรทตั้งแต่ 20-60 mgNO[subscript 3]-N/L หลังจากการเติมเมธานอลเป็น

แหล่งคาร์บอนพบว่าแบคทีเรียในระบบสามารถลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ลงได้ด้วยอัตรา 1.252.30 microgramO[subscript 2]/bioball/h และเมื่อ DO ลดลงต่ำกว่า 1 mgO[subscript 2]/L จึงตรวจพบการลดลงของไนเตรทโดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเท่ากับ 1.46 13.69 microgramNO[subscript 3]-N/bioball/h และค่าศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 mV และเมื่อค่า ORP ต่ำกว่า 300 mV จะเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นในระบบ สำหรับการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในระบบบำบัดไนเตรทแบบท่อความยาว 25 m ซึ่งภายในบรรจุวัสดุกรองทรงกลมโดยอาศัยแบคทีเรียในส่วนต้นของท่อในการลดปริมาณออกซิเจนให้ต่ำลงจนถึงระดับที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ในส่วนปลายของท่อ พบว่ายังมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากแม้ว่าระบบจะสามารถลดปริมาณออกซิเจนให้ลดลงต่ำในส่วนปลายท่อได้ แต่เนื่องจากท่อที่สั้นเกินไปทำให้มีระยะเวลากักเก็บน้ำในท่อไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ในการทดลองส่วนที่ 3 ได้เพิ่มความยาวของระบบบำบัดแบบท่อขึ้นเป็น 50 m พบว่าระบบสามารถบำบัดไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในช่วงแรกที่เดินระบบโดยมีระยะเวลากักเก็บเท่ากับ 2.3 ชั่วโมง และมีการเติมเมธานอลเข้าสู่ระบบจะทำให้เกิดการลดลงของไนเตรทแต่เกิดการสะสมไนไตรท์ขึ้นมาแทนซึ่งแสดงว่าเป็นปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลากักเก็บเป็น 4.2 ชั่วโมง พบว่าระบบสามารถบำบัดไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์โดยมีค่า ORP ในระหว่างที่เกิดปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันอยู่ระหว่าง 0 ถึง 200 mV และเมื่อนำระบบบำบัดไนเตรทมาต่อเข้ากับบ่อเลี้ยงกุ้งขนาด 352 ลิตร โดยปรับตั้งสภาวะของระบบบำบัดตามการทดลองที่ได้ทำไว้ก่อน พบว่าระบบบำบัดแบบท่อยาวสามารถบำบัดไนเตรทได้โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด 84-97% โดยเป็นปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ และระหว่างการบำบัดไม่พบการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ รวมทั้งน้ำที่ผ่านออกจากระบบบำบัดไม่มีผลกระทบต่อกุ้งที่เลี้ยงอยู่ในถัง

ระบบการปลูกพืชไฮโดรโพนิกส์

1. ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินมีหลายหลายระบบ ได้แก่

1.1 ระบบเอ็นเอฟที (Nutrient Film Technique, NFT) เป็นระบบที่ให้สารละลายไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบางๆ เป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจอย่างมากเป็นการปลูกพืชโดยรากแช่อยู่ในสารละลายโดยตรง สารละลายจะไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (โดยทั่วไปมักกำหนดให้น้ำที่ไหลผ่านมีความหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร) สารละลายจะไหลหมุนเวียนผ่านรากตลอดเวลา ระบบเอ็นเอฟทีสามารถแบ่งได้เป็น การปลูกในราง ปลูกในร่อง ปลูกในท่อ

1.2 ระบบดีเอฟที (Deep Floating Technique, DFT) เป็นระบบที่ปลูกพืชโดยรากแช่อยู่ในสารละลายลึกประมาณ 15-20 เซนติเมตร โดยจะมีการปลูกพืชบนแผ่นโฟม หรือวัสดุที่ ลอยน้ำได้ เพื่อยึดลำต้นแต่จะปล่อยให้รากเป็นอิสระในน้ำ ระบบนี้ไม่มีความลาดเอียงเป็นระบบที่มีการหมุนเวียนสารละลายโดยการใช้ปั๊มดูดสารละลายจากถังพักขึ้นมาใช้ใหม่ในระบบ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับระบบน้ำที่ใช้ในการผลิตผักระบบนี้อาจมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบไฮโดรโพนิคส์ลอยน้ำ

1.3 ระบบดีอาร์เอฟ (Dynamic Root Floating, DRF) เป็นระบบการปลูกพืชที่พัฒนามาจากระบบของ ดร.เกอริค (Prof. Dr.William F.Gericke) ที่เน้นการปลูกพืชให้รากพืชแช่อยู่ ในน้ำส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งสร้างรากอากาศเพื่อช่วยในการหายใจ โดยจะทำให้พืชที่ปลูกในระบบนี้สามารถเจริญเติบโตได้ดีในอุณหภูมิของสารละลายที่สูงมากกว่าระบบอื่นๆ (อิทธิสุนทร และคณะ, 2544)

สุภาพร (2544) กล่าวว่า การปลูกผักแบบไฮโดรโพนิคส์เป็นลักษณะของการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินแยกเป็น 2 ประเภทคือ การปลูกพืชในน้ำยาเรียกว่า ไฮโดรโพนิคส์ และการปลูกผักในวัสดุปลูกชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช้ดินเรียกว่า ซอยเลส การปลูกผักโดยไม่ใช้ดินเป็นการปลูกผักโดยให้รากอยู่ในวัสดุปลูกที่ไม่ใช่ดิน ได้แก่ การปลูกให้รากแช่อยู่ในน้ำ ปลูกให้รากอยู่ในอากาศ และปลูกให้รากอยู่ในวัสดุปลูกอื่นๆ ได้แก่ วัสดุอินทรีย์ เช่น ขุยมะพร้าว ขี้เถ้าแกลบ ขี้เลื่อย วัสดุผสมต่างๆ และวัสดุอนินทรีย์ เช่น ทราย กรวด ฟองน้ำ ใยหิน เพอไลท์ และเวอร์มิคูไลท์ เป็นต้น ซึ่งการปลูกในวัสดุปลูกที่ไม่ใช่ดินเหล่านี้ ต้องให้สารละลายธาตุอาหารแก่พืชอย่างพอเหมาะ และต่อเนื่องจึงจะทำให้พืชเจริญเติบโต การปลูกผักในลักษณะนี้ถือเป็นการปลูกพืชแบบไร้ดินอีกวิธีหนึ่ง ไฮโดรโพนิคส์ เป็นการปลูกพืชไร้ดินในรูปแบบของการปลูกพืชให้รากพืชแช่อยู่ในน้ำหรือสารละลายธาตุอาหารพืช การปลูกพืชไม่ใช้ดิน (hydroponics) เป็นการปลูกพืชที่ไม่ใช้วัสดุปลูกเป็นการปลูกพืชลงบนสารละลายธาตุอาหารโดยให้รากพืชสัมผัสกับสารอาหารโดยตรง

2. ปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิกส์

2.1 อุณหภูมิ พืชแต่ละชนิดต้องการอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันทำให้สามารถจำแนกพืชผักตามนิสัยการเจริญเติบโตในสภาพอุณหภูมิที่ต่างกันเป็น 2 พวก คือ พืชผักฤดูร้อน และพืชผักฤดูหนาว อุณหภูมิมีผลต่อสรีรวิทยาของพืช กระบวนการหายใจ และ การสังเคราะห์แสง ในสภาพอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเกินไปมีผลต่อเอนไซม์ในปฏิกิริยาต่างๆ ในพืช อุณหภูมิที่ต่ำทำให้พืชผักมีการสะสมน้ำตาลสูงขึ้นปริมาณเส้นใยลดลง ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิสูงพืชผักจะเจริญเติบโตเร็วเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีสูงขึ้นผักจึงแก่เร็ว

2.2 แสง มีลักษณะเป็นอนุภาค แต่ละอนุภาคเรียกว่า โฟตอน ซึ่งให้พลังงานในระดับ ต่างๆ กัน ตามความยาวคลื่นของแสง แสงส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อการสังเคราะห์แสงมีความยาวคลื่น อยู่ระหว่าง 400-700 นาโนมิเตอร์ (nm) ซึ่งเป็นแสงที่มองด้วยตาเปล่า เมื่อแสงตกกระทบใบพืชจะถูกดูดซับไว้โดยคลอโรฟิลล์ และพืชมีความสามารถดูดซับแสงสีต่างๆ ไม่เท่ากัน เมื่อคลอโรฟิลล์ ดูดซับแสงไว้จะเปลี่ยนโฟตอนไปเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการสังเคราะห์แสง เพื่อสร้างอาหาร โดยเปลี่ยนจากโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำไปเป็นคาร์โบไฮเดรต คือ แป้ง และน้ำตาล รวมทั้งปลดปล่อยออกซิเจนออกมา

2.3 ปริมาณน้ำที่พืชได้รับ การใช้น้ำของพืชเป็นผลมาจากการเปิด-ปิดของปากใบ หรือพืชต้องการน้ำเพื่อการคายน้ำและลำเลียงธาตุอาหาร พืชแต่ละชนิดมีความต้องการน้ำในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน ฤดูกาลมีผลต่อการใช้น้ำของพืช ในสภาพอากาศร้อนและมีแสงแดดจัด พืชมีการคายน้ำมากกว่าในสภาพที่แสงน้อยและอุณหภูมิต่ำ ในการปลูกพืชไม่ใช้ดินในระบบปิดการคายน้ำของพืชจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร ในสภาพที่พืชคายน้ำมากแต่มีการใช้ธาตุอาหารน้อย

สารละลายในระบบจะมีความเข้มข้นสูงขึ้น ในทางกลับกันหากในช่วงที่พืชดายน้ำน้อยแต่มีความต้องการธาตุอาหารมากทำให้ความเข้มข้นของสารอาหารน้อยลง

2.4 ความชื้นในอากาศ ในสภาพโรงเรือนที่อากาศถ่ายเทไม่ดี ความชื้นภายในโรงเรือนจะสูงกว่าภายนอก ทำให้ปากใบปิดพืชดายน้ำน้อยลง การดูดใช้ธาตุอาหารและการสังเคราะห์แสงจึงลดลง และภายใต้สภาพดังกล่าวยังเหมาะสมสำหรับการการเจริญและการแพร่กระจายของเชื้อสาเหตุโรคหลายชนิดทำให้เกิดการระบาดของโรคอย่างรุนแรงโดยเฉพาะโรคทางใบ

2.5 ลม และการถ่ายเทอากาศ ในกระบวนการเจริญเติบโตของพืช พืชตรึงคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศใช้ในกิจกรรมการสังเคราะห์แสง เพื่อให้ได้แป้งและน้ำตาลและปลดปล่อยออกซิเจนสู่อากาศ ขณะเดียวกันยังใช้ออกซิเจนในกระบวนการหายใจ เพื่อให้ได้พลังงานและปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ในช่วงเวลากลางวันพืชมีการสังเคราะห์และใช้คาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าที่ปลดปล่อยออกมา อัตราความเร็วลมที่เหมาะสมทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศบริเวณต้นพืชไม่ให้มีการสะสมของก๊าซที่ปลดปล่อยออกมา แต่หากกระแสลมแรงเกินไปทำให้เกิดความเสียหายแก่ต้นพืช หรือทำความเสียหายแก่โรงเรือนได้

2.6 ออกซิเจน พืชต้องการออกซิเจนเพื่อการหายใจให้ได้พลังงานสำหรับดึงดูด ธาตุอาหาร และน้ำในสภาพการปลูกในดินหรือปลูกในวัสดุ เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือวัสดุปลูกทำให้สามารถระบายถ่ายเทอากาศได้ รากพืชจึงมีอากาศหายใจแต่สำหรับการปลูกใน สารละลายรากพืชแช่อยู่ในน้ำตลอดเวลา การหายใจต้องอาศัยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อยและหมดได้รวดเร็วทำให้เกิดความเสียหายแก่รากพืชได้หากไม่ได้รับการเติมอากาศแก่สารละลายอย่างเพียงพอ สำหรับการเติมอากาศในสารละลายทำได้โดยการใช้ปั๊มลมเป่าอากาศเข้าในสารละลาย แต่ไม่จำเป็นสำหรับระบบที่มีการไหลหมุนเวียนสารละลายผ่านรากพืชและระบบแอโรโพนิคส์

2.7 ธาตุอาหารพืช ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชมีด้วยกัน 16 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P)โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) ซัลเฟอร์ (S) โบรอน (B) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) โมลิดินัม (Mo) คลอรีน (Cl) โดย 3 ธาตุแรกพืชได้จากน้ำและอากาศ ส่วนธาตุอื่นๆ ที่เหลือพืชได้จากดิน หากเป็นการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินจะต้องเตรียมให้แก่พืชในรูปสารละลายธาตุอาหาร

2.8 บทบาทของโรงเรือน ในการปลูกพืชไม่ใช้ดินปัจจัยภายนอกที่เกี่ยวข้องกับ การเจริญเติบโตของพืช หากสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านั้นให้เหมาะสมกับชนิดและพันธุ์ ทำให้พืชแสดงศักยภาพของพันธุกรรมได้อย่างสมบูรณ์ ปัจจัยของแสง อุณหภูมิ และอากาศมีความสำคัญต่อการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน โดยเฉพาะในเขตหนาวซึ่งมีข้อจำกัดทั้ง 3 ปัจจัย จึงทำให้มีผู้ให้ความสนใจศึกษากันมาก เพื่อหาแนวทางการส่งเสริมให้พืชได้ผลผลิตสูงขึ้น (กิตติ, 2547)

การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบอะควาโปนิคส์

เป็นการเลี้ยงปลาในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดร่วมกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิคส์ เป็นระบบการใช้ปัจจัยการผลิตที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารที่เกิดจากการขับถ่ายของเสียในปลามาเป็นธาตุอาหารของพืช เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของเกษตรกรที่มีพื้นที่ทำกินขนาดเล็กหรือมีปัญหา พื้นที่ขาดความอุดมสมบูรณ์ มีรูปแบบ ที่หลากหลายของชนิดสัตว์น้ำและชนิดพืช รวมถึงวิธีการที่แตกต่างกัน เป็นระบบที่ประยุกต์มาจากความสัมพันธ์ของปลากับสิ่งแวดล้อม โดยการทำให้ของเสียจากการเลี้ยงปลาซึ่งอยู่ในรูปของไนโตรเจนประมาณ 70-75 เปอร์เซ็นต์ถูกกำจัดออกภายในระบบ และถูกนำไปเป็นสารอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโตของพืช แทนการถ่ายเทน้ำจากบ่อเลี้ยงปลาเพื่อกำจัดของเสียออกไป ในระบบบำบัดน้ำพืชจะทำหน้าที่ดึงไนโตรเจนด้วยกลไกต่าง ๆ เช่น การดูดซึมแอมโมเนีย หรือไนเตรต การระเหยของแอมโมเนีย การตกตะกอนของอนุภาคไนโตรเจน เป็นต้น ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบระบบปิดหรือระบบหมุนเวียน เป็นระบบที่มีการใช้ประโยชน์ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าเพราะระบบดังกล่าวสามารถรักษาความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชให้อยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการ ของระบบการปลูกพืชไฮโดรโพนิคส์ได้ โดยในทางทฤษฎีปริมาณธาตุอาหารในอาหารสัตว์สามารถปรับปรุงเพื่อให้เกิดความสมดุลกับพืชได้ อาหารสัตว์ดังกล่าวนี้จะคงสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างปลากับพืช และความเข้มข้นของสารอาหารที่พืชใช้เหมาะสมที่สามารถรักษาไว้ได้ในระยะเวลาที่ยาวนาน โดยไม่จำเป็นต้องมีการเติมธาตุอาหารเสริม อย่างไรก็ตามอาหารสัตว์ที่ใช้จะต้องทำให้ปลามีการเติบโตได้ในอัตราที่ยอมรับได้ การเลี้ยงปลาระบบปิดจะมีของเสียเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกวัน ซึ่งของเสียเหล่านี้มาจากสิ่งขับถ่ายที่ปลาขับถ่ายออกมา และมาจากเศษอาหารที่เหลือสะสมอยู่ในบ่อเลี้ยงปลา การกำจัดของเสียขั้นต้นในสามารถทำได้โดยการใช้การกรองทางกายภาพ ส่วนของเสียที่ผ่านการกรองกายภาพจะถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันและไนตริฟิเคชันด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในธรรมชาติ เกิดเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นสารพิษ เช่น แอมโมเนีย และไนไตรท์ ของเสียเหล่านี้เมื่อสะสมอยู่จนถึงระดับหนึ่งจะเกิดความเป็นพิษต่อปลาได้ ในขณะเดียวกันแอมโมเนียและไนไตรท์ก็ถูกทำลายได้ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน อีกทั้งปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีแนวโน้มเปลี่ยนจากการเลี้ยงในระดับความหนาแน่นต่ำซึ่งนิยมทำในระบบเปิดโดยใช้น้ำจากธรรมชาติเข้าสู่การเลี้ยงแบบพัฒนา (ระดับความหนาแน่นสูง) และในระบบปิดซึ่งมีการบำบัดและหมุนเวียนน้ำอยู่ภายในระบบ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดมีข้อดีคือสามารถเพิ่มผลผลิต ป้องกันการติดโรค และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยง แต่การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบนี้มักประสบปัญหาแอมโมเนียสะสมในระดับความเข้มข้นสูง ซึ่งมี

สาเหตุจากการให้อาหารในปริมาณมาก การขับถ่ายของสัตว์น้ำ และจากการย่อยสลายของโปรตีนในอาหารที่เหลือจากการบริโภคโดยแบคทีเรียภายในบ่อเลี้ยง

ระบบการเลี้ยงปลาร่วมกับระบบการปลูกพืชไฮโดรโพนิคส์

Anon (751) กล่าวว่า Aquaponic system คือ ระบบการเลี้ยงปลาร่วมกับการปลูกพืชไร้ดินโดยของเสียจากการเลี้ยงปลาจะถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรียกลุ่ม nitrification ซึ่งสามารถออกซิไดส์ แอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์และจากไนไตรท์ให้เป็นไนเตรต ซึ่งพืชสามารถดูดซับไนเตรตที่ละลายอยู่ในน้ำได้ Aquaponic system นี้กำลังเป็นที่นิยมเป็นการเพิ่มผลผลิตทางพาณิชย์ ปลาที่นิยมเลี้ยง ในระบบคือ ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) นอกจากนี้ยังมีปลาเรนโบเทราต์ ปลาคาร์พ และ ปลาดุก ส่วนพืชที่นิยมปลูกในระบบนี้คือ ผักกาดหอม ผักสลัด รวมทั้งพืชเศรษฐกิจด้วยเช่น มะเขือเทศ แตงกวา พริกไทย และพืชจำพวกแดง

Rakocy *et al.* (1993) พบว่า การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนแบบปิดที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำน้อยมาก หรือแทบไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเลย พวกธาตุอาหารในรูปที่ละลายในน้ำจะมี การสะสมอยู่ในปริมาณที่มาก และมีระดับความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับระดับความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ใช้กัน ในสารละลายสำหรับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน และยังรายงานอีกว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนแบบปิดจะเกิดการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนในปริมาณที่สูง สอดคล้องกับการศึกษาของ Chen and Lin. (1995) ที่พบว่าสัตว์น้ำจะขับถ่ายของเสียออกมาในรูปของสารละลายต่างกันหลายรูป แต่ที่ขับถ่ายออกมามากที่สุดจะอยู่ในรูปแอมโมเนีย-ไนโตรเจน โดยคิดเป็น 60-70 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ยูเรีย ยูริค ไนไตรท์-ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจน โดยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรท์-ไนโตรเจนมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ แต่ไนเตรต-ไนโตรเจนจะมีความเป็นพิษต่ำ และยังเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับพืชชั้นสูงได้ด้วย

