



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของคลื่นเสียงต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ

Effects of Audio Wave on Growth Rate of Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria

นามผู้วิจัย นางสาวสุภาภรณ์ พันวิสัย

ได้รับพิจารณาเห็นชอบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจริญไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา นิระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

สิงห์สีหิ มหาวินยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของคลื่นเสียงต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ

Effects of Audio Wave on Growth Rate of Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria

โดย

นางสาวสุภาภรณ์ พันวิสัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุภาภรณ์ พันวิทย์ 2554: ผลของคลื่นเสียงต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D. 170 หน้า

จากการศึกษาผลของคลื่นเสียงต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ ด้วยความถี่เสียงลักษณะดังต่อเนื่องและเป็นจังหวะ โดยความถี่เสียงที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 500 Hz, 1 kHz, 5 kHz และ 10 kHz และความดังเสียง 3 ระดับ คือ 60, 80 และ 100 dB(C) ทำการทดลองเปรียบเทียบกับแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคทีเรียของ 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* และกลุ่มแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เพาะเลี้ยงในอาหารเหลวและอาหารแข็ง ด้วยระบบทดลองแบบเบดซ์ แบ่งกลุ่มทดลองของแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มควบคุม (ไม่ได้รับคลื่นเสียง) 25 กลุ่ม และกลุ่มทดลอง (ได้รับคลื่นเสียง) 50 กลุ่ม ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

ผลการศึกษา *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ พบว่ามีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยดีที่สุดที่ความถี่เสียง 500 Hz ระดับความดัง 80 dB(C) คิดเป็น 27.01% ส่วน *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ พบว่ามีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเป็นไปในทิศทางที่เป็นบวกหรือดีขึ้น โดยดีที่สุดที่ความถี่เสียง 1 kHz ระดับความดัง 60 dB(C) คิดเป็น 3.28% แต่เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องกลับส่งผลให้เป็นไปในทิศทางที่เป็นลบหรือแย่ลง ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความดังเสียงเป็น 100 dB(C) พบว่าแบคทีเรียมีอัตราการโตจำเพาะและการใช้สารอาหารจำเพาะเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้นทั้งความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ

Supaporn Phanwilai 2011: Effects of Audio Wave on Growth Rate of Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professsor Monthon Thanuttamavong, Ph.D. 170 pages.

This research aimed to study the effects of continuous rhythm audio wave frequency on the growth rate of gram-positive (*Bacillus thuringiensis*) and gram-negative (*Pseudomonas fluorescens*) bacteria. The experiment was conducted using bacterial inoculates in nutrient agar (NA) and nutrient broth (NB) from standardized bacterial suspensions of known concentrations. The samples, consisting of 50 treatment groups/gram bacteria and 25 control groups/gram-bacteria, were incubated for 4 hours in noise proof boxes. Sound treatment was provided to the treatment group but not for the control group. Treatment consists of four different audio frequencies (500 Hz, 1 kHz, 5 kHz and 10 kHz) and three sound strengths [60 dB(C), 80 dB(C) and 100 dB(C)].

Experimental results showed that specific growth rate and specific substrate utilization of *B. thuringiensis* increased when subjected to either continuous or rhythm sound treatment. Maximum increase of 27.01% was obtained at rhythm sound of 80 dB(C) strength and 500 Hz sound frequency. *P. fluorescens*, on the other hand, reacted negatively to a continuous sound treatment and to an increasing sound strength [100 dB(C)] but showed more positive than negative responses to rhythm sound. Best response was obtained when rhythm sound of 80dB(C) strength was generated at 1 kHz frequency. Maximum specific growth rate and specific substrate utilization increase was at 3.28%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.มณฑล ฐานุตตมวงศ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจที่ดียิ่งตั้งแต่เริ่มต้นดำเนินงาน ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และ ผศ.จีมา ศรลัมพ์ ผศ.วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์ ประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายและผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ มุลินธิพระบรมราชานุสรณ์ พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัว และสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ที่มอบทุนเพื่อสนับสนุนการค้นคว้าวิจัย

ขอขอบพระคุณรศ.ดร.ฐปน ชื่นบาน อดีตอาจารย์ที่ปรึกษาประจำภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์หนังสืออ้างอิงเพื่องานวิจัย ดร.พิรกานต์ บรรเจิดกิจ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้กำลังใจและคำปรึกษาต่างๆ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม 1 และ 2 ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยด้วยดีเสมอมา เจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาทุกท่าน รุ่นพี่ปริญญาเอก รุ่นพี่ปริญญาโท ตลอดจนคุณสุกพจี พรพงษ์เมตตา รุ่นพี่ปริญญาโทที่เป็นแรงบันดาลใจในต่อ ยอดหัวข้อวิทยานิพนธ์ และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ อนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทำวิจัยและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา ตลอดจนขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้แก่ผู้วิจัย และให้ความอนุเคราะห์ต่างๆ ในการดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครอบครัวพันวิสัย และครอบครัวพึงเจริญ ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูด้วยความรัก ความอบอุ่น ให้การศึกษาและเป็นกำลังใจที่สำคัญอย่างยิ่ง ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ครอบครัว ครูบาอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศุภาภรณ์ พันวิสัย

เมษายน 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	52
ผลและวิจารณ์	61
ผล	61
วิจารณ์	105
สรุปและข้อเสนอแนะ	107
สรุป	107
ข้อเสนอแนะ	110
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	113
ภาคผนวก	120
ภาคผนวก ก การเจริญและการใช้สารอาหารของกลุ่มแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ	121
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS	137
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณค่าจลนศาสตร์ของการทดลอง	165
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	170

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ความยาวคลื่นที่ความถี่เสียงต่างๆ	6
2 ความถี่ของเสียงต่างๆ ในช่วงความถี่ 20 ถึง 20,000 Hz	7
3 คำศัพท์ ความเร็ว ลักษณะ ความรู้สึกที่บ่งบอกจังหวะ	15
4 ค่า Sample Rate มาตรฐาน ของประเภทเสียงต่างๆ	17
5 ชนิด และลักษณะสำคัญของจุลินทรีย์ที่สามารถพบได้ในระบบบำบัดทางชีวภาพ	21
6 การกระจายตัวของแบคทีเรียแบบใช้ออกซิเจนในระบบเอเอสมาตรฐาน	28
7 ลักษณะบางประการของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ	30
8 องค์ประกอบของอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์	51
9 วิธีการวิเคราะห์และทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ	52
10 ระยะเวลาและงานที่ปฏิบัติในแต่ละขั้นตอนการทดลอง	60
11 ผลการวิเคราะห์การถดถอย และค่าวิเคราะห์สหสัมพันธ์	64
12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม	67
13 ผลการทดสอบค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของระหว่างชุดการทดลองของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์	69
14 ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) ของกลุ่มควบคุมและทดลองที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ โดยอ้างอิงกับค่า TOC และ COD	71
15 ผลการวิเคราะห์ความดังเสียงด้วยการคำนวณกำลังอัดของเสียง	96

ตารางผนวกที่

ก1 คำนวณน้ำหนักแห้งของของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง	126
ก2 ค่า COD ของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง	128
ก3 ค่า TOC ของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง	130
ก4 ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง	132

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก5 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง	134
ก6 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง	135
ข1 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง ด้วยลักษณะเสียงดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง	138
ข2 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ <i>Pseudomonas fluorescens</i> ระหว่างชุดการทดลอง ด้วยลักษณะเสียงดังแบบต่อเนื่อง ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง	149
ข3 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ <i>Pseudomonas fluorescens</i> ระหว่างชุดการทดลอง ด้วยลักษณะเสียงดังแบบเป็นจังหวะ ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง	153
ข4 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ <i>Bacillus thuringiensis</i> ระหว่างชุดการทดลอง ด้วยลักษณะเสียงดังแบบต่อเนื่อง ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง	157
ข5 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ <i>Bacillus thuringiensis</i> ระหว่างชุดการทดลอง ด้วยลักษณะเสียงดังแบบเป็นจังหวะ ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง	161

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับความถี่	5
2 ลักษณะการตอบสนองต่อความถี่ของเสียงของเครื่องวัดเสียงในสเกลการถ่วงน้ำหนัก A, B, C	12
3 เครื่องวัดเสียง (Sound Level Meter)	13
4 ตัวกันลม (Wind Screen) สำหรับเครื่องวัดเสียง	13
5 เครื่องปรับค่า (Calibrator) สำหรับเครื่องวัดเสียง	14
6 อัตราการเจริญของจุลินทรีย์กับระยะเวลา	23
7 โครงสร้างฟล็อกตามการแพร่กระจายของออกซิเจน	27
8 ตัวอย่างแบคทีเรียกลุ่ม Heterotrophic	29
9 ความแตกต่างระหว่าง (ก) แบคทีเรียแกรมบวก, (ข) แบคทีเรียแกรมลบ	31
10 ลักษณะรูปร่างของ <i>Bacillus thuringiensis</i>	33
11 ลักษณะรูปร่างของ <i>Pseudomonas fluorescens</i>	35
12 ลักษณะโครงสร้างของ JedMark LV-1 acoustic chamber	36
13 จำนวนเซลล์มีชีวิต <i>E. coli</i> cell ($\times 10^8$ cells per ml) ด้วยเสียงบำบัดที่แตกต่างกัน	37
14 จำนวนของโคโลนีต่อจานเพาะเชื้อด้วยเสียงบำบัดที่แตกต่างกัน (a) Control, (b) 1 kHz, (c) 5 kHz และ (d) 15 kHz	37
15 ผลการนับด้วยวิธี Plate count ของผลกระทบชีวภาพต่อคลื่นเสียงสั้นสะท้อนด้วยความถี่ต่ำที่บรรจุในปริมาตรที่แตกต่างกัน	40
16 ผลการนับด้วยวิธี Plate count ของผลกระทบชีวภาพต่อคลื่นเสียงสั้นสะท้อนด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน	41
17 ผลของค่าการดูดกลืนแสงของ <i>Aspergillus</i> spp. ที่ความถี่เสียงแตกต่างกัน	44
18 ผล colony forming units ของ <i>Aspergillus</i> spp. ที่ความถี่เสียงแตกต่างกัน	44
19 ผลความยาว germ tube elongation ของ <i>Aspergillus</i> spp. ที่ความถี่เสียงแตกต่างกัน ด้วยการวัดขนาดของโคโลนี (ชม.)	45
20 ผลค่าเฉลี่ยขนาดโคโลนีของ <i>Aspergillus</i> spp. ที่ความถี่เสียงแตกต่างกัน	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21	ลักษณะบรรจุภัณฑ์แบบที่เรียสาขพันธ์บริสุทธิ
	(ก) ลักษณะบรรจุภัณฑ์ภายนอก
	(ข) ลักษณะแบบที่เรียบรรจุภายในหลอดสุญญากาศ
22	ด้านในของกล่องทดลอง
	(ก) ด้านในฝากล่องติดตั้งลำโพงเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดเสียง
	(ข) ภายในกล่องบุด้วยผ้าห่มซับเสียง ความร้อน และด้านในบุฟองน้ำซับเสียง
23	ด้านนอกของกล่องทดลอง
	(ก) ด้านนอกของฝากล่องใช้วัสดุชนิดโพลีเอทรีน
	(ข) ด้านนอกของตัวกล่องทดลองใช้วัสดุชนิดโพลีเอทรีนบุเพื่อสะท้อนเสียง
24	ชุดเครื่องกำเนิดความถี่เสียง ประกอบด้วยเครื่องเล่น DVD และเครื่องขยายเสียง
25	เครื่องวัดเสียง (Sound Level Meter) ที่ใช้ในการทดลอง
26	เครื่องมือวิเคราะห์ TOC
27	ชุดการทดลอง
28	วิธีการทดลองโดยรวม
29	ผลการทดลองศึกษาหาระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์
30	ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ
31	ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ
32	อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงดังระดับ 60 dB(C) (ก) แบบที่เรียแกรมบวก และ (ข) แบบที่เรียแกรมลบ
33	อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงดังระดับ 60 dB(C)
	(ก) แบบที่เรียแกรมบวก และ (ข) แบบที่เรียแกรมลบ

สารบัญภาพ (ต่อ)

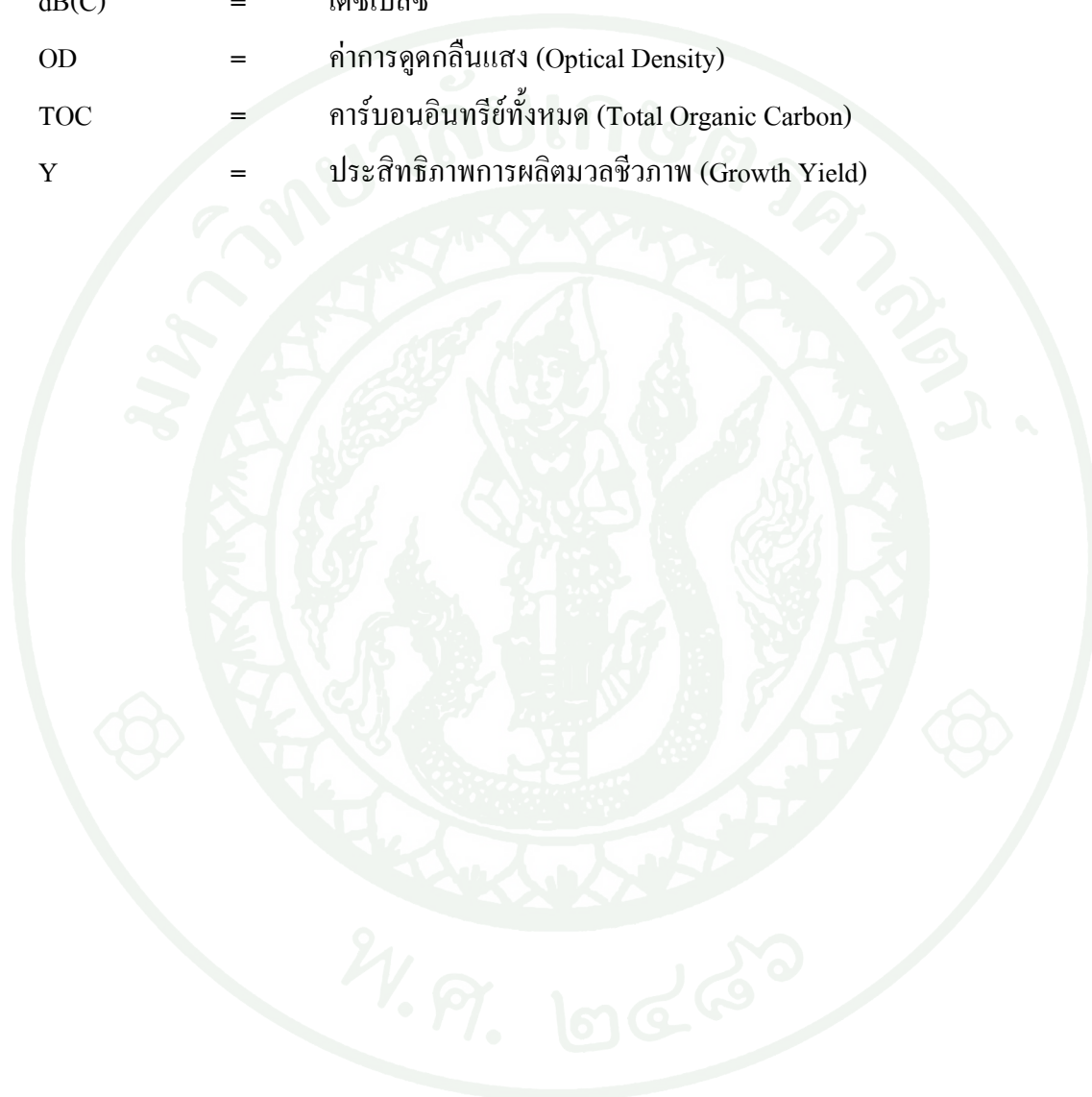
ภาพที่	หน้า
34 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงดังระดับ 60 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ	82
35 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงดังระดับ 80 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ	84
36 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงที่ระดับ 80 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ	86
37 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงที่ระดับ 80 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ	88
38 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงที่ระดับ 100 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ	90
39 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงที่ระดับ 100 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ	92
40 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงที่ระดับ 100 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ	94
41 ลักษณะความถี่เสียงดังแบบต่อเนื่อง (Continuous) (ก) 500 Hz (ข) 1 kHz (ค) 5 kHz (ง) 10 kHz	97
42 ลักษณะความถี่เสียงดังแบบเป็นจังหวะ ที่ความเร็ว 100 ครั้ง/นาที (Moderato) (ก) 500 Hz (ข) 1 kHz (ค) 5 kHz (ง) 10 kHz	98
43 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมโดยรวมของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมโดยรวมของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยความถี่เสี่ยงลักษณะดั่งแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ	103
45	อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมโดยรวมของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยความถี่เสี่ยงลักษณะดั่งแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ	104
ภาพผนวกที่		
ก1	กราฟมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงกับน้ำหนักแห้งของจุลชีพ ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ (ก) <i>Bacillus thuringiensis</i> และ (ข) <i>Pseudomonas fluorescens</i>	122
ก2	กราฟมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงกับค่า COD (ก) <i>Bacillus thuringiensis</i> และ (ข) <i>Pseudomonas fluorescens</i>	123
ก3	กราฟมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงกับ TOC ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ (ก) <i>Bacillus thuringiensis</i> และ (ข) <i>Pseudomonas fluorescens</i>	124
ก4	กราฟมาตรฐานค่า COD กับ TOC ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ (ก) <i>Bacillus thuringiensis</i> และ (ข) <i>Pseudomonas fluorescens</i>	125