Lewis *et al.* (1978) ได้เลี้ยงปลาในระบบกรองชีวภาพ และการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (มะเขือเทศ) มารวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างเป็นระบบการเลี้ยงหมุนเวียนน้ำแบบปิดขึ้น โดยทำการเลี้ยงปลา Channel catfish พบว่า ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีทุกด้านไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำ ผลผลิตของมะเขือเทศ การเจริญเติบโต และอัตราการรอดของปลา และยังกล่าวว่าระบบกรองชีวภาพนั้นเป็นตัวช่วยของเสียต่างๆ ให้เป็นไนเตรต-ไนโตรเจน และฟอสเฟต ซึ่งจะถูกนำไปใช้โดยมะเขือเทศต่อไป ปริมาณผลผลิตของมะเขือเทศที่จากการศึกษาครั้งนี้ มีค่าสูงกว่าการปลูกมะเขือเทศโดยวิธีการทั่วๆ ไป

Nair *et al.* (1985) กล่าวว่า การพัฒนานำวิธีการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินมาผสมผสานกับระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดถือว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมอย่างยิ่ง เพราะธาตุอาหารที่เกิดจากของเสียจะถูกพืชนำไปใช้ในขบวนการเจริญเติบโตได้เป็นอย่างดี แต่ยังพบว่าบ่อยครั้งจะเกิดปัญหาการขาดแคลนธาตุอาหารและพืชให้ผลผลิตต่ำ ในช่วงระยะเวลาที่ศึกษาโดยสาเหตุมาจากปริมาณธาตุอาหารในสารละลายไม่เพียงพอและเกิดการสะสมของสารประกอบในรูปของเกลือมากเกินไป เพราะฉะนั้นการจะควบคุมระดับความเข้มข้นของธาตุอาหารในสารละลายที่ใช้ปลูกพืชจะทำได้ยาก ถ้าคุณภาพของอาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไม่แน่นอน (Rakocy *et al.*, 1993)

Chen and Lin (1995) กล่าวว่า การเลี้ยงปลาระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดสามารถผสมผสานร่วมกับการปลูกพืชไม่ใช้ดินที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ในสารละลายที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชรวมกันเรียกได้ว่า Aquaponics system น้ำในบ่อเลี้ยงปลาจะไหลมาพักในถังตกตะกอน จากนั้นดูดน้ำจากถังตกตะกอนผ่านระบบกรองชีวภาพโดยผ่านใยแก้วกรอง จากนั้นจะไหลผ่านวัสดุกรองที่ใช้น้ำที่ผ่านระบบกรองชีวภาพจะไหลไปตามท่อเพื่อผ่านรากพืชแล้ว รากพืชจะดูดธาตุอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตน้ำที่ผ่านไปยังรากพืชจะถูกส่งต่อไปยังบ่อเลี้ยงปลาอีกครั้ง (Lewis *et al.*, 1978)

ดังนั้น การศึกษาในระบบดังกล่าวนี้จึงจำเป็นที่จะต้องทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำจากการเลี้ยงปลาที่เลี้ยงในระบบ ต้องทราบถึงขนาดและจำนวนของปลาที่มีผลต่อปริมาณธาตุอาหารจากบ่อเลี้ยงปลา สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างการปลูกพืชผักไฮโดรโพนิคส์กับการเลี้ยงปลา เพื่อนำมาซึ่งข้อมูลที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทาง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพยิ่งขึ้นยังขาดข้อมูลหรือเทคนิคที่เกษตรกรปฏิบัติได้ โดยผู้วิจัยได้มีความคาดหวังว่าผลการวิจัยที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ได้กับเกษตรกร ผู้ประกอบการ และผู้ที่สนใจในธุรกิจการเลี้ยงปลาดุกให้มีความยั่งยืน ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ในการเพิ่มรายได้ของเกษตรกรและผู้ประกอบในระหว่างการเลี้ยงปลาดุกได้เป็นอย่างดี และสามารถเพิ่มผลตอบแทนของการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

1.1 การจัดการหน่วยทดลอง

ตารางที่ 1 การจัดหน่วยทดลอง

ชุดการทดลอง	อัตราการปล่อย/ตารางเมตร	ปลูกผักแบบไม่ใช้ดิน
1	50	ไม่มี
2	50	มี
3	100	มี
4	150	มี

1.2 ขั้นตอนและการเตรียมระบบการเลี้ยงปลานิลแบบหมุนเวียน

1.2.1การเตรียมบ่อ ใช้บ่อทดลอง จำนวน 12 บ่อ เป็นบ่อซีเมนต์ ขนาด 1 X 1 X 1.5 เมตร ทำการล้างทำความสะอาดและตากบ่อทิ้งไว้ประมาณ 2 วัน เติมน้ำลงบ่อในระดับความสูงประมาณ 100 ซม. และเปิดอุปกรณ์ให้อากาศทิ้งไว้ประมาณ 3-4 วัน ก่อนเริ่มการทดลอง

1.2.2 การเตรียมลูกปลานิล ใช้ลูกปลานิลอายุ 2 เดือน ที่ซื้อมาจากฟาร์มเอกชน นำมาพักในบ่อเพื่อให้ลูกปลาปรับตัวเข้ากับให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปของปลานิลที่ขายตามท้องตลาดเพื่อให้ปลาชินกับอาหาร จากนั้นคัดขนาดลูกปลาให้มีขนาดใกล้เคียงกัน สุ่มชั่งน้ำหนักและนับจำนวนลูกลงบ่อ

1.2.3 การจัดการและการให้อาหาร การให้อาหารปลาในระหว่างการทดลอง แต่ละบ่อทดลองจะได้รับอาหารวันละ 2 ครั้ง คือ เวลา 8.00 น และ 16.00 น. โดยให้อาหารจนปลากินอิ่มโดยหว่านให้ทั่วบ่อ และอาหารใช้เป็นอาหารเม็ดที่มีขายในท้องตลาด วิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารอาหาร ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า และความชื้น

ตารางที่ 2 ข้อมูลการเลี้ยงปลานิลในบ่อซีเมนต์ที่ระดับความหนาแน่นต่างกัน

ข้อมูลการเลี้ยง	ชุดการทดลอง			
	1	2	3	4
ขนาดบ่อเลี้ยง(m)	1.0x1.0x1.5	1.0x1.0x1.5	1.0x1.0x1.5	1.0x1.0x1.5
จำนวนปลาที่ปล่อย(ตัว)	50	50	75	100
น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (กรัม)	83.37±19.62	87.10±0.15	70.70±18.93	65.51±16.27
อัตราการให้อาหาร	ให้จนปลาอิ่ม	ให้จนปลาอิ่ม	ให้จนปลาอิ่ม	ให้จนปลาอิ่ม