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

COD	=	ความต้องการออกซิเจนเชิงเคมี (Chemical Oxygen Demand)
dB(A)	=	เดซิเบลเอ
dB(C)	=	เดซิเบลซี
OD	=	ค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density)
TOC	=	คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon)
Y	=	ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield)



ผลของคลื่นเสียงต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมบวกและ
แบคทีเรียแกรมลบ

Effects of Audio Wave on Growth Rate of Gram-Positive and
Gram-Negative Bacteria

คำนำ

คลื่นเป็นปรากฏการณ์ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมรอบตัวเรา โดยตัวเราเองก็ถูกล้อมรอบไปด้วยคลื่นเสียง คลื่นแสง คลื่นน้ำ และคลื่นชนิดอื่นๆ ซึ่งเราสามารถที่จะควบคุมและนำไปใช้เพื่อการขนส่งข้อมูลหรือขนถ่ายพลังงานจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ (Young *et al.*, 1996) คลื่นเสียงจัดเป็นคลื่นกล (Mechanical waves) สามารถที่จะส่งผลกระทบต่อจุลชีพได้ ยกตัวอย่างเช่น คลื่นอัลตราซาวด์ถูกนำมาใช้เพื่อยับยั้งและกำจัดหรือฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ต้องการ ทั้งนี้คลื่นอัลตราซาวด์ยังสามารถให้ความร้อนได้เฉพาะที่ และมีอนุผลอิสระเป็นผลผลิตอีกด้วย (Piyasena *et al.*, 2003) หรือแม้แต่นงานวิศวกรรมผลิตน้ำประปาและบำบัดน้ำเสียยังมีการนำเอาคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในการควบคุมสาหร่ายและฟิล์มจุลชีพ โดยเทคโนโลยีอัลตราโซนิก จัดได้ว่าเป็น Green Technology ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโดยการควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายในบ่อผึ่งทะเลสาบ และบ่อกักเก็บน้ำ และกำจัดฟิล์มจุลชีพที่เจริญเติบโตภายในระบบผลิตน้ำได้ (George, 2008) และการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียตะกอนเร่ง (Activated Sludge; AS) โดยใช้คลื่นเสียง Acoustic หรือคลื่นเสียง Ultrasound โดยคลื่น Ultrasonic จะช่วยเพิ่มฟองอากาศทำให้การกระจายของออกซิเจนในระบบดีขึ้น (Zhang *et al.*, 2007)

จากแนวคิดเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการต่างๆ เช่น วิธีการทางเคมีมักประสบปัญหาในความยุ่งยากในการคำนวณความแม่นยำในการใช้สารเคมี การตกค้างของสารเคมี และค่าใช้จ่ายสูง และการปรับปรุงด้วยวิธีการทางชีวภาพก็มักจะมีปัญหาการกำจัดตัวชีวภาพในภายหลัง ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายตามมาเช่นกัน ส่วนวิธีการทางกายภาพยังเป็นกระบวนการที่มีการนำมาใช้อยู่อย่างจำกัด เช่น การใช้เทคโนโลยีคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic) ที่ปัญหาในเรื่องการลงทุนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นทางเลือกที่จะสามารถนำไปใช้ในการทดลองครั้งนี้คือการใช้คลื่นเสียงระดับที่มนุษย์ได้ยิน (Audible sound wave) (Ying *et al.*, 2009) ซึ่งเป็นคลื่น

ความถี่เสียงที่มีค่าใช้จ่ายในการออกแบบการทดลอง การจัดซื้ออุปกรณ์ และวัสดุที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ทั้งยังสะดวก ง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานการบำบัดน้ำเสียได้จริง

ทั้งนี้แบคทีเรียที่มีความสำคัญส่วนใหญ่ ได้แก่ *Pseudomonas* กับ *Bacillus* (Talaro *et al.*, 1999) มีการกระจายตัวในระบบเอเอสมาตรฐานร้อยละ 50% และ 1.9% ของเชื้อทั้งหมดที่แยกได้ (Hiraishi *et al.*, 1989) ถือว่ามีปริมาณมากที่สุดในระบบ เป็นแบคทีเรียต่างแกรม แต่เป็นชนิดแบบใช้ออกซิเจนและลักษณะของเซลล์เหมือนกัน จึงเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่เหมาะสมเพื่อทำการเปรียบเทียบในการทดลอง ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการคัดเลือกแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* และแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เป็นตัวแทนในการทำการทดลองภายใต้ระบบการทดลองแบบเบตช์ (Batch) โดยแบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็นกลุ่มควบคุมในสถานะไร้ความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงอย่างละ 25 กลุ่ม เปรียบเทียบกับกลุ่มทดลองในสถานะที่มีความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงอย่างละ 50 กลุ่ม ทำการเดินระบบโดยเฉพาะเลี้ยงแบคทีเรียจนเข้าสู่สถานะ Steady state และทำการวิเคราะห์ค่าทางจลน์ศาสตร์ ร่วมกับการวิเคราะห์ลักษณะของความถี่เสียง และระดับความดังเสียงที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางเสียงที่ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต และอัตราใช้สารอาหารของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ

ขอบเขตการวิจัย

1. ระบบทดลองที่ใช้เป็นแบบเบดซ์ ซึ่งทำการศึกษากับแบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูป Nutrient Broth โดยทำการบ่มเชื้อภายใต้อุณหภูมิห้อง
2. แบคทีเรียที่ใช้ในการทดลอง: แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* และแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*
3. ความถี่เสียงในการทดลอง ได้แก่ 500 Hz, 1 kHz, 5 kHz และ 10 kHz โดยกำหนดประเภทของเสียง 2 ลักษณะ คือ ลักษณะเสียงแบบต่อเนื่อง (Continuous) และลักษณะแบบเป็นจังหวะที่มีความเร็ว 100 ครั้งต่อนาที (Moderato) ในรูปสัญญาณเสียงดิจิทัล (Digital) และระบบสเตอริโอ (Sterio)
4. ระดับความดังเสียงในการทดลองคือ 60, 80 และ 100 dB(C)
5. การเดินระบบทดลองทำในกล่องเก็บเสียง ซึ่งด้านในของกล่องบุด้วยวัสดุดูดซับเสียง ด้านนอกบุด้วยวัสดุสะท้อนเสียง ซึ่งอยู่ภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 1 อาคาร 11 ชั้น 1 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยกล่องเก็บเสียงช่วยบรรเทาเสียงรบกวนจากสภาวะแวดล้อมเท่านั้น ไม่สามารถกันเสียงรบกวนได้ทั้งหมด ดังนั้นสภาวะแวดล้อมของระบบทดลอง จึงเป็นไปตามปกติของห้องปฏิบัติการ

การตรวจเอกสาร

ลักษณะพื้นฐานเกี่ยวกับเสียง

เสียงเป็นพลังงานประเภทหนึ่งที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุที่เป็นต้นกำเนิดเสียง ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เมื่อวัตถุเกิดการสั่นสะเทือน จะทำให้เกิดการอัดตัวและขยายตัวของคลื่นเสียง คลื่นเสียงจะทำให้อนุภาคของตัวกลาง เช่น อากาศ สั่นสะเทือนจนมากระทบกับแก้วหูและส่งต่อมายังประสาทหูของมนุษย์ ซึ่งทำให้มนุษย์ได้ยินเสียงเหล่านั้นได้ในที่สุด (พิชัย, 2552; Peterson *et al.*, 1967; Foreman, 1990; Beranek *et al.*, 1992)

คุณสมบัติของเสียง

เสียงมีการเคลื่อนตัวในลักษณะของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นเสียง (Sound wave) ดังนั้นเสียงจึงมีคุณสมบัติทั่วไปที่เหมือนกับคลื่นชนิดอื่นๆ ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (พิชัย, 2552; Peterson *et al.*, 1967; Cunniff, 1977; Foreman, 1990; Cowan, 1994)

1. เสียงสามารถแพร่กระจายได้ โดยอาศัยตัวกลางในการแพร่กระจาย
2. เสียงสามารถสะท้อน หักเห และเบี่ยงเบนได้
3. เสียงสามารถแทรกกันได้ ซึ่งการสอดแทรกนั้นอาจเป็นการเสริมกันหรือหักล้างกันได้

การเคลื่อนที่ของเสียง เป็นการถ่ายโอนพลังงาน จากการสั่นของแหล่งกำเนิดผ่านอนุภาคของตัวกลาง จึงจัดว่าเสียงเป็นคลื่นกลตามยาว (Longitudinal Mechanical Wave) ซึ่งคลื่นกลตามยาวนี้สามารถแบ่งได้ตามช่วงความถี่เป็น 3 ช่วง คือ

1. คลื่นได้ยิน (Audible wave) คลื่นเสียง เป็นคลื่นที่อยู่ในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์ ที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้โดยสัทประสาทปกติ แหล่งต้นทางที่ให้คลื่นเสียงในช่วงความถี่ดังกล่าวนี้ เช่น ลำโพงเสียง เครื่องดนตรี และสายเสียง (Vocal cord) ของมนุษย์

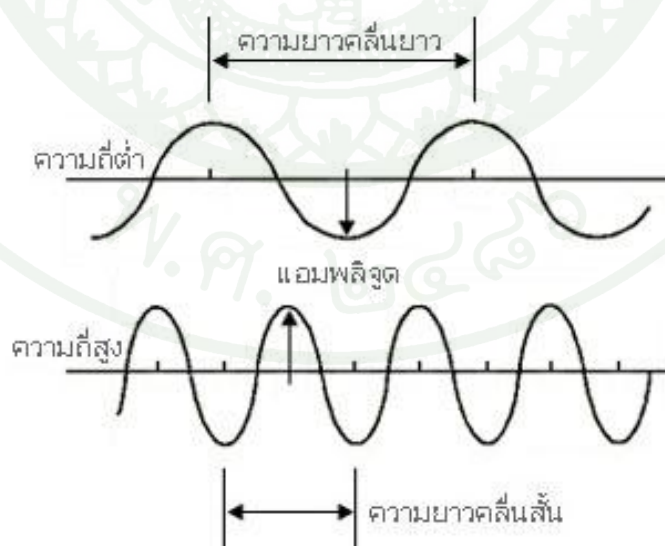
2. คลื่นใต้เสียง (Infrasonic wave) เป็นคลื่นกลตามยาวที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของคลื่นเสียง เช่น คลื่นแผ่นดินไหว

3. คลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic wave) เป็นคลื่นตามยาวที่มีความถี่มากกว่าความถี่ของคลื่นเสียง เช่น คลื่นเนื่องจากการสั่นของผลึกควอตซ์ (Quartz Crystal) ที่เหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับ นักหัดความถี่สูงที่ใช้ติดต่อกับสุนัขของตำรวจ (สมพงษ์, 2551)

คุณสมบัติทางกายภาพของเสียง

1. แอมพลิจูด (Amplitude) หรือความสูงคลื่นเสียง แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความดันเสียง เมื่อเกิดการแผ่กระจายของคลื่นเสียง มีหน่วยเป็นเมตร

2. ความยาวคลื่น (Wavelength) หมายถึงระยะทางที่คลื่นเสียงเดินทางไปครบ 1 รอบ (cycle) ความยาวคลื่นและความถี่คลื่นมีความสัมพันธ์กันแบบผกผัน โดยความยาวคลื่นวัดจากการเคลื่อนที่ของความถี่ใน 1 cycle ความถี่ต่ำจะมีความยาวคลื่นมาก ความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นน้อยและมีระดับความแรงน้อยลง ดังรูปที่ 1



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับความถี่

สมการคำนวณหาความยาวคลื่นคือ

$$\text{Wavelength} = \frac{c}{f} \quad (1)$$

โดย c คือ ความเร็ว
 f คือ ความถี่

ซึ่งความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นสั้นซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการคือ

$$\text{Wavelength (in mm)} = \frac{1.5}{f} \quad (2)$$

โดย f คือ ความถี่, MHz.