1.2.4 การจัดการคุณภาพน้ำ การปรับปริมาณของน้ำในบ่อเลี้ยงปลานิล ทำการเติมน้ำลงบ่อเพื่อให้ได้ระดับเท่ากัน ชุดการทดลองที่ 1 เปลี่ยนถ่ายน้ำทุก 5 วัน (ชุดควบคุม)โดยถ่ายน้ำออกครึ่งของระดับน้ำเดิมแล้วเติมน้ำใหม่ ตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำ ก่อนทดลอง และระหว่างการทดลองทุกๆ 2 สัปดาห์ จนสิ้นสุดการทดลองครบ 3 เดือน โดยทำการศึกษาคุณสมบัติของน้ำดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำ	วิธีการวิเคราะห์
ความเป็นกรดเป็นด่าง (น้ำ,)	pH meter(HI 9812)
ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ	DO meter(YSI model 59)
อุณหภูมิน้ำ	DO meter(YSI model 59)/Thermometer
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	Phenol method
ไนไตรท์-ไนโตรเจน	Coupling method
ไนเตรต-ไนโตรเจน	Hydrazine method
ฟอสฟอรัสรวม	Stannous chloride method

1.2.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตปลานิล ทำการตรวจสอบการเจริญเติบโต และอัตราการรอดปลานิลโดยชั่งน้ำหนักลูกปลาบ่อละ 20 ตัว ก่อนการทดลอง เพื่อหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักปลาต่อตัวเมื่อเริ่มต้นการทดลอง และสุ่มปลาบ่อละ 20 ตัว หาน้ำหนักเฉลี่ยของปลาระหว่างการเลี้ยงทุก 15 วัน เก็บข้อมูลทั้งหมดจนจบการทดลองและนับอัตราการรอดของปลาแต่ละ การทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลองจากนั้นบันทึกและคำนวณข้อมูลเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองนำข้อมูลมาคำนวณเปรียบเทียบน้ำหนักที่เพิ่มของปลา อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการรอดตาย และอัตราการการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลา ดังนี้

น้ำหนักที่เพิ่มเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (WT.GAIN)

= น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง – น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อเริ่มการทดลอง

อัตราการเจริญเติบโต (ADG) กรัม/วัน

= น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง - น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อเริ่มการทดลอง/ระยะเวลา

ในการทำการทดลอง

อัตราการรอด (Survival Rate) เปอร์เซ็นต์

= จำนวนปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง / จำนวนปลาเมื่อเริ่มการทดลอง X 100

อัตราการแลกเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR)

= น้ำหนักของอาหารที่ปลากิน / น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น

1.3 . ขั้นตอนการเตรียมระบบการปลูกพืชผักแบบไม่ใช้ดิน

1.3.1 การเตรียมระบบการปลูกพืชผักแบบไม่ใช้ดิน เตรียมอุปกรณ์ในระบบการปลูกพืชผักที่ไม่ใช้ดิน จำนวน 12 ชุด เป็นท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว ประกอบด้วยข้องอสามทาง ถังเก็บน้ำ และรวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้กรองน้ำและใช้บำบัดน้ำเสีย ทำการล้างท่อ PVC เพื่อทำความสะอาดประกอบเข้ากับระบบ โดยใช้ปั๊มน้ำดูดน้ำจากบ่อเลี้ยงปลาปล่อยลงในถังพักน้ำ ปล่อยลงในชุดอุปกรณ์ที่กรองตะกอน ผ่านลงชั้นกรองชีวภาพเสร็จแล้วไหลผ่านลงมาที่ระบบการปลูกพืชผักท่อ PVCที่เตรียมไว้ จากนั้น น้ำที่ผ่านระบบการปลูกพืชผักจะไหลกลับไปยังบ่อซีเมนต์ที่ใช้เลี้ยงปลานิลต่อไป

1.3.2 การเตรียมกล้าพืชผัก เตรียมแผ่นฟองน้ำ ความหนา 1 นิ้ว นำมาตัดให้ได้ขนาดพอดีกับกับถาดที่ใช้เพาะ ใช้มีดกรีดฟองน้ำให้ได้ ขนาด 1x1 นิ้ว โดยกรีดไม่ให้ขาดออกจากกัน ทำรอยบากทแยงมุมความลึกประมาณกึ่งกลางของฟองน้ำ แช่ฟองน้ำก่อนทำการเพาะเมล็ดพืชผัก ทำการหยอดเมล็ดพืชผักลงในช่องบาก 1 ช่อง ต่อ 1 เมล็ด เสร็จแล้วนำฟองน้ำที่หยอดเมล็ดพืชผักใส่ในถาดเพาะเมล็ดปิดฝาหรือเก็บไว้ในที่มืด 3 วัน เมล็ดจะเริ่มงอก จากนั้น ปล่อยต้นกล้าให้มีใบจริง 3 ใบ

1.3.3 การปลูกพืชผัก และการจัดการดูแล เตรียมแผ่นโฟม ให้เป็นวงกลม ขนาดพอดีกับท่อ PVC ทำการเจาะรูเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้ได้ขนาด เท่ากับฟองน้ำที่เพาะต้นกล้า ขนาด 1 X1 นิ้ว เมื่อต้นกล้า มีใบจริง 2-3 ใบ ให้ฉีกฟองน้ำพร้อมต้นกล้าที่เพาะใส่ ลงในแผ่นโฟม แล้วใส่ลงระบบปลูกพืชผักที่ไม่ใช้ดินในท่อ PVC ที่เตรียมไว้

ภาพที่ 7 การเตรียมกล้าผักกาดหอม

1.3.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการปลูกพืชผัก โดยใช้รอบการผลิตผักที่ 45 วัน ซึ่งต้องรวมระยะเวลาในการเพาะกล้าที่ 10 – 14 วัน (กิดติ,2547) โดยในการทดลองใช้ระยะเวลาการปลูกผักที่ 30 วันต่อ 1 รอบการผลิต การเก็บข้อมูลของผักให้บันทึกและคำนวณข้อมูล เมื่อเสร็จสิ้นรอบการผลิดผักโดยนำข้อมูลของพืชผัก มาคำนวณเปรียบเทียบความสูง อัตราการเจริญเติบโต และน้ำหนักผลผลิตรวมทั้งหมด ดังนี้

ความสูงที่เพิ่มขึ้น

= ความสูงเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง – ความสูงเฉลี่ยเมื่อเริ่มการทดลอง