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่น (บนพื้นฐานความเร็วเสียงที่ 345.2 m/s)
 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความยาวคลื่นที่ความถี่เสียงต่างๆ

Frequency (Hz)	Wavelength, m (in)
20	17.3 (680)
40	8.63 (340)
100	3.45 (136)
200	1.73 (68.0)
300	1.15 (45.3)
2k	0.173 (6.80)
20k	0.0173 (0.680)

ที่มา: Everest (2001)

3. ความถี่ของเสียง (Frequency of Sound) คือ จำนวนลูกคลื่นที่เคลื่อนผ่านจุดต่างๆ ในหนึ่งวินาที มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Cycle/second) หรือ เฮิรตซ์ (Hz) โดยทั่วไปเสียงความถี่สูงจะก่อให้เกิดผลกระทบกับคนเรามากกว่าเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า โดยมีรูปของสมการดังนี้ (พิชัย, 2552; Foreman, 1990; Cunniff, 1977; Cowan, 1994; Beranek, 1992)

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (3)$$

โดย f = ความถี่เสียง (Hz)
 v = ความเร็วเสียง (m/s)
 λ = ความยาวคลื่นเสียง (m)

เสียงที่มีความถี่มากจะเป็นเสียงแหลมและเสียงที่มีความถี่น้อยจะเป็นเสียงทุ้ม ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความถี่ของเสียงต่างๆ ในช่วงความถี่ 20 ถึง 20,000 Hz

ช่วงความถี่, (Hz)	ลักษณะเสียง	ตัวอย่างเสียง
20 – 80	ทุ้มต่ำ (Lower Bass)	เสียงในลำคอ ตัวโน้ตดนตรี เสียงต่ำๆ
80 – 200	ทุ้มกลางต่ำ (Upper Bass)	เสียงกีตาร์เบส เสียงเชลโล่ กลองชุด และเสียงตัวโน้ตดนตรีต่ำๆ
200 – 500	กลางต่ำ (Lower Midrange)	เสียงของเครื่องเคาะ เช่น บองโก กองก้า
500 – 2,500	กลาง (Middle Midrange)	เสียงร้องเพลง เสียงกีตาร์ ไวโอลิน ทรมเปต
2,500 – 5,000	กลางสูง (Upper Midrange)	เสียงโน้ตสูงๆ ของเปียโน เครื่องดนตรี เครื่องสาย
5,000 – 10,000	สูงต่ำ (Lower Treble)	เป็นมิติของเสียงที่มนุษย์รับได้ เพื่อบอก มิติและทิศทางของเสียง
10,000 – 20,000	สูงมาก (Upper Treble)	เป็นมิติเสียงที่กว้างขึ้น

ที่มา: สมาร์ทเลิร์นนิ่ง (2552)

4. คาบ (Period) หมายถึงระยะเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางครบหนึ่งรอบ มีหน่วยเป็น วินาที เป็นเศษส่วนกลับของความถี่

5. ความเร็วของเสียง (Speed of Sound) จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลาง สำหรับตัวกลางที่เป็นอากาศนั้นความเร็วเสียงยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ซึ่งเราสามารถหาความเร็วของเสียงได้จากสมการที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (t) (เมื่อ $t < 273\text{ }^{\circ}\text{C}$) โดยมีรูปของสมการดังนี้ (พิชัย, 2552; Foreman, 1990; Cunniff, 1977; Cowan, 1994; Beranek, 1992)

$$v = 331.4 + 0.6t \quad (4)$$

โดย v = ความเร็วเสียงในอากาศ (m/s)
 t = อุณหภูมิในอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)

6. กำลังเสียง (Sound Power) หมายถึง พลังงานเสียงที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิดเสียงต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นจูลต่อวินาที หรือวัตต์

7. ความดันเสียง (Sound Pressure) เสียง คือ แรงที่เกิดจากคลื่นเสียงกระทำบนพื้นที่รับเสียงหนึ่งหน่วย โดยหน่วยของความดันเสียงใน SI Unit คือ Pascal (Pa) หรือ Newton/m^2 หรือ (N/m^2) เมื่อความดันของเสียงเพิ่มขึ้น จะทำให้เสียงที่มนุษย์ได้ยินดังมากขึ้น แต่เนื่องจากความดันของเสียงที่มนุษย์ได้ยินอยู่นั้น อยู่ในช่วง $20\text{ }\mu\text{Pa}$ จนถึง 200 Pa ที่ความถี่ $1,000\text{ Hz}$ ซึ่งมีช่วงที่กว้างมาก ดังนั้นจึงมีการใช้ค่า ระดับความดันของเสียง (Sound Pressure Level) (SPL) มาใช้ในการวัดความดังของเสียง โดยระดับความดันของเสียง เป็นอัตราส่วนใน Logarithmic Scale ของความดันเสียง (Sound Pressure) ใดๆ กับค่าความดันเสียงอ้างอิง (Reference Sound Pressure) ค่าของอัตราส่วนใน Logarithmic Scale นี้แสดงให้เห็นถึงความดังของเสียงหรือระดับเสียง (Sound Level) นั้น หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ระดับความดันของเสียง (Sound Pressure Level) (SPL หรือ L_p) (พิชัย, 2552; Cunniff, 1977; Foreman, 1990; Cowan, 1994; Beranek, 1992)

Decibels (dB) เป็นหน่วยวัดที่ไม่มีหน่วย (Dimensionless Unit) ที่ใช้ในการวัดค่าของความดังของเสียง หรือระดับความดันของเสียง (Sound Pressure Level) (SPL หรือ L_p) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (พิชัย, 2552; Smith *et al.*, 1982; Foreman, 1990)

$$SPL \text{ or } L_p = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad (5)$$

โดย SPL หรือ L_p = ระดับความดันของเสียง (dB)
 P = ค่าความดันเสียง (Pa)
 P_0 = ความดันเสียงอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 20 μPa

ซึ่งความดันเสียงอ้างอิง (Reference Sound Pressure) นี้ คือค่าความดันเสียงต่ำสุดที่มนุษย์หนุ่มสาวจะเริ่มได้ยินเสียง หรือที่เรียกว่า ธรณีประตูของการได้ยินเสียง (Threshold of Hearing) (พิชัย, 2552; Cunniff, 1977; Smith *et al.*, 1982; Foreman, 1990; Cowan, 1994)

ในเรื่องของ Acoustic ค่าระดับเปรียบเทียบคือ $2.0 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ บางครั้งจะเขียนเป็น 0.0002 dyne/cm^2 หรือ 0.0002 μbar ดังนั้น

$$SPL = 20 \log \frac{P}{2.0 \times 10^{-5}} \quad (5)$$

ค่าระดับเปรียบเทียบคิดจากความถี่ 1,000 Hz และการคำนวณ Pressure Produced by Sound ด้วยนิยามของ bar คือ

1 bar จะเท่ากับความกดดันที่ 0.9869 atm.

$$1 \mu\text{bar} = \frac{1}{1,000,000} \text{ bar} = 1 \text{ dyne/cm}^2 \quad (6)$$

ดังนั้น 1 μbar หรือ 1 $\text{dyne/cm}^2 = 14.5 \times 10^{-6} \text{ psi}$ และ 0.00021 μbar เมื่อเทียบกับความกดดันที่ $29.0 \times 10^{-10} \text{ psi}$

กำลังอัดของเสียง (Sound pressure) ใน psi จะหาได้จากความสัมพันธ์ของกำลังอัดของเสียงในหน่วย decibel ซึ่งคำนวณได้ดังนี้ (ราพิง, 2530)

$$dB = 20 \log \frac{P_2}{29 \times 10^{-10}}$$

$$\frac{dB}{20} = \log \frac{P_2}{29 \times 10^{-10}}$$

$$\text{anti log } \frac{dB}{20} = 10^{dB/20} \frac{P_2}{29 \times 10^{-10}}$$

$$P_2 = 29 \times 10^{-10} \times 10^{dB/20}$$

$$\text{หรือ } P_2 = 29 \times 10^{-10} \times \text{anti log } \frac{dB}{20} \quad (7)$$

8. ความเข้มเสียง (Sound Intensity) เป็นพลังงานของเสียงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ 1 หน่วย โดยจะวัดอยู่ในหน่วยของ watt/m² หรือ watt/cm² แต่เนื่องจากมีช่วงความเข้มเสียงที่มนุษย์ได้ยินนั้นมีความกว้างมาก จึงได้มีการใช้ค่าระดับความเข้มของเสียง (Sound Intensity Level) เป็นตัววัด ซึ่งเป็นอัตราส่วนใน Logarithmic Scale ของความเข้มเสียง (Sound Intensity) ใดๆ กับค่าความเข้มเสียงอ้างอิง (Reference Sound Intensity) โดยมีหน่วยพื้นฐานของการวัดเป็น Decibel (dB) (พิชัย, 2552; Smith *et al.*, 1982; Foreman, 1990) ระดับความเข้มของเสียง (Sound Intensity Level) (L_i) แสดงได้ตามสมการต่อไปนี้

$$L_i = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (8)$$

โดย L_i = ระดับความเข้มของเสียง (dB)

I = ความเข้มของเสียง (watt/m²)

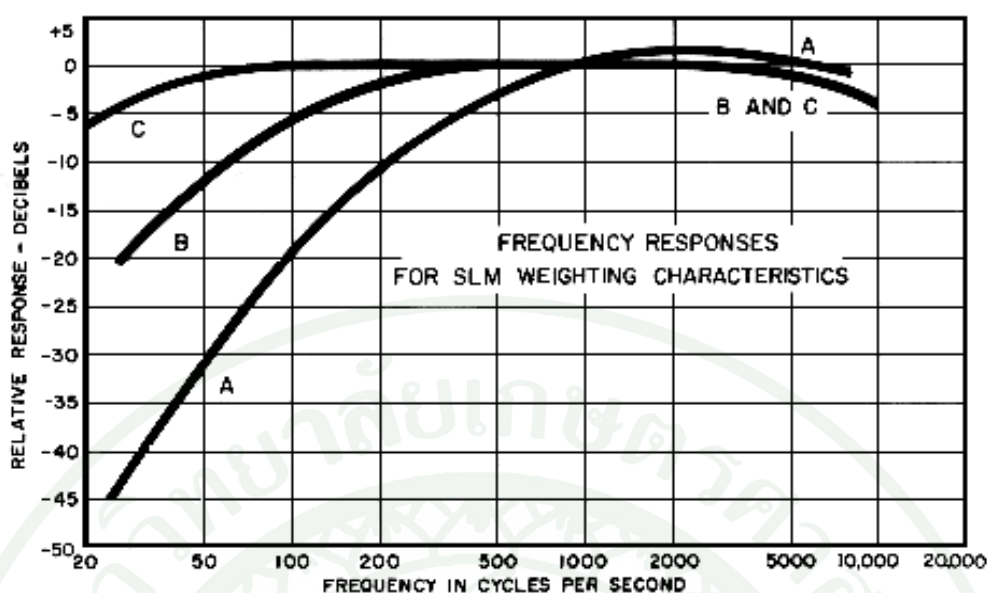
I_0 = ความเข้มของเสียงอ้างอิง มีค่าเท่ากับ (10⁻¹² watt/m²)

ความเข้มของเสียงอ้างอิง (Reference Sound Pressure) คือ ความเข้มของเสียงมาตรฐานที่หูมนุษย์จะเริ่มได้ยินเสียง หรือที่เรียกว่า ธรณีประตูของการได้ยินเสียง (Threshold of Hearing) ที่อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 20 °C ความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.2 kg/m³ โดยมีค่า $I_0 = 10^{-12}$ watt/m² (พิชัย, 2552; Foreman, 1990)

หน่วยวัดพื้นฐานและสเกลถ่วงน้ำหนัก (Basic Unit and Weighting Scale)

หน่วยวัดพื้นฐานของระดับความดังของเสียงคือ Decibel (dB) อย่างไรก็ตาม สามารถที่จะกำหนดตั้งอ้างอิงเพิ่มเติมให้แก่ระดับเสียงในหน่วย dB ได้ โดยตามด้วยตัวอักษร A, B หรือ C ซึ่งตัวอักษรเหล่านี้ เกี่ยวข้องกับกราฟของการตอบสนองต่อความถี่ของเสียงต่างๆ ของเครื่องวัดเสียงมาตรฐาน ที่มีการเลือกสำหรับความถี่ต่ำหรือสูงโดยเฉพาะ กราฟทั้ง 3 นี้แสดงในภาพที่ 2 โดยที่แต่ละตัวอักษรจะถูกกำหนดให้สำหรับแต่ละโครงข่ายหรือสเกลของการถ่วงน้ำหนัก (Weighting Network or Weighting Scale) สเกล C จะเป็นโครงข่ายการถ่วงน้ำหนักที่ใกล้เคียงกับแนวระนาบผ่านไปตามความถี่ต่างๆ ของเสียงที่เกือบจะเท่ากันโดยตลอด A กับ B จะถูกถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเสียงมีความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz โดยที่สเกล A จะเป็นโครงข่ายการถ่วงน้ำหนักที่มีความสำคัญและใช้กันแพร่หลายมากที่สุด ทางด้านการศึกษาและการสำรวจเกี่ยวกับเสียงในชุมชน และเสียงจากการจราจร เนื่องจากเป็นโครงข่ายการถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมใกล้เคียงกับลักษณะการตอบสนองต่อเสียงของมนุษย์มากที่สุด (พิชัย, 2552; Smith *et al.*, 1982; Hassall *et al.*, 1988; Foreman, 1990; Beranek *et al.*, 1992)

เมื่อมีการอ้างอิงถึงโครงข่ายการถ่วงน้ำหนัก A หน่วยของเสียงนั้นจะเขียนเป็น dBA หรือ dB(A) ถ้าหากหน่วยของเสียงใช้เพียง dB เพียงอย่างเดียว (โดยไม่มี A, B หรือ C) ก็อาจจะหมายถึงการใช้สเกล C ในหน่วยวัดนั้น ยังมีการใช้สเกลอื่นๆ นอกเหนือจากนี้อีกในการวัดเสียงต่างๆ เช่น D, E และ SI Weighting แต่สเกลเหล่านี้อาจถูกใช้เฉพาะในการวัดเสียงของงานบางประเภทเท่านั้น เช่น เสียงของโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เสียงรบกวนที่เกิดจากเสียงหวีดที่ความถี่สูงของเสียงจากเครื่องบินไอพ่น (พิชัย, 2552; Smith *et al.*, 1982; Hickling, 1988; Foreman, 1990)



ภาพที่ 2 ลักษณะการตอบสนองต่อความถี่ของเสียงของเครื่องวัดเสียงในสเกลการถ่วงน้ำหนัก A, B, C

ที่มา: Hickling (1988); Foreman (1990)

เครื่องวัดเสียง (Sound Level Meter)

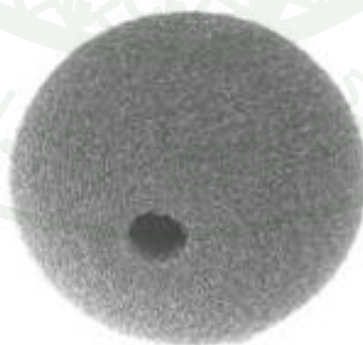
เครื่องวัดเสียงเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการวัดระดับความเข้มของเสียงหรือความดังของเสียง โดยมี Weighting Scale A, B, C และอื่นๆ กำหนดไว้ในเครื่องด้วย เพื่อที่จะสามารถปรับให้วัดเสียงในสเกลของการถ่วงน้ำหนักตามที่ต้องการได้ เครื่องวัดเสียงรุ่นใหม่ จะประกอบด้วยหน่วยความจำและไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor) ทำให้สามารถให้ค่าดัชนีการวัดเสียงที่ก้าวหน้ายิ่งขึ้นและต้องอาศัยการคำนวณที่ซับซ้อนมากขึ้นได้ เช่น L_{10} , L_{50} , L_{90} และ L_{eq} เป็นต้น รวมทั้งในเครื่องที่ทันสมัยยังสามารถเก็บข้อมูลของการวัดเสียงที่ต่อเนื่องไว้ในหน่วยความจำในลักษณะของ Data Logger ได้อีกด้วย (พิชัย, 2552; Smith *et al.*, 1982; Hickling, 1988; Foreman, 1990) รูปของวัดเครื่องแสดงไว้ในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่องวัดเสียง (Sound Level Meter)

ที่มา: Team Tech Instruments (2008)

ในการวัดเสียงในภาคสนามจะต้องใช้ตัวกันลม (Wind Screen) ครอบที่ไมโครโฟนของเครื่อง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเสียงอันเนื่องจากลมที่พัดผ่านไมโครโฟน (Smith *et al.*, 1982; Hickling, 1988; Foreman, 1990) ตัวกันลมแสดงไว้ในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตัวกันลม (Wind Screen) สำหรับเครื่องวัดเสียง

ที่มา: GeoNoise-Instruments Thailand (2006)

ก่อนการใช้งานของเครื่องวัดเสียงทุกครั้ง จะต้องทำการปรับค่าการวัดของเครื่องให้มีความถูกต้องก่อน โดยการใช้เครื่องปรับค่า (Calibrator) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการปรับค่าระดับเสียงของเครื่องวัดเสียง ในความถี่เสียงที่กำหนดไว้ให้ เครื่องวัดเสียงจะถูกปรับตั้งให้อ่านค่าตรงกับค่าของเสียงบริสุทธิ์ของเครื่องปรับค่าทุกครั้งก่อนนำไปใช้งาน (Smith *et al.*, 1982; Hickling, 1988; Foreman, 1990) เครื่องปรับค่า (Calibrator) สำหรับเครื่องวัดเสียง ได้แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เครื่องปรับค่า (Calibrator) สำหรับเครื่องวัดเสียง

ที่มา: Atequip (2007)

ชนิดของเสียง

โดยทั่วไปแล้วเสียงจะมีรูปแบบและลักษณะของความดังของเสียงที่แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดเสียงที่แตกต่างกัน ทำให้เราสามารถที่จะจำแนกชนิดของเสียงได้ดังต่อไปนี้ (พิชัย, 2552; Smith *et al.*, 1982; Foreman, 1990; Beranek, 1992)