อัตราการเจริญเติบโต (ADG) ซม/วัน

= ความสูงเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง - ความสูงเฉลี่ยเมื่อเริ่มการทดลอง/ระยะเวลาในการทำการทดลอง

อัตราการรอด (Survival Rate) เปอร์เซ็นต์

= จำนวนต้นพืชผักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง / จำนวนพืชผักเมื่อเริ่มการทดลอง X 100

1.4 ขั้นตอนการเตรียมระบบกรอง

1.4.1 เตรียมกล่องพลาสติกความจุ 20 ลิตร จำนวน 2 กล่อง เชื่อมกล่องให้ติดกันโดยใช้ท่อ PVC ขนาด 4 หุน เพื่อแบ่งถังให้เป็นถังตกตะกอนและถังกรองก่อนปล่อยเข้าสู่ระบบผักไฮโดรโพนิกส์ ใช้ปั๊มและอุปกรณ์สำหรับดูดน้ำในบ่อซีเมนต์ที่ผ่านการเลี้ยงปลานิลมาผ่านระบบกรองตะกอนและกรองชีวภาพจากนั้นน้ำจะเข้าไปในระบบการปลูกพืชผักที่ไม่ใช้ดินจากนั้นน้ำจะไหลกลับลงมาในบ่อซีเมนต์ใช้เลี้ยงปลาต่อไป

ผลการวิจัย

จากการศึกษาอัตราการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นต่างกันที่ 25, 50, 100 และ 150 ตัวต่อตารางเมตรร่วมกับการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินโดยเลี้ยงในบ่อซีเมนต์ ขนาด 1 X 1 X 1.5 เมตร ระยะเวลาการเลี้ยง 3 เดือน เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ผลดังนี้

1.อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่างกัน

1.1 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

เมื่อสิ้นสุดการทดลองของพบว่าชุดการทดลองที่ 3 ให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่สูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ78.39±9.98 กรัม ส่วนชุดการทดลองที่ 1,2 และ 4 ให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 66.57±3.09, 75.12±8.81และ 76.38±2.19 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติพบว่าชุดการทดลองที่ 1 มีความแตกต่างกับชุดการทดลองที่2,3 และ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) น้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลองของชุดการทดลองที่ 1,2,3 และ 4 มีเฉลี่ยเท่ากับ 149.94±14.38, 162.22±7.03 , 149.09±9.58 และ 143.89±14.14 กรัม (ตารางที่ 2)

1.2 ความยาวที่เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (Total Length, TL)

ความยาวที่เพิ่มขึ้นมีค่าเฉลี่ย ของชุดควบคุม ชุดการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 2 และชุดการทดลองที่ 3 ที่มีอัตราความหนาแน่น 50, 50, 75 และ 100 ตัวต่อบ่อ มีค่าเท่ากับ 9.06±2.34, 9.14±1.40, 9.17±1.12 และ9.38±0.18 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีความยาวเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 21.32±0.79, 21.45±0.48 , 21.22±0.63 และ 20.57±1.51 เซนติเมตร ตามลำดับ (แสดงในตารางที่ 2)

1.3 อัตราการเจริญเติบโต (ADG)

อัตราการเจริญเติบโตของชุดควบคุม ชุดการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 2 และชุดการทดลองที่ 3 ที่มีอัตราความหนาแน่น 50, 50, 75 และ 100 ตัวต่อบ่อมีค่าเฉลี่ย 0.73±0.77, 0.83±0.29, 0.87±0.33 และ 0.85±0.39 กรัมต่อวัน ตามลำดับ (แสดงในตารางที่ 2)

1.4 อัตราการรอดตาย (Survival Rate)

เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 90 วัน พบว่าชุดการทดลองที่ 1 ให้อัตราการรอดตายสูงสุดคือ 98.25 % ชุดการที่2,3 และ 4 มีอัตราการรอดตายเท่ากับ 97.63 % , 97.41 % และ 97.26 % ตามลำดับ

1.5 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR)

จากการทดลดลองพบว่าชุดการทดลองที่ 3 ให้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำสุดคือ 1.06±0.2 ไม่มีความแตกต่างกับชุดการทดลองที่ 4 แต่มีความแตกต่างกับชุดการทดลองที่ 1และ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

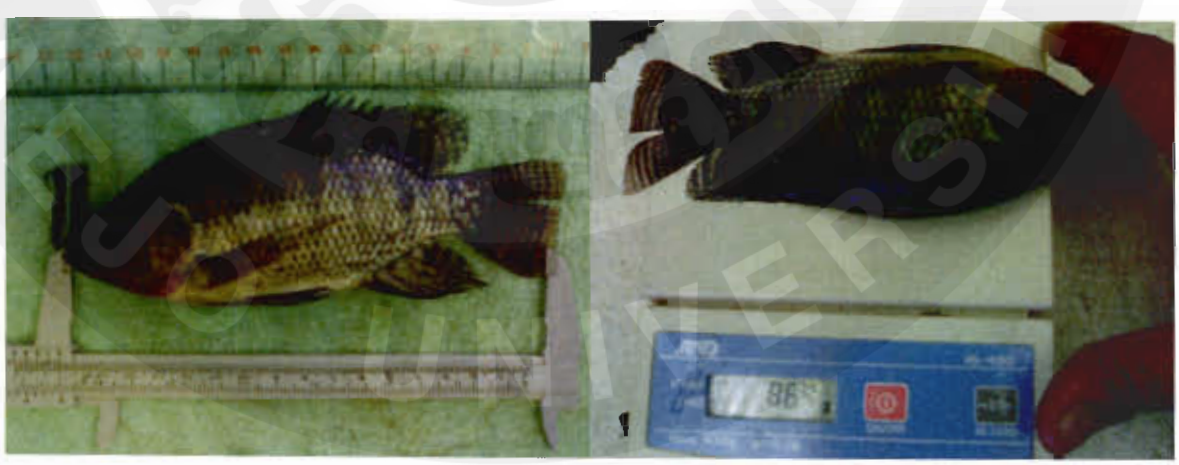
1.6 ผลผลิต

เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาทดลอง พบว่าชุดการทดลองที่ 1 ให้น้ำหนักปลารวมเท่ากับ 7.50 กิโลกรัม และชุดการทดลองที่ 2,3 และ 4 ให้น้ำหนักปลาเท่ากับ 8.31,7.84 7.64 กิโลกรัม ตามลำดับ (แสดงในตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลานิล

รายละเอียดข้อมูล	อัตราความหนาแน่น (ตัว/บ่อ)			
	50 (ชุดควบคุม)	50	75	100
น้ำหนักเมื่อเริ่มต้นการทดลอง (กรัม)	83.37±19.62	87.10±0.15.80	70.70±18.93	67.51±16.27
น้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (กรัม)	149.94±14.38[a]	162.22±7.03[b]	149.09±9.58[a]	143.89±14.14[a]
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	66.57±3.09[a]	75.12±8.81[b]	78.39±9.98[b]	76.38±2.19[b]
ความยาวเริ่มต้นการทดลอง (เซนติเมตร)	12.26±1.89[a]	12.30±1.63[a]	12.05±1.72[a]	12.19±1.68[a]
ความยาวสิ้นสุดการทดลอง (เซนติเมตร)	21.32±0.79	21.45±0.48	21.22±0.63	20.57±1.51
ความยาวที่เพิ่มขึ้น (เซนติเมตร)	9.06±2.34[a]	9.14±1.40[a]	9.17±1.12[a]	9.38±0.18[a]
อัตราการเจริญเติบโต (กรัมต่อวัน)	0.73±0.77[a]	0.83±0.29[a]	0.87±0.33[a]	0.85±0.39[a]
อัตราการรอดตาย	98.25%[a]	97.63%[a]	97.41%[a]	97.26%[a]
อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ	1.19±02[a]	1.18±0.1[a]	1.06±0.2[b]	1.09±.02[b]
ผลผลิต (กิโลกรัม)	7.50	8.31	7.84	7.64

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างในทางสถิติ ($p<0.05$) (n=10)



ภาพที่ 8 การเก็บข้อมูลด้านการเจริญเติบโตของปลานิล

2. ประสิทธิภาพการผลิตของผักกาดหอม

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ความสูงเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยผักกาดหอมที่ปลูกร่วมกับการเลี้ยงปลานิลที่อัตราความหนาแน่น 50 ตัวต่อบ่อ (ชุดการทดลองที่ 1) มีความสูงมากที่สุด (22.96±0.56 เซนติเมตร) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่ 3 (22.30±0.51 เซนติเมตร), ชุดควบคุม (21.83±0.35 เซนติเมตร) และชุดการทดลองที่ 2 (21.61±0.21 เซนติเมตร) ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ความสูงที่เพิ่มขึ้นของผักกาดหอมในชุดควบคุม ชุดการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 2 และ ชุดการทดลองที่ 3 มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 18.24±0.38, 19.05±0.59, 18.00±1.41 และ 18.20±0.53 เซนติเมตร (ตามลำดับ) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความสูงที่เพิ่มขึ้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของผักกาดหอม

ประสิทธิภาพการผลิต	อัตราความหนาแน่น (ตัวต่อบ่อ)			
	50 (ชุดควบคุม)	50	75	100
ความสูงเริ่มต้นการทดลอง (เซนติเมตร)	3.58±0.57	3.90±0.22	3.61±1.21	4.09±0.28
ความสูงเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (เซนติเมตร)	21.83±0.35^{a}	22.96±0.56^{b}	21.61±0.21^{a}	22.30±0.51^{ab}
ความสูงที่เพิ่มขึ้น (เซนติเมตร)	18.24±0.38	19.05±0.59	18.00±1.41	18.20±0.53

หมายเหตุ 1. เป็นข้อมูลเฉลี่ยต่อรอบการผลิตที่ 30 วัน

2. ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างในทางสถิติ ($p<0.05$) (n=10)

ภาพที่ 9 ผักกาดหอมเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

3.คุณภาพน้ำ

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในบ่อทดลองมีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด- ด่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีค่าระหว่าง 2.87 – 3.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแอมโมเนียมีค่าระหว่าง 0.067 – 0.091 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของไนไตรท์มีค่าระหว่าง 0.972 – 1.384 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนเตรทมีค่าระหว่าง 0.157 – 0.261 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าฟอสฟอรัสมีค่าระหว่าง 0.0716 – 0.827 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำค่าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณของไนเตรทและฟอสฟอรัส ของแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($P>0.05$) แต่พบว่าค่าไนไตรท์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ดังแสดงตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณภาพน้ำในบ่อบ่อเลี้ยงปลานิล

	อัตราความหนาแน่น (ตัวต่อบ่อ)			
	50 (ชุดควบคุม)	50	75	100
อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	25.56±0.03	25.56±0.03	25.66±0.03	25.63±0.03
ความเป็นกรด-ด่าง	7.21±0.15	7.21±0.17	7.15±0.17	7.21±0.15
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3.03±0.12^{a}	3.30±0.13^{b}	2.90±0.13^{a}	2.87±0.08^{a}
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.083±0.046	0.091±0.055	0.095±0.036	0.067±0.008
ไนไตรท์-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.972±0.156^{a}	1.384±0.154^{c}	1.315±0.147^{bc}	1.125±0.165^{ab}
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.157±0.018	0.217±0.158	0.261±0.076	0.163±0.082
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.803±0.162	0.716±0.187	0.827±0.274	0.794±0.204

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างในทางสถิติ ($p<0.05$) ($n=10$)

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลานิลเลี้ยงที่อัตราความหนาแน่นต่างกันในระบบน้ำหมุนเวียนร่วมกับระบบการปลูกพืชไฮโดรโพนิคส์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองๆ ละ 3 ซ้ำ คือ ชุดควบคุม ชุดการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 2 และชุดการทดลองที่ 3 ที่มีอัตราความหนาแน่น 50, 50, 75 และ 100 ตัวต่อบ่อ และปลูกผักกาดหอมห่อ จำนวน 30 ต้นต่อบ่อ ระยะเวลาการทดลอง 30 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลานิลของแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ปลานิลมีน้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลองเฉลี่ยระหว่าง 72.97±14.14 - 102.12±7.03 กรัม น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น 12.19±3.09 – 15.46±2.19 กรัม ความยาวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 16.57±1.51 – 18.45±0.48 เซนติเมตร ความยาวที่เพิ่มขึ้น 1.38±0.18 – 2.17±1.12 เซนติเมตร และอัตราการเจริญเติบโต 0.18±0.39 – 0.50±0.29 กรัมต่อวัน ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ทุกปัจจัยหล่านี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ในแต่ละชุดการทดลอง

ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลานิล

ผลการทดลองประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลานิล พบว่า น้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ความยาวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ความยาวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโต อัตราการแลกเนื้อ อัตราการรอด ในแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งข้อมูลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ จันทร์สว่าง (2538) และTarnchalanukit *et al.* (1982) ที่รายงานว่าความหนาแน่นในการเพาะเลี้ยงลูกปลาดุกจะไม่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของลูกปลา แต่จะมีผลต่อผลผลิตรรวม แต่เมื่อพิจารณาผลการทดลองซึ่งพบว่าการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่น 100 ตัวต่อบ่อ มีน้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ความยาวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ความยาวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตน้อยกว่าการเลี้ยงที่มีความหนาแน่นของปลาที่น้อยกว่า ชี้ให้เห็นว่าการปล่อยปลาในอัตราความหนาแน่นสูงมีแนวโน้วที่จะทำให้ปลาเจริญเติบโตได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของกรมประมง (2548) ที่กล่าวว่าการเลี้ยงปลานิลที่เหมาะสมควรมีความหนาแน่น 2,000-5,000 ตัวต่อไร่ ถ้าปล่อยอัตราหนาแน่นกว่านี้จะทำให้การเจริญเติบโตของปลานิลลดลง