1. เสียงที่ดังสม่ำเสมอ (Steady Noise) เป็นเสียงที่มีความเข้มของเสียงค่อนข้างคงที่ และต่อเนื่อง มีการเปลี่ยนแปลงระดับเสียงน้อยมาก คือประมาณไม่เกิน 5 dB ใน 1 วินาที เช่น เสียงจากเครื่องปรับอากาศ
2. เสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ (Fluctuating Noise) เป็นเสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของเสียงอย่างสม่ำเสมอ ไม่ต่อเนื่อง และมีการเปลี่ยนแปลงในระยะที่ยาวนาน เช่น เสียงการจราจรของยานพาหนะ เป็นต้น

3. เสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอ (Intermittent Noise) เป็นเสียงที่ไม่มีความต่อเนื่อง มักเกิดเป็นช่วงๆ ในระยะเวลาสั้นๆ เช่น เสียงของรถยนต์บรรทุกทุกหนที่วิ่งผ่านนานๆ ครั้งจากการจราจรที่ไม่หนาแน่น และเสียงจากเครื่องบินที่ขึ้นลงบริเวณสนามบิน

4. เสียงกระแทก (Impulse Noise) เป็นเสียงที่เกิดขึ้น โดยมีระดับเสียงค่อนข้างสูงในทันทีทันใดแล้วค่อยๆ จางหายไป การเกิดของเสียงชนิดนี้ มักมีระยะเวลาสั้นๆ เช่น เสียงของประทัด เสียงจากการยิงปืน หรือเสียงที่เกิดจากการบินผ่านกำแพงเสียง (Sonic Boom) ของเครื่องบินไอพ่น

ความเร็วจังหวะ

ความเร็วจังหวะ (Tempo) หมายถึง ความเร็วของบทเพลงต่างๆ ที่อัตราความช้าเร็วต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ประพันธ์เพลงผู้กำหนดจะทำให้มีความช้าเร็วเท่าไร อาจมีจังหวะเร็ว ปานกลาง หรือช้าก็ได้ แต่ต้องเคาะจังหวะให้ช่องของจังหวะห่างเท่ากันเสมอ ในทางปฏิบัตินั้น การกำหนดความช้าเร็วของแต่ละคนนั้นไม่เท่ากัน จึงมีผู้ประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้เคาะจังหวะขึ้นมา เรียกว่า “เมโทรโนม” (Metronome) เพื่อให้ใช้วัดว่าความช้าเร็วเท่าใดควรจะเคาะอย่างไร โดยการกำหนดเป็นศัพท์ทางดนตรีดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คำศัพท์ ความเร็ว ลักษณะ ความรู้สึกที่บ่งบอกจังหวะ

คำศัพท์	ความเร็ว (ครั้ง/นาที)	ลักษณะจังหวะ	ความรู้สึกของจังหวะ
Largo	40 – 60	ช้ามากมาก	เดินช้ามากมาก
Larghetto	61 – 66	ช้ามาก	เดินช้ามาก
Adagio	67 – 76	ช้า	เนิบๆ
Adante	77 – 108	ช้าปานกลาง	เดินแถว
Moderato	109 – 120	ปานกลางไม่ช้าไม่เร็ว	เรื่อยๆ สบายๆ
Allegro	121 – 168	เร็ว	ร่าเริง
Presto	169 – 208	เร็วมาก	ดุคั่น

ที่มา: คมสันต์ (2551)

เสียงสัญญาณอนาล็อก (Analog Audio) และสัญญาณดิจิทัล (Digital Audio)

สัญญาณเสียง Analog คือ เสียงทุกประเภทที่ไม่ได้จัดเก็บหรือสร้างขึ้นในรูปแบบสัญญาณ Digital เป็นสัญญาณประเภทต่อเนื่อง แต่ละคลื่นเสียงจะมีความถี่และความเข้มของสัญญาณแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดเสียงต่างๆ กันไป เช่น การบันทึกเสียงลงในเทปคาสเซตต์ สัญญาณเสียงจะถูกบันทึกแบบสัญญาณ Analog โดยการแปลงคลื่นเสียงในอากาศให้เปลี่ยนเป็นคลื่นไฟฟ้า แล้วจึงบันทึกไว้ในรูปสัญญาณแม่เหล็ก ข้อดีของเสียง Analog คือ มีคุณภาพสูง มีความใกล้เคียงกับเสียงต้นฉบับมาก ข้อเสีย คือ ระยะเวลาการเก็บรักษาเสียงในรูปแบบ Analog มีอายุการเก็บสั้น เมื่อเวลาผ่านไป คุณภาพเสียงที่ได้รับการบันทึกไว้จะมีคุณภาพแย่ลง และการมีเสียงรบกวน (Noise) อยู่มาก การคัดลอกเสียงในรูปแบบ Analog ซ้ำๆ หรือ การถ่ายโอนเสียงจากอุปกรณ์หนึ่งไปยังอีกอุปกรณ์ จะทำให้เกิด Noise สะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

สัญญาณเสียง Digital คือ เสียงที่จัดเก็บหรือสร้างขึ้นโดยใช้สัญญาณ Digital เป็นสัญญาณประเภทไม่ต่อเนื่อง เกิดจากการสุ่มเก็บตัวอย่าง (Sampling) คลื่นเสียง ณ จุดต่างๆ มาเก็บไว้ และแปลงลักษณะเสียงให้อยู่ในรูป Digital แทนค่าด้วยเลข 0 และ 1 ในระบบเลขฐานสอง เสียงสัญญาณ Digital มีคุณภาพน้อยกว่าเสียงต้นฉบับ ขึ้นกับการกำหนดคุณภาพเสียงของผู้ใช้ แต่ข้อดีของเสียงสัญญาณ Digital คือ ใช้งานง่าย สะดวกในการส่งต่อไฟล์เสียง และไม่มี Noise ดังนั้นการคัดลอกไฟล์เสียงจะมีคุณภาพเสียงเท่ากับเสียงที่ถูกคัดลอกจากไฟล์ต้นฉบับครั้งแรกเสมอ เสียงที่ถูกเก็บในรูปสัญญาณ Digital เช่น ซีดีเพลง และโปรแกรมตัดต่อเพลงหรือทำเพลงทางคอมพิวเตอร์ ส่วนใหญ่จะใช้กับไฟล์เสียงที่อยู่ในรูปสัญญาณ Digital

การสุ่มถี่หรือการสุ่มห่าง (Sample Rate)

ในการบันทึกเสียงในรูปแบบสัญญาณ Digital จะถูกบันทึกแบบสุ่มจับคลื่นเสียงมาเก็บไว้ในรูปของเลขฐานสองหรือระบบ Digital จำนวนการสุ่มจับหน้าคลื่น (Wave form) ตามแนวขวางใน 1 วินาที เรียกว่า Sample Rate มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz) หรือกิโลเฮิรตซ์ (kHz) เช่น ไฟล์เสียงมี Sample Rate เท่ากับ 8 kHz หมายถึง ใน 1 วินาที จะมีการสุ่มตรวจจับคลื่นเสียงจำนวน 8,000 ครั้ง ดังนั้นหากมี Sample Rate สูงมากขึ้นจะทำให้คุณภาพของไฟล์เสียงมีคุณภาพสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4 ค่า Sample Rate มาตรฐาน ของประเภทเสียงต่างๆ

ประเภทเสียง	Sample Rate (kHz)
แผ่นซีดีเพลงธรรมดา (Audio CD)	44.1
เสียงคลื่นวิทยุ FM	32
เสียงคลื่นวิทยุ AM	22
เสียงทางอินเทอร์เน็ต	8

ที่มา: อุเทน (2551)

ระดับความลึกของเสียง (Bit Depth)

ระดับความลึกของเสียง (Bit Depth) หมายถึง จำนวนการสุ่มเก็บข้อมูลคลื่นเสียงในแนวดิ่ง หรือระดับการเก็บข้อมูลความกว้างของหน้าคลื่น (Amplitude) มีหน่วยเป็น บิต (bit) เช่น ไฟล์เสียง มี Bit depth 16 bit หมายถึง การสุ่มจับคลื่น 1 ครั้ง จะมีการบันทึกข้อมูลเสียงที่แตกต่างกัน 2^{16} หรือ 65,536 ระดับ

ช่องของเสียง (Chanel)

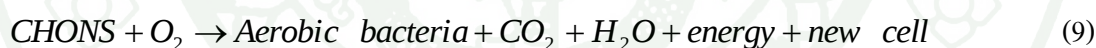
ช่องของเสียง (Chanel) แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ช่องเสียงเดี่ยว (Mono) และช่องเสียงคู่ (Stereo) โดยระบบเสียง Mono จะมีมิติ และความไพเราะน้อยกว่าระบบเสียง Stereo เนื่องจากระบบเสียง Stereo เป็นระบบเสียงที่คล้ายกับการฟังเสียงของมนุษย์ ที่มีหูซ้ายและขวา จึงเป็นระบบเสียงที่มีความสมจริงและสอดคล้องกับธรรมชาติการฟังของมนุษย์มาก ลำโพงในระบบ Stereo จึงเป็นลำโพงคู่ ในปัจจุบันเสียงในระบบ Stereo จึงเป็นที่นิยมมากกว่า แต่ระบบเสียง Mono ยังมีการใช้งานอยู่บ้างในงานที่ไม่ต้องคุณภาพเสียงสูงมากนัก เช่น การออกอากาศวิทยุ AM (อุเทน, 2551)

บทบาทของจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ และในระบบบำบัดน้ำเสีย

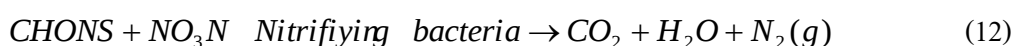
บทบาทสำคัญของจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ และในระบบบำบัดน้ำเสีย คือ ผู้ย่อยสลายขั้นที่ 1 (Primary Decomposers) ซึ่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเป็นปฏิกิริยาชีวเคมี (Biochemical Reaction) ในเซลล์ของแบคทีเรีย เพื่อให้ได้พลังงาน และนำพลังงานที่ได้ไปใช้ในกิจกรรมของเซลล์ ทั้งนี้ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนอิสระที่ละลายน้ำ โดยทั่วไปแล้วแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ปริมาณหนึ่ง และถูกใช้ในการออกซิโดซ์สารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) เมื่อออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำหมดลง การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในแหล่งน้ำจะเกิดสภาวะไร้ออกซิเจน โดยแบคทีเรียกลุ่มไร้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) โดยมีปฏิกิริยาชีวเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียได้ดังนี้

1. ปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Reaction) ประมาณร้อยละ 70 ของสารอินทรีย์ทั้งหมดถูกออกซิโดซ์โดยแบคทีเรียได้เป็น “พลังงาน” อีกประมาณร้อยละ 30 ของสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ถูกออกซิโดซ์โดยแบคทีเรียจะนำไปสร้างเป็นเซลล์ใหม่ดังนี้ (สมการที่ 9-15)

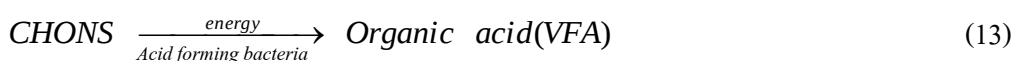
- ปฏิกิริยาที่ใช้ออกซิเจนอิสระ (Free O_2 for oxidizing organic matter)

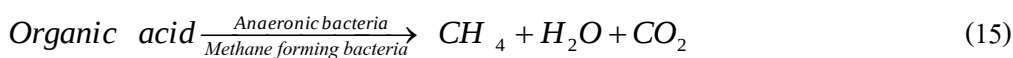
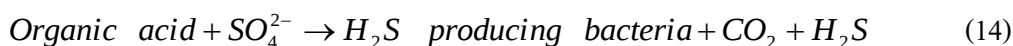


- ปฏิกิริยาที่ใช้ออกซิเจนในรูปสารประกอบ (NO_3-N)



2. ปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Reaction)





เนื่องจากความสามารถในการฟอกตัวตามธรรมชาติ (Self Purification) ของแหล่งน้ำเมื่อรับเอาสารอินทรีย์ต่างๆ ในปริมาณมาก ทำให้ไม่สามารถบำบัดได้หรือลดสารอินทรีย์ได้ทันเวลา ระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพซึ่งจำลอง และควบคุมให้สภาพต่างๆ เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย เป็นวิธีที่ช่วยให้คุณภาพน้ำทิ้งมีคุณภาพดีในระดับที่สามารถปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำได้ โดยไม่ทิ้งทำให้เกิดภาวะไร้ออกซิเจนในแหล่งน้ำ ทั้งนี้พรทิพย์ (2551) สรุปหน้าที่และกลไกการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ในระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งกลุ่มหลักคือ แบคทีเรีย ไว้ดังนี้

- กำจัดและลดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปบีโอดี (Removal of Carbonaceous BOD)
- สร้างตะกอน-ของแข็งให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจากอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเสีย (Coagulation of Non-settable Colloidal Solids)
- ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียมีเสถียร และคงตัว (Stabilization of Organic Matter)

จุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

เนื่องจากรูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ มีความแตกต่างกันในรายละเอียดย่อยของแต่ละกระบวนการ และข้อกำหนดการออกแบบของการเดินระบบแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อให้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีหลายลักษณะ ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป พบใน 2 ลักษณะคือ

1. แบบจุลินทรีย์แขวนลอย (Suspended Growth Microorganisms) เช่น ในระบบเอเอส ระบบบ่อปรับเสถียร ระบบเอสปีอาร์ ระบบบ่อหรือสระเติมอากาศ และระบบคลองวนเวียน เป็นต้น
2. แบบจุลินทรีย์ตรึง หรือ เกาะวัสดุ-ตัวกลาง (Fixed film or Attached Growth Microorganisms) พบในระบบที่มีตัวกลางอยู่กับที่ โดยน้ำเสียไหลสัมผัส หรือตัวกลางที่สัมผัสกับน้ำเสีย ดังนี้

- แบบตัวกลางอยู่กับที่ (Fixed Bed) เป็นรูปแบบที่จุลินทรีย์สร้าง และเจริญเกาะบนวัสดุที่เป็นตัวกลาง ซึ่งใส่ไว้ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียไหลเข้าระบบ และผ่านผิวตัวกลางที่มีจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ที่ผิวตัวกลางย่อยสลาย พบทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน เช่น ระบบโปรยกรอง ระบบถังกรองไร้ออกซิเจน เป็นต้น

- แบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Moving Bed) เป็นรูปแบบที่จุลินทรีย์เจริญ และเกาะที่ผิววัสดุตัวกลางที่บรรจุไว้ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีอุปกรณ์ประกอบระบบเพื่อทำให้เกิดลักษณะไฮโดรไดนามิกซ์ทำให้ตัวกลางเคลื่อนที่ในน้ำเสีย หรือสัมผัสกับน้ำเสีย ทั้งนี้ขนาด และน้ำหนักของตัวกลางยังมีส่วนต่อการเลือกรูปแบบการทำให้ตัวกลาง เคลื่อนที่และสิ้นเปลืองพลังงานด้วย

ทั้งนี้ระบบบำบัดน้ำเสียที่จุลินทรีย์เกาะกับตัวกลางพบว่า มีปริมาณของจุลินทรีย์ในระบบมากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบจุลินทรีย์แขวนลอย และระบบบำบัดแบบจุลินทรีย์เกาะกับตัวกลางเหมาะสมสำหรับกรณีที่ต้องการให้จุลินทรีย์กลุ่มที่เจริญเร็ว และโตช้าอยู่ร่วมกันกับระบบเพื่อการบำบัดเฉพาะ เช่น การบำบัดในโครเจนด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน หรือระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้สูงขึ้น เป็นต้น

กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ประกอบด้วยจุลินทรีย์ประเภทต่างๆ แบบผสมผสานและเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสีย หรือปัจจัยสภาวะแวดล้อมขณะเกิดกระบวนการชีวเคมีภายในเซลล์จุลินทรีย์ในการใช้สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงานภายในเซลล์ เช่น ปริมาณออกซิเจน ฟิเอช และอุณหภูมิ โดยกลุ่มจุลินทรีย์จำแนกออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ คือ แบคทีเรีย รา สาหร่าย โปรโตซัว และไวรัส แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งการมีจุลินทรีย์หลากหลายชนิดอยู่ในระบบบำบัดจะเกิดปฏิสัมพันธ์กันระหว่างจุลินทรีย์เป็น 3 แบบ คือ แบบเป็นตัวกลาง (Neutral Interaction) แบบช่วยเหลือกัน (Benevolent Interaction) และแบบเป็นศัตรูกัน (Antagonistic Interaction) (มันสิน, 2542) นอกจากจุลินทรีย์ที่กล่าวมาแล้ว ยังพบแบคทีเรียสายใย (Filamentous Bacteria) ในระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน แต่ละชนิดมีลักษณะและปัจจัยที่ทำให้เกิดขึ้นไม่เหมือนกัน

ตารางที่ 5 ชนิด และลักษณะสำคัญของจุลินทรีย์ที่สามารถพบได้ในระบบบำบัดทางชีวภาพ

กลุ่มจุลินทรีย์	ชนิด	ลักษณะสำคัญ
แบคทีเรีย (bacteria) ขนาดเล็ก อัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาณสูงซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการใช้สารอาหาร		
	Sheathed bacteria	จุลินทรีย์เส้นใยมีเปลือกหุ้ม มีการเจริญต่อไปเป็นจุลินทรีย์แฟลกเจลลาสามารถเปลี่ยนเหล็ก และแมงกานีสเป็นเหล็กออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์
	Stalked bacteria	ชนิดใช้อากาศ บางชนิดพบในแหล่งน้ำที่มีสารอินทรีย์ต่ำ และมีเหล็กสูง สามารถออกซิไดซ์ Fe^{2+} เป็น Fe^{3+}
	Budding bacteria	อยู่บริเวณผิวหน้าน้ำ
	Gliding bacteria	แบคทีเรียเส้นใย สามารถออกซิไดซ์ H_2S เป็น S^0
	Bdellovibrio	มีขนาดเล็ก
	Actinomycetes	แบคทีเรียเส้นใยคล้ายราสร้างสปอร์ ต้องการอากาศ เป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในอุตสาหกรรม สามารถสร้างสารปฏิชีวนะ
	Cyanobacteria	มีคลอโรฟิลล์เอ และรงควัตถุ สามารถสร้างก๊าซ และตรึงไนโตรเจนทนต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงได้
รา (fungi) ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน และพลังงาน สร้างสปอร์ มีบทบาทในการหมุนเวียนสารอาหารในสิ่งแวดล้อม สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะกรดและสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง หลายชนิดก่อโรคในพืชและทำลายเมล็ดธัญพืช		
	Phycomycetes	อยู่บนผิวน้ำของพืช และสัตว์น้ำ
	Ascomycetes	มีรงควัตถุ บางชนิดก่อโรคในคน และสามารถใช้ในอุตสาหกรรม
	Basidiomycetes	บางชนิดมีพิษ
	Fungi imperfecti	ผลิตสารปฏิชีวนะที่สำคัญ สาเหตุของโรคพืช และคน
สาหร่าย (algae) เรียกว่า แพลงก์ตอนพืช มีบทบาทเป็นผู้ผลิตขั้นต้นในสิ่งแวดล้อมน้ำ มีคลอโรฟิลล์ และรงควัตถุ บางชนิดใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน และพลังงาน บางชนิดเป็นสาหร่าย		

ตารางที่ 5 (ต่อ)

กลุ่มจุลินทรีย์	ชนิด	ลักษณะสำคัญ
โพรโตซัว (protozoa) มีบทบาทต่อสุขภาพคน และระบบบำบัดน้ำเสีย ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง บางชนิดเป็นปรสิตในสัตว์และคน		
	Sarcodina (Amoebae)	ขนาดตั้งแต่ 10-200 ไมครอน เจริญได้ดีในสภาวะออกซิเจนต่ำ
	Mastigophora (Flagellates)	ขนาดเล็ก บ่งชี้ว่าอยู่ในสภาวะมีสารอินทรีย์ย่อยสลายง่ายสูง
	Ciliphora (Ciliates)	เคลื่อนไหวโดยขน บ่งชี้สภาวะการดำเนินงานของระบบบำบัดได้ดี
	Rotifers	ขนาดใหญ่ บ่งบอกถึงสภาวะดำเนินงานของระบบ
ไวรัส (virus) มีขนาดเล็ก อาศัยในสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ		

ที่มา: คัดแปลงจาก Bitto (1994); Jenkins (1993)

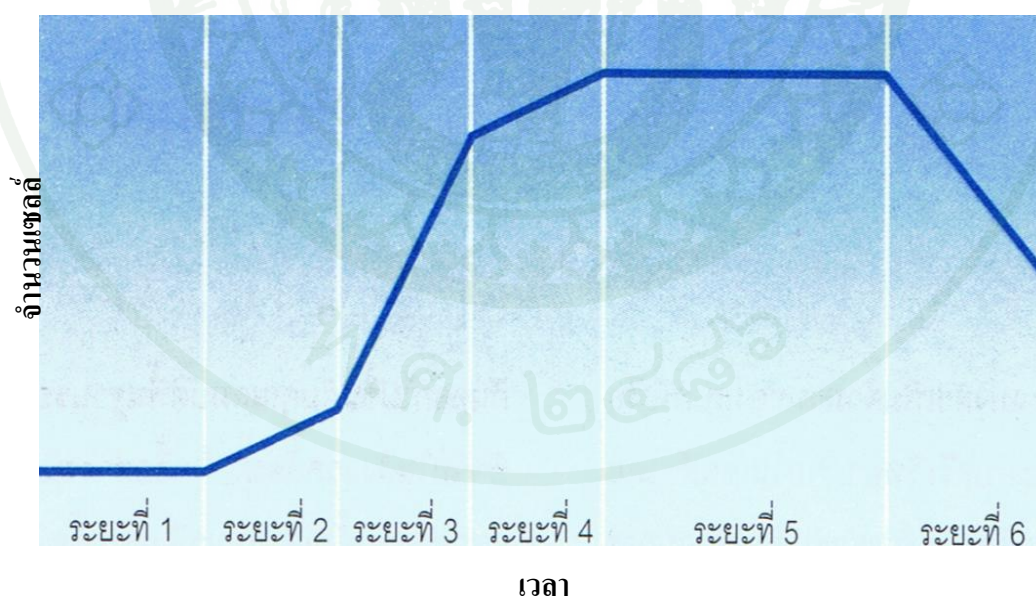
อัตราการเจริญของจุลชีพในระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพ

การเจริญและการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียอาศัยการทำงานของระบบชีววิทยาภายในเซลล์ โดยเฉพาะขบวนการเมตาบอลิซึม ซึ่งประกอบด้วยขบวนการพื้นฐาน 2 ส่วน คือ การย่อยสลายสารอาหารเพื่อก่อให้เกิดพลังงาน และการนำพลังงานที่เกิดขึ้นไปใช้ในการสร้างสารชีวภาพ เพื่อนำสู่การทำงานและสร้างส่วนประกอบของเซลล์ต่อไป เซลล์แบคทีเรียสร้างเอนไซม์และโปรตีนอื่นหลายชนิดร่วมกับการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เพื่อควบคุมขบวนการเมตาบอลิซึมให้ปกติ แต่ทั้งนี้ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น สารอาหาร อุณหภูมิ ส่วนประกอบของก๊าซในอากาศ ความเป็นกรด-ด่าง และแหล่งพลังงาน มีอิทธิพลสำคัญต่อขบวนการเมตาบอลิซึม และส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย แต่เมื่อจุลชีพอยู่ในสภาพแวดล้อมทางกายภาพที่เหมาะสมแล้ว อัตราการเจริญของจุลชีพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอาหาร โดยสามารถวัดอัตราการเจริญของจุลชีพจากจำนวนหรือน้ำหนักของจุลชีพที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการเจริญนี้จะสัมพันธ์กับระยะเวลา

การเจริญของเชื้อแบคทีเรีย (Bacterial Growth)

เชื้อแบคทีเรียมีการเจริญขยายขนาดของเซลล์จนระดับหนึ่งจึงจะเกิดการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยการแบ่งตัวจากเซลล์แม่หนึ่งเซลล์ออกเป็นเซลล์ 2 เซลล์ เรียกว่า Binary Fission โดยเซลล์ลูกทั้ง 2 ประกอบด้วย โครงสร้างทางพันธุกรรม และส่วนประกอบของเซลล์ที่เหมือนกันทุกประการ และสามารถเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนต่อไป ระยะเวลาในวงจรชีวิตการเจริญของเซลล์แบคทีเรียตั้งแต่ถือกำเนิดขึ้นจากการแบ่งตัวของเซลล์แม่จนกระทั่งแบ่งตัวได้เซลล์ลูกเรียกว่า ระยะเวลาแบ่งตัว (Generation time หรือ doubling time) ซึ่งอาจแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อแต่ละชนิดและปัจจัยในสิ่งแวดล้อม (เช่น เชื้อ *Escherichia coli*) จนกระทั่งมากถึง 24 ชั่วโมง (เช่น เชื้อ *Mycobacterium tuberculosis*) หรือเชื้อชนิดเดียวกันอาจมีระยะแบ่งตัวเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจริญอยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิ หรือความสมบูรณ์ของแหล่งอาหารแตกต่างกันเป็นต้น เชื้อที่มีระยะแบ่งตัวสั้นจึงมีอัตราการเจริญอย่างรวดเร็

ลักษณะแบบแผนการเจริญของเชื้อแบคทีเรียสามารถแบ่งออกเป็นระยะแสดงได้ด้วยกราฟการเจริญ (Growth Curve) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 อัตราการเจริญของจุลินทรีย์กับระยะเวลา

ที่มา: ภัทรชัย (2549)

ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 ระยะ ได้แก่

1. Lag phase เป็นระยะปรับตัวของเซลล์เพื่อเตรียมตัวสำหรับการเจริญกับสภาพแวดล้อมในระบบบำบัด ซึ่งจะยังไม่มี การเจริญเติบโต

2. Acceleration phase เป็นช่วงที่จุลชีพมีการเจริญ จำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

3. Logarithmic phase (Exponential phase) เป็นช่วงที่จุลชีพเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว แต่ค่าอัตราการเจริญจำเพาะมีค่าคงที่ หรือเรียกว่า Steady State ซึ่งความหนาแน่นเซลล์และความเข้มข้นของตะกอนคงที่ เป็นช่วงที่สำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียในระบบ

4. Retardation phase (Declining phase) เป็นช่วงที่มีจำนวนจุลชีพคงที่ และค่าอัตราการเจริญจำเพาะลดลงเนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียน้อยลง

5. Stationary phase เป็นช่วงเวลาที่จำนวนจุลชีพคงที่ และค่าอัตราการเจริญเท่ากับอัตราการตาย

6. Endogenous phase เป็นช่วงที่จุลชีพลดจำนวนลงอย่างมาก และค่าอัตราการเจริญจำเพาะติดลบ

ปัจจัยสำหรับการเจริญ (Growth factor)

การเจริญของเชื้อแบคทีเรียจำเป็นต้องอาศัยสารอาหาร น้ำ ปัจจัยในสิ่งแวดล้อมหลาย อย่างเช่น แหล่งพลังงาน อุณหภูมิ ส่วนประกอบก๊าซในบรรยากาศ ความเป็นกรด-ด่าง และแรงดัน ออสโมติก เป็นต้น สภาพที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย (Optimal condition) คือ สภาพที่มีความสมดุลของปัจจัยดังกล่าวร่วมกัน โดยปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่

1. สารอาหาร แร่ธาตุและวิตามินบางชนิด เป็นปัจจัยพื้นฐานที่เชื้อแบคทีเรียต้องการ สำหรับการสร้างส่วนประกอบของเซลล์ และการทำงานที่ปกติของขบวนการเมตาบอลิซึม
2. อุณหภูมิ ระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมมีผลทำให้ขบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์สามารถทำงานได้ปกติ และทำให้เซลล์สามารถเจริญแบ่งตัวได้รวดเร็ว เชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดมีระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมแตกต่างกัน
3. ส่วนประกอบของก๊าซในบรรยากาศ เชื้อแบคทีเรียสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มตามระดับของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศที่เหมาะสมสำหรับการเจริญ ได้แก่ (ภัทรชัย, 2549)
 - 3.1 Aerobe (Obligate aerobe หรือ Strict aerobe) เจริญได้เฉพาะในบรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจนในระดับปกติ
 - 3.2 Facultative anaerobe เจริญได้ดีทั้งในบรรยากาศที่มีและไม่มีก๊าซออกซิเจน
 - 3.3 Microaerophilic เจริญได้ดีในบรรยากาศที่ก๊าซออกซิเจนต่ำประมาณ 5-10%
 - 3.4 Anaerobic (Obligate anaerobic หรือ Strict anaerobic) เจริญได้เฉพาะในบรรยากาศที่ปราศจากก๊าซออกซิเจน
4. ความเป็นกรดด่าง เชื้อแบคทีเรียโดยทั่วไปเจริญได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกลาง หรือ มีค่า pH โดยเฉลี่ยที่ 6-8 เรียกเชื้อที่มีคุณสมบัตินี้ว่า Neutralophile เชื้อบางกลุ่มสามารถเจริญได้ดีในสภาพที่มีความเป็นกรด ซึ่งอาจมีระดับ 2-3 ส่วนเชื้อกลุ่ม Alkalophile สามารถเจริญที่ความเป็นด่างซึ่งอาจมีระดับ pH สูงถึง 10-11
5. ระดับประจุไอออนและแรงดันออสโมติก เชื้อแบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถทนต่อความแตกต่างในความเข้มข้นของประจุไอออนและแรงดันออสโมติกได้ในระดับสูง เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์สามารถควบคุมสมดุลของระดับประจุไอออนและแรงดันออสโมติกระหว่างภายในและภายนอกเซลล์

6. ความเข้มข้นของเกลือ แบคทีเรียบางชนิดมีความต้องการเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในการเจริญซึ่งอาจมีระดับความเข้มข้นของเกลือแตกต่างกันไปตามชนิดเชื้อ เรียกเชื้อในกลุ่มนี้ว่า Halophile

สุรวิทย์ (2545) กล่าวว่า การตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมของแบคทีเรียที่อยู่ตามธรรมชาติมักประสบปัญหาสภาวะสิ่งแวดล้อมและแหล่งอาหารมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องตอบสนองและมีการปรับตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงนั้น ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียชนิดสังเคราะห์แสงจะเคลื่อนที่เข้าหาแสง ส่วนพวกที่ต้องการกลูโคสจะเคลื่อนที่เข้าหาบริเวณที่มีน้ำตาล นอกจากนี้แบคทีเรียยังมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมที่ความดันออสโมติก (Osmotic pressure) เปลี่ยนไปเพื่อป้องกันอันตรายจากการได้รับหรือสูญเสีย น้ำมากเกินไป การตอบสนองเหล่านี้ช่วยให้แบคทีเรียดำรงชีวิตได้

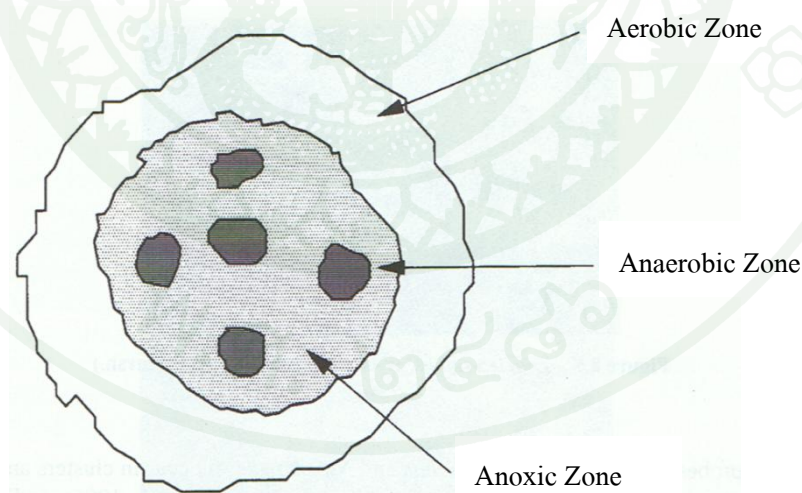
การตอบสนองดังกล่าวของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับโปรตีนชนิดพิเศษที่อยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม โปรตีนเหล่านี้ฝังตัวทะลุผ่านชั้นของเยื่อหุ้มเซลล์ ดังนั้นปลายด้านหนึ่งจะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ขณะที่ปลายด้านตรงข้ามสัมผัสกับไซโทพลาสซึม ภายในเซลล์ ส่วนโปรตีนที่อยู่ในเพอริพลาสซึม (Periplasm: บริเวณระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์กับเยื่อหุ้มด้านนอกของแบคทีเรียแกรมลบ ส่วนแบคทีเรียแกรมบวกเป็นบริเวณระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์) คือ ตัวรับทางเคมี (Chemoreceptor) ทำหน้าที่จดจำและยึดติดกับสารเคมีในสิ่งแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นสัญญาณทางโมเลกุล (Molecular signal) และมีความจำเพาะต่อกัน การจับกันของสัญญาณโมเลกุลกับโปรตีนมีผลทำให้โปรตีนเยื่อหุ้มที่อยู่ด้านในเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วกระตุ้นโมเลกุลอื่นๆ ต่อไป จนแพร่เข้าสู่ไซโทพลาสซึมและกระตุ้นเซลล์ ตัวอย่างหนึ่งของการตอบสนองแบบนี้คือ เมื่อแบคทีเรียสัมผัสกับสารที่ต้องการจะเคลื่อนที่เข้าหาสารนั้น เช่น ถ้าวางหลอดรูขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่มีกลูโคสอยู่ในลงในสารแขวนลอยของ *E. Coli* แบคทีเรียชนิดนี้จะว่ายเข้าหากลูโคสที่แพร่กระจายออกมาจากปลายหลอด

ลักษณะของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ฟล็อกของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแบบ Activated Sludge หรือเอเอส (AS) ประกอบด้วย เซลล์แบคทีเรีย สารอนินทรีย์ และอนุภาคสารอินทรีย์อยู่ร่วมกัน โดยขนาดของฟล็อกอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน (ซึ่งเป็นขนาดของเซลล์แบคทีเรียบางชนิด) จนขนาดใหญ่กว่า 1000 ไมครอน (ขนาดเฉลี่ยระหว่าง 50-200 ไมครอน) เซลล์ที่มีชีวิตอยู่ในฟล็อกวัดได้ด้วยกร

ใช้เทคนิควิเคราะห์ ATP และปฏิกิริยา Dehydrogenase activity ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 5-20 ของเซลล์ทั้งหมด บางข้อมูลรายงานว่า ส่วนที่มีชีวิตของเซลล์แบคทีเรียในฟล็อกมีค่าระหว่าง 1-3%

จุลินทรีย์แขวนลอยในรูปของฟล็อกในระบบเอเอสประกอบด้วย กลุ่มแบคทีเรียเป็นกลุ่มจุลินทรีย์หลักที่พบมากที่สุด ที่มีจำนวนมากกว่า 300 สายพันธุ์ ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปละลายน้ำเพื่อสร้างพลังงาน และสังเคราะห์เซลล์ให้มีความหนาแน่นมากขึ้น จัดอยู่ในกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย (Heterotrophic bacteria) และกลุ่มที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารเริ่มต้นสำหรับพลังงานและเซลล์ใหม่ เรียกว่า ออโตโทรฟิกแบคทีเรีย (Autotrophic bacteria) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับปริมาณความเข้มข้นคาร์บอน และไนโตรเจน ในน้ำเสียเข้าระบบบำบัด อย่างไรก็ตามพบว่า กลุ่มแบคทีเรียในระบบเอเอสมีทั้งชนิดแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน และหมู่ (Genus) ที่สามารถเจริญได้ทั้งสองสภาวะร่วมกันในระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Citromonas*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Comonas*, *Brevibacterium* และ *Zoogloea* ซึ่งชนิดหลังสุดมีบทบาททำให้เกิดฟล็อก โดยฟล็อกที่มีขนาดใหญ่จะพบสัดส่วนกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนลดลงเมื่อฟล็อกใหญ่ขึ้น โครงสร้างของฟล็อกมีส่วนของกลุ่มแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ที่ชั้นในของฟล็อก ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens/ Methane former) แสดงลักษณะโครงสร้างดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างฟล็อกตามการแพร่กระจายของออกซิเจน

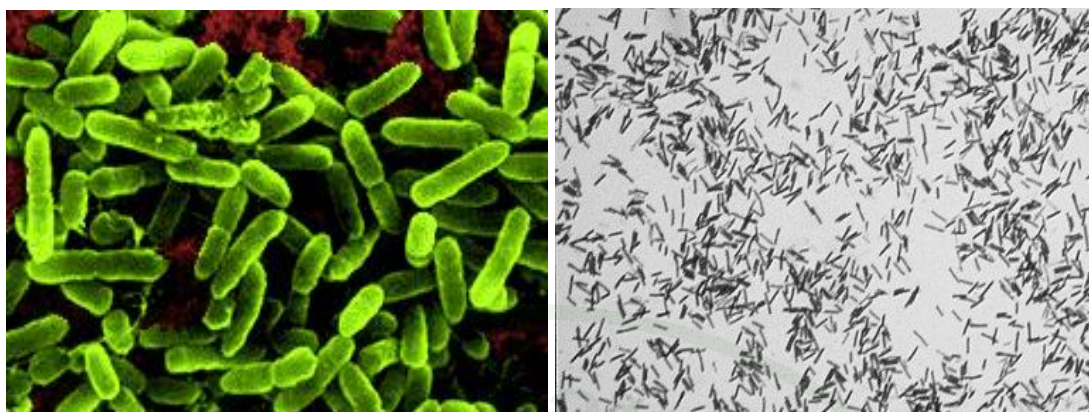
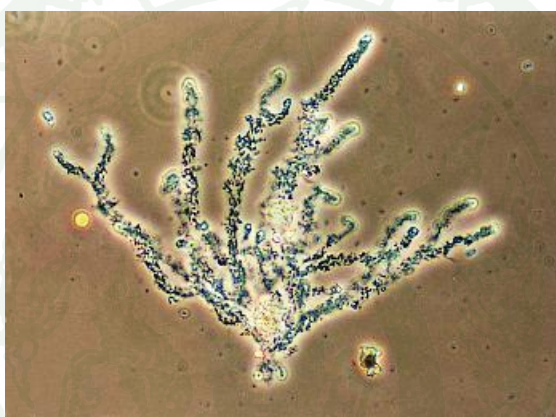
ที่มา: Wu et al. (1987)

โดยทั่วไปแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย (Heterotrophic bacteria) ในระบบ Activated Sludge หรือเอเอส ประกอบด้วยสมาชิกของแบคทีเรียหมัก (Genus) ต่างๆ ได้แก่ *Pseudomonas*, *Zoogloea*, *Nocardia*, *Achromobacter*, *Bdellovibrio*, *Mycobacterium*, (Jenkins *et al.*, 1993) และพวกจุลินทรีย์กลุ่มเส้นใย (Filamentous form) ได้แก่ *Sphaerotilus*, *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Lecicothrix* และ *Geotricchum* เป็นต้น สัดส่วนการกระจายตัวของชนิดแบคทีเรียแบบใช้ออกซิเจนในระบบเอเอสมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 6 และตัวอย่างภาพที่ 8

ตารางที่ 6 การกระจายตัวของแบคทีเรียแบบใช้ออกซิเจนในระบบเอเอสมาตรฐาน

กลุ่ม/ ชนิด	ร้อยละของเชื้อทั้งหมดที่แยกได้
<i>Comamonas-Pseudomonas</i>	50.0
<i>Alcaligenes</i>	5.8
<i>Pseudomonas</i> (fluorescent group)	1.9
<i>Paracoccus</i>	11.5
<i>Unidentified</i> (gram negative rod)	1.9
<i>Aromonas</i>	1.9
<i>Flavobacterium-Cytophaga</i>	13.5
<i>Bacillus</i>	1.9
<i>Micrococcus</i>	1.9
<i>Coryneform</i>	5.8
<i>Arthrobacter</i>	1.9
<i>Aurebacterium-Microbacterium</i>	1.9

ที่มา: Hiraishi *et al.* (1989)

(A) *Pseudomonas* sp.(B) *Bacillus* sp.(C) *Zoogloea* sp.

ภาพที่ 8 ตัวอย่างแบคทีเรียกลุ่ม Heterotrophic

ที่มา: (A) Antony (2001)

(B) Raman Spectroscopy Research group (2010)

(C) Christian (2002)

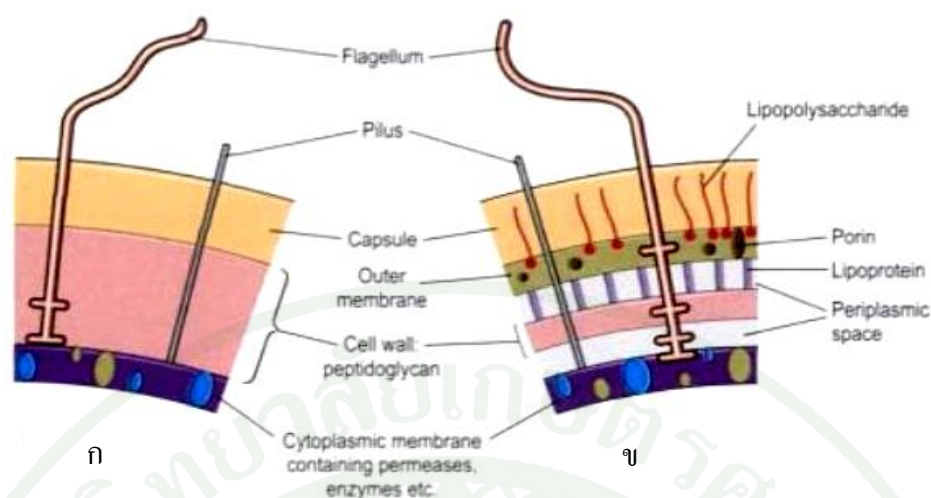
ความแตกต่างระหว่างแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ

สุรวิตย์ (2545) ศึกษาถึงลักษณะบางประการของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ ดังตารางที่ 7 และความแตกต่างระหว่างแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบดังภาพที่ 9

ตารางที่ 7 ลักษณะบางประการของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ

ลักษณะ	ความแตกต่าง	
	แบคทีเรียแกรมบวก	แบคทีเรียแกรมลบ
1. โครงสร้างผนังเซลล์	ชั้นเดียว (monolayer) หนา 15-80 นาโนเมตร	3 ชั้น (multilayer) หนา 10-15 นาโนเมตร
2. องค์ประกอบผนังเซลล์	มีลิพิด (1-4%) มีเพปทิโดไกลแคนมากกว่า 50% ของน้ำหนักแห้ง มีกรดไทโคอิก	มีลิพิดมาก (11-22%) มีเพปทิโดไกลแคนน้อยคือ 10% ของน้ำหนักแห้ง ไม่มีกรดไทโคอิก
3. การตอบสนองต่อเพนนิซิลลิน	ไวมาก	น้อย
4. สีคริสตัลไวโอเลต ขั้นตอนการเจริญเติบโต	ชัดเจน	น้อย
5. ความต้องการสารอาหาร	ซับซ้อน	ธรรมดา
6. ความทนทานต่อการทำลายทางกายภาพ	ดี	น้อย
7. ความทนทานแรงดันออสโมติก	มาก (25 เท่าของบรรยากาศ)	น้อย (5 เท่าของบรรยากาศ)
8. ผลของไลโซไซม์	ย่อยผนังเซลล์	ทนต่อการถูกย่อย

ที่มา: คัดแปลงจาก Mckane *et al.* (1996)



ภาพที่ 9 ความแตกต่างระหว่าง (ก) แบคทีเรียแกรมบวก (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

ที่มา: Spicer (2000)

แบคทีเรียแกรมบวกรูปแท่ง (Gram-Positive Bacilli)

วงศ์ (Family) Bacillaceae ประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นแท่งและสร้างสปอร์ภายในเซลล์ แบคทีเรียสกุล *Bacillus* มีประมาณ 48 ส่วนใหญ่ดำรงชีวิตแบบ Saprophyte เพียงสปีชีส์เดียวที่เป็นตัวก่อโรคที่แท้จริง คือ *Bacillus anthracis* แต่อย่างไรก็ตามบางตัวก็อาจฉวยโอกาสก่อโรคได้ เช่น *B. cereus*, *B. megaterium*, *B. mycoides* และ *B. subtilis* โดยเฉพาะ *B. cereus* ที่เป็นสาเหตุให้อาหารเน่าเสีย

แหล่งที่พบเชื้อ (Natural habitat)

Bacillus เป็นแบคทีเรียที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ โดยมีการกระจายของเชื้อไปอย่างกว้างขวางทั่วโลก มักจะอาศัยในระบบนิเวศแบบ Saprophytes ในพื้นดิน ซึ่งอาจจะกระจายไปกับฝุ่นละออง สายน้ำ หรือติดไปกับพืชและสัตว์ได้ การที่เชื้อสามารถอยู่รอดได้ในระหว่างที่เชื้อแพร่กระจายออกไป เนื่องจากเชื้อสร้างสปอร์มีความทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี นอกจากนั้นแบคทีเรียในสกุล *Bacillus* ยังมีคุณสมบัติทางสรีรวิทยาที่แตกต่างกันมากมาย ทำให้แบคทีเรียในสกุลนี้มีทั้งพวกที่เป็น Mesophile และ Halophile แบคทีเรียในสกุลนี้จึงสามารถจะเจริญได้ในที่มี

อุณหภูมิเย็นจัด หรือร้อนจัด พีเอชที่สูง หรือต่ำมาก หรือในสภาพที่มีเกลือเข้มข้นสูง ทำให้เราพบแบคทีเรียในสกุลนี้ได้ทุกๆ แห่ง ไม่ว่าจะเป็นในพื้นดิน น้ำพุร้อน น้ำจืด หรือน้ำทะเล

รูปร่างลักษณะและการติดสี (Cell morphology and staining)

Bacillus จะมีรูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยม และมีสปอร์ภายในเซลล์ (Endospore) ตำแหน่งของสปอร์จะต่างกันไปตามสปีชีส์ซึ่งมีความสำคัญในการแบ่งกลุ่มของ *Bacillus* เกือบทั้งหมดจะมีแฟลกเจลลาข้างๆ เซลล์ (Lateral flagella) ทำให้เคลื่อนที่ได้ ยกเว้น *B. anthracis* จะไม่มีแฟลกเจลลา จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่มีแคปซูลหุ้มเซลล์ เราสามารถแบ่งแบคทีเรียในสกุลนี้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามขนาดของ Vegetative cell คือ กลุ่มที่มีเซลล์ขนาดเล็ก จะมีขนาดความกว้างของเซลล์ประมาณ 0.6-0.8 ไมโครเมตร และยาว 1.5-3 ไมโครเมตร ส่วนกลุ่มที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดความกว้าง 1.0-1.5 ไมโครเมตร และยาว 2-5 ไมโครเมตร ส่วนใหญ่ย้อมติดสีแกรมบวก มีบางสปีชีส์เท่านั้นที่จะไม่แน่นอนในการติดสี โดยเฉพาะเมื่อนำเชื้อที่อยู่ในระยะท้ายๆ ของการเจริญมาย้อม เมื่อนำเซลล์ของ *B. anthracis*, *B. cereus* และบางสปีชีส์ที่ย้อมสีแล้วมาส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์อาจพบถุงกลมๆ ภายใน Cytoplasm เรียกว่า Protoplasmic globules ซึ่งเป็นถุงที่สะสมสาร Poly-beta-hydroxybutyrate ซึ่งได้มาจากการ metabolic ของเซลล์