ประสิทธิภาพการผลิตของผักกาดหอมห่อ

ประสิทธิภาพการผลิตของผักกาดหอมห่อ พบว่า ความสูงเมื่อสิ้นสุดการทดลองของแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยความสูงเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ผักกาดหอมห่อที่ปลูกร่วมกับการเลี้ยงปลานิลที่อัตราความหนาแน่น 50 ตัวต่อบ่อของชุดการทดลองที่ 1 มีความสูงที่สุด (22.96±0.56 เซนติเมตร) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุมที่มีความหนาแน่น 50 ตัวต่อบ่อเช่นเดียวกัน ซึ่งถ้าพิจารณาจากคุณภาพน้ำที่พบว่าปริมาณไนไตรท์-ไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 1 ก็มีค่าสูงกว่าชุดควบคุมและชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ จึงอาจคาดเดาได้ว่าความสูงของผักกาดหอมห่อที่สูงสุดในชุดการทดลองที่ 1 น่าจะมีผลมาจากปริมาณไนไตรท์-

ไนโตรเจน (1.384±0.154) ที่สูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ส่วนความสูงที่เพิ่มขึ้น พบว่า แต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

คุณภาพน้ำ

คุณภาพน้ำในบ่อทดลองมีค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดการทดลอง ดังนี้ อุณหภูมิของน้ำ 28.56±0.03 – 28.66±0.03 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ 8.15±0.17 – 8.21±0.17 โดยอุณหภูมิของน้ำและค่าความเป็นกรด-ด่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) แต่จากการวิจัยก็ยังพบว่าอุณหภูมิของน้ำจะอยู่ในช่วงระหว่าง 28.56-28.63 องศาเซลเซียส และค่าเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 8.15-8.21 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของปลา (เกรียงศักดิ์, 2539)

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ 1.87±0.08 – 2.03±0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) โดยปลานิลที่อัตราความหนาแน่น 50 ตัวต่อบ่อ มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำสูงที่สุด (2.30 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่ก็ยังต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของปลาที่มีค่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร (ธรรมรักษ์, 2541) ซึ่งปริมาณออกซิเจนในน้ำที่ต่ำนี้อาจจะมีผลต่อการเจริญปลานิลได้ แอมโมเนีย-ไนโตรเจน 0.067±0.008 – 0.095±0.036 มิลลิกรัมต่อลิตร

ไนไตรท์-ไนโตรเจน 0.972±0.156 – 1.384±0.154 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจน 0.157±0.018 – 0.261±0.076 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน(P>0.05) แต่ปริมาณไนไตรท์-ไนโตรเจนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) โดยมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองที่ 1 (1.384±0.154) ซึ่งมีความหนาแน่นของปลา 50 ต่อต่อบ่อ แต่ก็มีค่าน้อยที่สุดในชุดควบคุม (0.972±0.156) ซึ่งมีความหนาแน่น 50 ตัวต่อบ่อเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาปริมาณไนไตรท์-ไนโตรเจนในการเพาะเลี้ยงปลานิลครั้งนี้มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งธรรมรักษ์ (2541) รายงานว่าปริมาณไนไตรท์-ไนโตรเจนมากกว่า 0.66 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีผลเป็นพิษต่อปลาน้ำจืด และส่งผลต่อการเจริญเติบโต

ฟอสฟอรัส 0.716±0.187 – 0.827±0.274 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผลการวิเคาะห์ทางสถิติพบว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ และไนไตรท์-ไนโตรเจนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) โดยทั้ง 2 ปัจจัยมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองที 1 ที่มีความหนาแน่นของปลา 50 ตัวต่อบ่อ ส่วนปัจจัยอื่นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

ถาวร (2530) ได้รายงานว่า การเลี้ยงปลาดุกแบบหนาแน่นในบ่อคอนกรีต พบว่า ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.685-19.45 มิลลิกรัมไนโตรเจน จันทร์สว่าง (2538) ได้ทดลองเลี้ยงปลาดุกในระบบน้ำหมุนเวียนแบบกึ่งปิดพบว่า ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.010-16.395 มิลลิกรัมไนโตรเจน ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงของการทดลองเลี้ยงปลานิลครั้งนี้ ประเทือง (2538) รายงานว่า เมื่อปลากินอาหารจะขับถ่ายของเสียออกมาซึ่งจะเป็นสารประกอบไนโตรเจนจะส่งผลต่อปริมาณไนไตรท์-ไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ในการทดลองครั้งนี้มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.716-0.827 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูง

กว่าเกณฑ์คุณภาพน้ำสำหรับสัตว์น้ำที่ควรมีปริมาณฟอสฟอรัสไม่เกิน 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประเทือง, 2538)

จากการทดลองสรุปได้ว่า ปลานิลเลี้ยงที่อัตราความหนาแน่น 50-100 ตัวต่อบ่อ มีการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างกัน และการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นดังกล่าวร่วมกับการปลูกผักกาดหอมในระบบน้ำหมุนเวียนให้ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าการเลี้ยงปลานิลในบ่อซีเมนต์ด้วยระบบปิดร่วมกับการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินทำให้ของเสียจากการเลี้ยงปลาซึ่งอยู่ในรูปของไนโตรเจนประมาณ 70-75 เปอร์เซ็นต์ จะถูกกำจัดภายในระบบ โดยถูกนำไปใช้เป็นสารอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโตของผักกาดหอม แทนการถ่ายเทน้ำจากการเลี้ยงปลาเพื่อกำจัดของเสียออกไป แต่จากการวิจัยยังพบการตกค้างของตะกอนจากอาหารเหลือและของเสียจากปลาที่ค้างในระบบท่อผักซึ่งควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระบบบำบัดที่สามารถแยกตะกอนดังกล่าวออกไปใช้ประโยชน์ การจัดการเลี้ยงปลานิลในระบบปิดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ และเน้นระบบการเลี้ยงที่มีประสิทธิภาพ เหมาะสมโดยคำนึงถึงต้นทุนการผลิตมาประกอบ จึงอาจเป็นอีกทางเลือกของเกษตรกรที่มีอาชีพเพาะเลี้ยงปลานิลเพื่อให้การผลิตปลานิลมีมาตรฐานและมีคุณภาพต่อไป