ลักษณะการเจริญเติบโต (Growth Characteristics)

แบคทีเรียทุกตัวในสกุล *Bacillus* สามารถเจริญได้บนอาหารเลี้ยงเชื้อต่างๆ ไป ขนาดของโคโลนีค่อนข้างใหญ่ มีขนาดตั้งแต่ 2-7 มิลลิเมตร ผิวขรุขระ แห้งคล้ายฝุ่น หรือมีริ้วรอย เป็นเส้นที่แตกออกจากจุดศูนย์กลาง อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวอาจเจริญลอยอยู่บนผิวน้ำคล้ายสิ่งสกปรกที่ผิวน้ำอาหารเลี้ยงเชื้ออาจจะขุ่นหรือใส และมีตะกอนอยู่ที่ก้นหลอด เชื้อเจริญเติบโตได้ดีขึ้น หากเสริมความสมบูรณ์ของอาหารเลี้ยงเชื้อด้วย Glucose แต่การใส่ซีรัมหรือเลือดไม่มีผลให้เชื้อเจริญได้ดีขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญอยู่ในช่วง 25-27 องศาเซลเซียส บางชนิดเจริญได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 12 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดที่เชื้อสกุลนี้สามารถเจริญได้คือ 55 องศาเซลเซียส ยกเว้นพวก Thermophile เช่น *B. stearothermophilus* จะเจริญได้ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส *Bacillus* เกือบทุกสปีชีส์เป็นพวกที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญ แต่ *B. anthracis* และ *B. cereus* สามารถเจริญได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (พรทิพภา, 2536)

แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*

บาซิลลัส ทุริงเจนซิส (*Bacillus thuringiensis*) Bt หรือ แบคทีเรียบีที กระจายตัวอยู่ตามธรรมชาติ ทั้งในดิน น้ำ ตัวอ่อนของแมลง เศษใบพืชที่ย่อยสลาย รำข้าว ฝุ่นละอองตามโรงเก็บเมล็ดพันธุ์ แบคทีเรียบีที เป็นแบคทีเรียแกรมบวก เซลล์รูปร่างเป็นท่อนต่อกันเป็นสายลูกโซ่ สามารถสร้างสปอร์และผลึกโปรตีน ซึ่งมีส่วนประกอบของเซลล์เอนโดทอกซิน (Delta endotoxin) ที่มีฤทธิ์ในการทำลายแมลง (จริยา, 2547) มีหางแบบ Paritrichous flagella เซลล์แบคทีเรียมีขนาด 1.0-1.2×3.0-4.5 ไมครอน เชื้อมีการสร้างสปอร์รูปไข่ขนาด 0.5×2 ไมครอน

การจำแนกชั้นสแบคทีเรียของ *Bacillus thuringiensis* คือจัดอยู่ใน

Kingdom Eubacteria

Phylum Firmicutes

Class Bacilli

Order Bacillales

Family Bacillaceae

Genus *Bacillus*

Species *Bacillus thuringiensis*



ภาพที่ 10 ลักษณะรูปร่างของ *Bacillus thuringiensis*

ที่มา: Romney (2010)

แบคทีเรียแกรมลบรูปแท่ง (Gram-Negative Bacilli)

เชื้อ *Pseudomonas* หรือ pseudomonads พบอาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมทั่วไป ทั้งในดิน น้ำ พืช และสัตว์ รวมทั้งสามารถพบได้ในอาหาร และของใช้ต่างๆ หลายสปีชีส์พบเป็นเชื้อก่อโรคในพืช และสัตว์ เชื้อ *Pseudomonas* เป็นแบคทีเรียแกรมลบรูปแท่ง ขนาดประมาณ $0.5-1 \times 1.5-5$ ไมครอน มักพบอยู่เป็นเซลล์เดี่ยวหรืออาจอยู่เป็นคู่ ไม่สร้างสปอร์ บางสายพันธุ์สามารถสร้างแคปซูลได้ เชื้อเคลื่อนที่ได้ด้วยแฟลกเจลลาที่อยู่ส่วนปลายเซลล์ 1 เส้น บางสปีชีส์อาจมีมากกว่า 1 เส้น จัดอยู่ในกลุ่ม Obligate Aerobe แต่บางสายพันธุ์เจริญได้ในบรรยากาศที่ไม่มีก๊าซออกซิเจนหากมีสาร Nitrate หรือ Arginine เป็นตัวรับ อิเล็กตรอนแทนออกซิเจนในขบวนการหายใจ

แหล่งที่พบเชื้อ (Natural habitat)

Pseudomonas โดยทั่วไปแล้วจะอาศัยอยู่ในดินและน้ำ อีกทั้งยังสามารถอาศัยอยู่ที่ผิวหนัง ช่อกิ่ง และในอุจจาระของคนที่มีสุขภาพแข็งแรงต่างๆ ไปอีกด้วย เรามักจะพบมันบ่อยๆ อยู่เป็นโคโลนีที่อาหารในโรงพยาบาล อ่างล้างมือ ไม้ถูพื้น และอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจ เป็นแอโรบิก บางชนิดเลี้ยงแบบแอโรบโดยใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน

รูปร่างลักษณะ (Cell morphology)

แบคทีเรียในแฟมิลีนี้ มีรูปร่างเป็นท่อนตรงหรือโค้งเล็กน้อย เคลื่อนที่ได้โดยใช้แฟลกเจลลาที่ขั้วเซลล์ ให้ผลคาตาเลสเป็นบวก และมักให้ออกซิเดสบวก อีกทั้งมีเมทาบอลิซึมในการหายใจ แต่ไม่มีการหมัก จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโต ซึ่งทำให้มีปฏิกิริยา Catalase-positive และ Oxidase-positive ปริมาณ G+C (Guanine+Cytosine) ของแบคทีเรียในแฟมิลีนี้เท่ากับ 50-70 โมลเปอร์เซ็นต์

ลักษณะการเจริญเติบโต (Growth Characteristics)

แบคทีเรียสายพันธุ์นี้สามารถเจริญได้ในที่อุณหภูมิต่ำ (4 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า) ดังนั้นจึงทำให้เชื้อ *Pseudomonas* เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหารที่แช่หรือเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ และในอาหารที่มีน้ำตาลจะสร้างกรดได้น้อย การสร้างกรดจากน้ำตาลไม่เป็นประโยชน์ในการแยกชนิด ตัวอย่างเช่น *Pseudomonas aeruginosa* ให้รงควัตถุสีฟ้าไพโอไซแอนิน (Pyocyanin) และ

ไพโอเวอดิน (Pyoverdine) ซึ่งเป็นรงควัตถุฟลูออเรสเซนต์ที่ละลายน้ำ เป็นแซโพรไฟต์ในดิน ในน้ำ แต่อาจเป็นเชื้อฉวยโอกาสทำให้เกิดโรค (นงลักษณ์ และปรีชา, 2552)

แบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

ลักษณะของเซลล์เป็นรูปแท่ง หัวท้ายโค้งมน ดิคลีแกรมลบขนาด $0.5-1.0 \times 1.5-5.0$ ไมโครเมตร พบ Flagella มากกว่า 1 เจริญได้ดีที่มีออกซิเจน เจริญได้ที่ 4 องศาเซลเซียส (ไม่เจริญที่ 41 องศาเซลเซียส) สามารถเรืองแสงได้ภายใต้แสง UV ดำรงชีวิตได้โดยได้รับอาหารพวกอินทรีย์สารจากสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว (Saprophytic)

การจำแนกชั้นสแบคทีเรียของ *Pseudomonas fluorescens* คือจัดอยู่ใน

Kingdom Bacteria

Phylum Proteobacteria

Class Gamma Proteobacteria

Order Pseudomonadales

Family Pseudomonadaceae

Genus *Pseudomonas*

Species *Pseudomonas fluorescens*



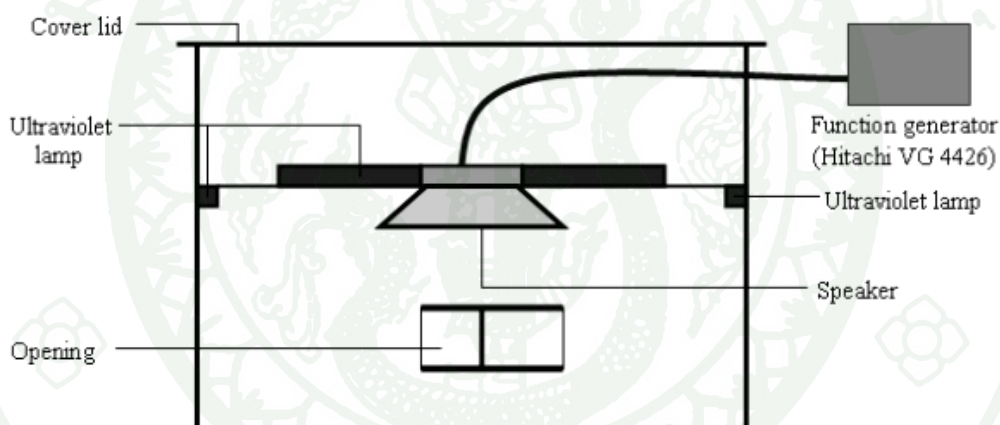
ภาพที่ 11 ลักษณะรูปร่างของ *Pseudomonas fluorescens*

ที่มา: Napavalley (2010)

ความถี่เสียงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Experimental Investigation on the Effects of Audible Sound to the Growth of *E. coli*

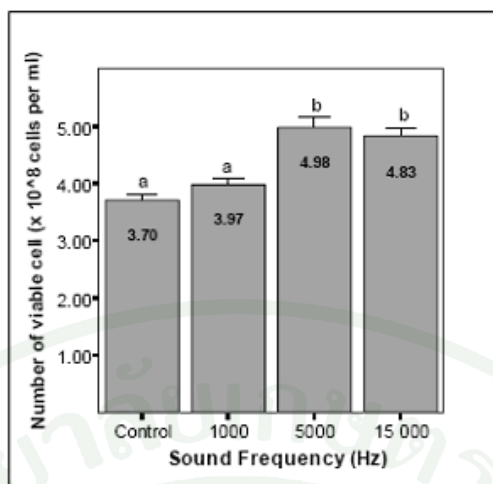
งานวิจัยนี้ได้รายงานผลการทดลองถึงผลกระทบของ Audible sound ต่อการเจริญเติบโตของ *Escherichia coli* (*E. coli*) สารละลายมาตรฐานแบคทีเรีย *E. coli* ที่กำหนดความเข้มข้น ถูกใช้เพาะเลี้ยงในอาหาร NB และ NA ตลอดการทดลองในครั้งนี้ ในขั้นแรกตัวอย่างของ NB ถูกนำไปบ่มเพาะเลี้ยงที่ 37°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใน water bath-shaker และตัวอย่างของ NA ถูกเพาะเลี้ยงในตู้บ่มเพาะเชื้อตามวิธีการทั่วไป จากนั้นย้ายตัวอย่างไปที่ Acoustic chamber JedMark LV-1 (ดังภาพที่ 12) ด้วยการใช้ sound treatment ควบคุมอุณหภูมิที่ $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างอาหาร NB และ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างอาหาร NA



ภาพที่ 12 ลักษณะโครงสร้างของ JedMark LV-1 acoustic chamber

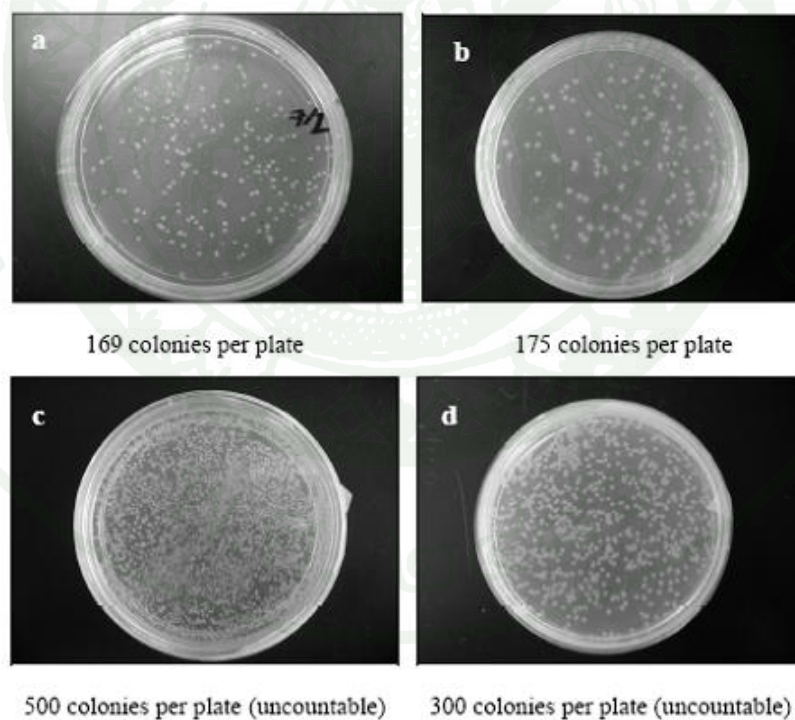
ที่มา: Ying *et al.* (2009)

ในการทดลองนี้ เลือกใช้ Sound treatment ความถี่สูงต่ำที่แตกต่างกัน 3 ระดับ (1 kHz, 5 kHz และ 15 kHz) การวัดการเจริญเติบโตของ *E. Coli* ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยการนับจำนวนเซลล์โดยวิธี Indirect viable cell count (*E. coli* on NA) และ Direct viable cell count (*E. coli* on NB) หลังจากทำการเพาะด้วย Sound ใน acoustic chamber แล้ว พบว่าการเจริญเติบโตของ *E. coli* ที่ความถี่เสียง 5 kHz ที่เลือกใช้นั้นมีผลต่อการเพิ่มจำนวนของเซลล์ *E. Coli* ทั้งในอาหาร NB และ NA อย่างมีนัยสำคัญ (ดังภาพที่ 13 และ 14)



ภาพที่ 13 จำนวนเซลล์มีชีวิต *E. coli* cell ($\times 10^8$ cells per ml) ด้วยเสียงบำบัดที่แตกต่างกัน

ที่มา: Ying *et al.* (2009)



ภาพที่ 14 จำนวนของโคโลนีต่อจานเพาะเชื้อด้วยเสียงบำบัดที่แตกต่างกัน

(a) Control, (b) 1 kHz, (c) 5 kHz และ (d) 15 kHz

ที่มา: Ying *et al.* (2009)

สรุปผลการทดลองผลกระทบของ Audible sound ต่อการเจริญเติบโตของ *E. coli* ที่ทำการบ่มเชื้อด้วยอาหาร NA และ NB พบว่าความถี่เสียงที่เลือกนำมาใช้ในการทดลองได้แก่ 1 kHz, 5 kHz และ 15 kHz มีผลทำให้จำนวนของเซลล์มีชีวิตของแบคทีเรียนั้นมีจำนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการเจริญเติบโตของจำนวนเซลล์แบคทีเรียนั้นมีการตอบสนองในรูปแบบที่แน่นอนเมื่อได้รับ sound treatment อย่างไรก็ตามระดับของการตอบสนองของจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะแตกต่างกันเมื่อได้รับความถี่เสียงที่ต่างกัน ซึ่งเป็นความเห็นที่สอดคล้องกับรายงานของนักวิจัยท่านอื่นๆ ในการทดลองนี้พบว่า การเจริญของ *E. coli* บนอาหาร NA และในอาหาร NB ตอบสนองต่อความถี่เสียงที่ 5 kHz เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่อื่นๆ และยังแสดงให้เห็นว่า *E. coli* มีการเลือกความถี่เสียงในการตอบสนองต่อความถี่เสียงนั้นๆ (Ying *et al.*, 2009)

2. The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured *Bacillus* species

แบคทีเรียบางสายพันธุ์สามารถสร้างโคโลนีและสปอร์ ซึ่งจับเป็นกลุ่มเป็นก้อนในลักษณะรูปร่างเป็นกลุ่มทรงกลม (เช่น *Bacillus subtilis*) และลักษณะของทรงกลมช่วยป้องกัน Organisms ยึดเกาะอยู่ภายใน กลุ่มก้อน (Floc) ของอนุภาคขนาดเล็ก ยกตัวอย่างเช่น ดินเหนียวสามารถยึดแบคทีเรียให้ติดอยู่กับที่โดยสามารถป้องกันต่อต้าน biocides ได้ ซึ่งเป็นปัญหาอยู่เช่น วิธีการเลือกการฆ่าเชื้อโรคในน้ำภายใต้การทดลองนี้ อีกวิธีการหนึ่งคือ การใช้ power ultrasound อย่างเดียวหรือรวมกันกับวิธีการอื่น

Ultrasound นี้สามารถหยุดยั้งการทำงานของแบคทีเรีย และทำให้แบคทีเรียไม่จับกันเป็นกลุ่มก้อน หรือ Floc ตลอดจนจำนวนทาง physical, mechanical และ chemical ที่เป็นผลมาจาก acoustic cavitation จุดประสงค์ของการทดลองครั้งนี้ ศึกษาถึงผลกระทบของ power ultrasound ที่กำลังแตกต่างกันและความถี่ต่อ *Bacillus subtilis* เทคนิคการนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เพาะบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ (Viable plate count) ถูกนำมาใช้ในการวัดกิจกรรมของจุลินทรีย์ ผลการทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในรูปของ percent kill (% การตาย) ของ *Bacillus* species ด้วยการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการปล่อยคลื่น ultrasound และความเข้มของ ultrasound ด้วย low-kilohertz range (20 และ 38 kHz) ผลที่ได้ที่ความถี่สูงทั้ง 2 ระดับ (512 และ 850 kHz) แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียที่นับได้ไม่เป็นกลุ่มก้อนนั้นมีนัยสำคัญเพิ่มขึ้น ในการประเมินค่าการตายของแบคทีเรียกับเวลาภายใต้ความแตกต่างของหลักการสั่นสะเทือน 3 ลักษณะดังนี้

1. High power ultrasound (lower frequencies) ต่อสารละลายแบคทีเรียในปริมาณบรรจุขนาดเล็ก มีผลทำให้จำนวนเซลล์แบคทีเรียลดลงอย่างต่อเนื่อง

2. High power ultrasound (lower frequencies) ต่อสารละลายแบคทีเรียในปริมาณบรรจุขนาดใหญ่ ผลในตอนเริ่มปล่อยความถี่ต่อจำนวนเซลล์แบคทีเรียทำให้ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน แต่เมื่อเริ่มปล่อยความถี่ทำให้เซลล์แบคทีเรียไม่เกิดการเป็นกลุ่มก้อน สุดท้ายมีอัตราการตายเป็นสำคัญ

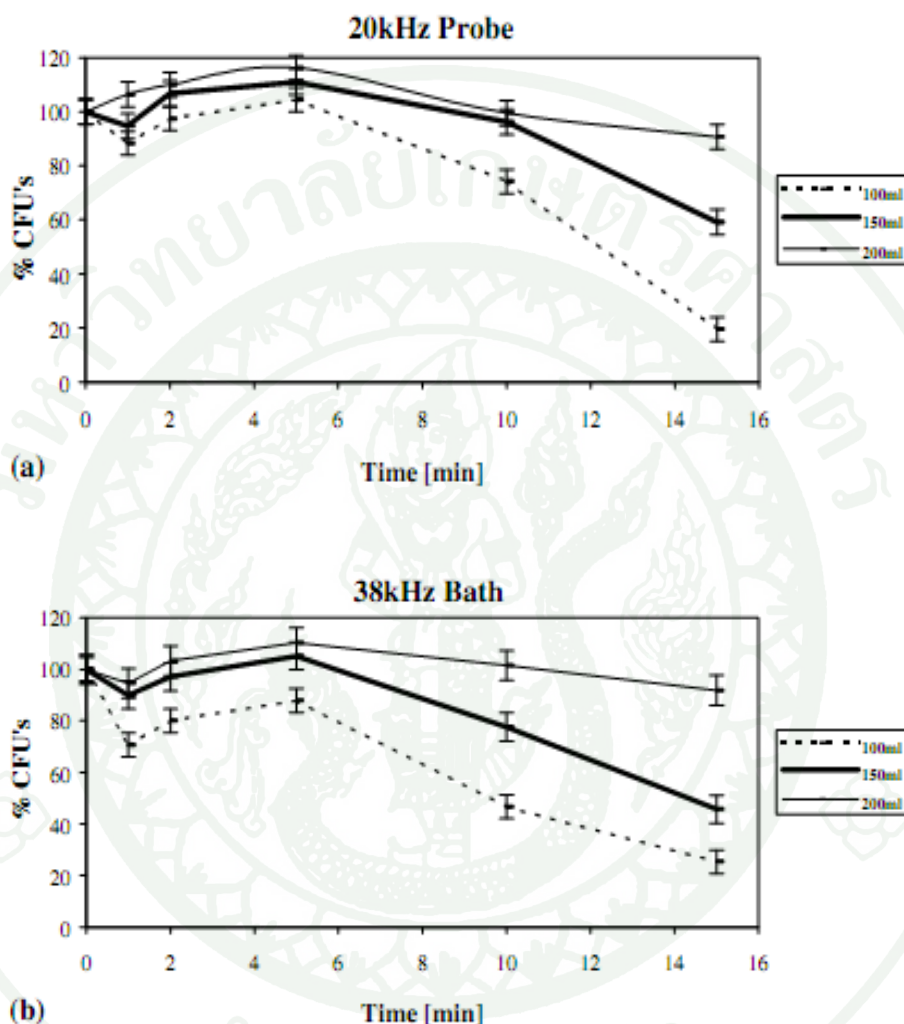
3. Low intensity ultrasound (higher frequencies) เมื่อปล่อยในตอนเริ่มต้นทำให้จำนวนเซลล์มีผลทำให้ไม่เกิดเป็นกลุ่มก้อน อัตราการตายของจำนวนเซลล์แบคทีเรียต่ำลงและไม่มีนัยสำคัญเพิ่มขึ้นตามลำดับ

การวิจัยนี้ศึกษาถึงการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยใช้คลื่นสะท้อนเพียงอย่างเดียว โดยอาศัยหลักการวัดกระแทกการเปรียบเทียบความถี่ กำลัง และระยะเวลาการปล่อยคลื่นสะท้อนต่อการกำจัดแบคทีเรีย จากการวิจัยสรุปผลการทดลองคือ คลื่นสะท้อนมีผลกระทบ 2 อย่างต่อสารละลาย *Bacillus subtilis* อันดับแรก คือ การไม่รวมกลุ่มของแบคทีเรียซึ่งการเป็นกลุ่มก้อนของแบคทีเรียแตกแยกภายในสารละลายแบคทีเรียเซลล์เดียว และอย่างที่สองการฆ่าแบคทีเรีย ซึ่งเป็นผลให้มีชีวิตรอดของแบคทีเรียต่ำมากในสารละลาย ส่วนการประยุกต์ใช้ Ultrasound เป็นผลของการแข่งขันระหว่างการฆ่าและการไม่รวมกลุ่มกันของแบคทีเรียในสารละลาย ผลสุทธิที่ได้ของการแข่งขันสามารถแยกผลให้ปรากฏให้เห็นได้ 3 ลักษณะรูปร่างของการอยู่รอดของแบคทีเรียต่อเวลา

Type 1: ผลการใช้ High power ultrasound ต่อสารละลายแบคทีเรียในปริมาณบรรจุขนาดเล็ก ทำให้จำนวนเซลล์แบคทีเรียลดลงอย่างต่อเนื่อง เช่น อัตราการฆ่าเพิ่มมากขึ้น (ดังภาพที่ 15a ผลที่ 20 kHz ใช้ 100 cm^3 suspensions)

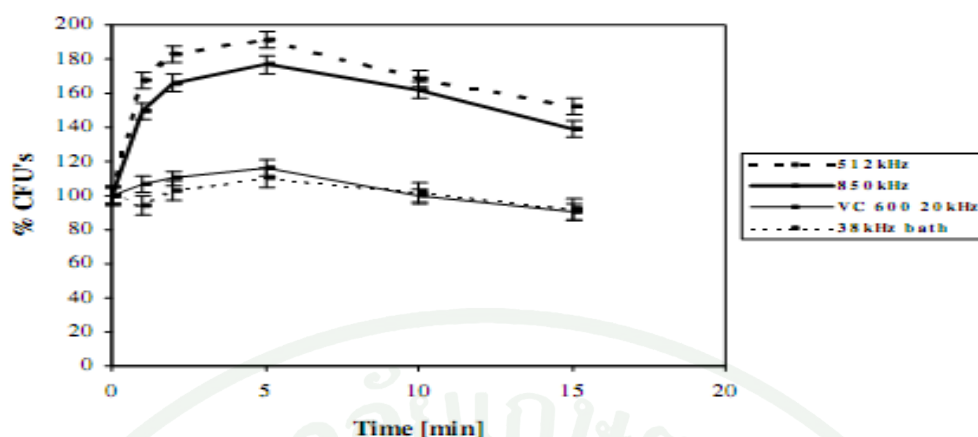
Type 2: ผลการใช้ High power ultrasound ต่อสารละลายแบคทีเรียในปริมาณบรรจุขนาดใหญ่ มีผลต่อจำนวนเซลล์แบคทีเรียทำให้ไม่เกิดการรวมกลุ่มตั้งแต่ต้นแต่การปล่อยคลื่น แต่เมื่อเริ่มปล่อยคลื่นส่งผลให้ไม่เกิดการรวมกลุ่มกันและล้มเหลวอย่างที่สุด และอัตราการตายกลายมาเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นที่สุด (ดังภาพที่ 15b ผลที่ 20 kHz ใช้ 150 cm^3 suspensions)

Type 3: ผลการใช้ low intensity ultrasound ตั้งแต่เริ่มต้นต่อจำนวนเซลล์ปรากฏว่าผลที่ได้คือ ไม่เกิดการรวมกลุ่มกัน ซึ่งอัตราการฆ่าต่ำ และการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์แบคทีเรียมีเพียงเล็กน้อยตามลำดับ (ดังภาพที่ 16 ผลที่ 512 และ 850 kHz)



ภาพที่ 15 ผลการนับด้วยวิธี Plate count ของผลกระทบชีวภาพต่อคลื่นเสียงสั่นสะเทือนด้วยความถี่ต่ำที่บรรจุในปริมาณที่แตกต่างกัน

ที่มา: Joyce *et al.* (2003)



ภาพที่ 16 ผลการนับด้วยวิธี Plate count ของผลกระทบชีวภาพต่อคลื่นเสียงสั่นสะเทือนด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน

ที่มา: Joyce *et al.* (2003)

การใช้ High frequency low power ultrasound (512 and 850 kHz) เพียงอย่างเดียวไม่มีผลเป็นพิเศษต่อการฆ่าเชื้อโรค แต่เป็นผลให้แบคทีเรียไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ส่วนการใช้ Low frequency power ultrasound (20 and 38 kHz) ที่ higher powers นั้นก็มีผลต่อการไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แต่อัตราการตายก็สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (Joyce *et al.*, 2003)

3. Using acoustic cavitation to improve the bio-activity of activate sludge

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียตะกอนเร่ง (Activated Sludge; AS) โดยใช้คลื่นเสียง Acoustic หรือคลื่นเสียง Ultrasound ซึ่งเป็นคลื่นเสียงความถี่ในช่วงมากกว่า 20,000 Hz โดยทำการวิจัยในระบบ Sequence Batch Reactor (SBR) น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ นำหัวเชื้อหัวจุลินทรีย์เริ่มต้นมาจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน มีวงจรการทำงานทั้งหมด 6 ชั่วโมงต่อ 1 วงจร แบ่งเป็นช่วงการเติมอากาศ 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเติมอากาศ 40 ลิตรต่อชั่วโมง และปล่อยตกตะกอน 1 ชั่วโมง ติดตามผลการเปลี่ยนของระบบเมื่อได้รับคลื่นเสียง Ultrasonic โดยพิจารณาจากอัตราการใช้ออกซิเจน (Oxygen Utilization Rate; OUR) ค่า Chemical Oxygen Demand (COD) ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ (MLSS) และปริมาณไนโตรเจนที่บำบัด (Total Nitrogen Removal; TKN)

ผลการวิจัยพบว่าการใช้คลื่น Ultrasonic ที่เหมาะสม คือ 25 kHz สามารถช่วยเพิ่มค่า OUR ได้ 28% โดยใช้กำลังที่ระดับ 0.2 W/ ml เป็นเวลา 30 วินาที โดยคลื่น Ultrasonic จะช่วยเพิ่มฟองอากาศทำให้การกระจายของออกซิเจนในระบบดีขึ้น และค่า MLSS เพิ่มขึ้น 12.5% แต่หากเพิ่มกำลังของคลื่น Ultrasonic สูงมากกว่า 0.5 W/ ml หรือ 80 kHz–150 kHz จะทำให้ค่า OUR ลดลง สำหรับประสิทธิภาพการบำบัด COD เพิ่มขึ้น 5-6% เมื่อระบบมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.3 mgCOD/ mg MLSS-d และเพิ่มขึ้น 12% เมื่อระบบมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3.25 mgCOD/ mg MLSS-d ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนออกจากรู้น้ำเสียเพิ่มขึ้น 5.6% (Zhang *et al.*, 2007)

4. Effect of Sound wave on the metabolism of Chrysanthemum roots

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมสามารถส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของเสียงกระตุ้นต่อเมตาบอลิซึมของรากดอกเบญจมาศ และจากการศึกษาพบว่าเสียงมีผลต่อการเติบโตของรากซึ่งไม่เป็นไปในทางยับยั้ง แต่กลับเร่งก่อให้เกิด ภายใต้สภาวะการกระตุ้นด้วยเสียง และส่วนประกอบของสารละลายน้ำตาล โปรตีน และปฏิกิริยาของอะไมเลส มีผลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วยเสียงสามารถทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึมของรากดอกเบญจมาศเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น

การศึกษครั้งนี้พบว่าผลกระทบของคลื่นเสียงต่อกระบวนการทางกายภาพ และชีวภาพที่ติดต่อกับการทดสอบทางเมตาบอลิซึม รากจัดได้ว่าเป็นส่วนสำคัญของพืชและรากสามารถดูดซึมน้ำ สารอาหาร และสังเคราะห์กรดอะมิโนและฮอร์โมน การแบ่งเซลล์และการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อพืชเมื่อหยุดความสัมพันธ์กับน้ำตาลและสารละลายโปรตีนจะส่งผลกระทบต่อระดับการสร้างเนื้อเยื่อและปฏิกิริยาของอะไมเลสซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาการย่อยสลายไปด้วย

จากการทำการศึกษาถึงผลกระทบของการกระตุ้นด้วยเสียงต่อเมตาบอลิซึมของรากดอกเบญจมาศ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบของสารละลายน้ำตาล โปรตีน และปฏิกิริยาอะไมเลส มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากได้รับเสียงกระตุ้นด้วยความถี่เสียง 1 kHz ที่ความดังเสียง 100 dB น้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงและเป็นแหล่งพลังงานส่วนใหญ่ของกระบวนการทางกายภาพ แต่ส่วนประกอบของสารละลายโปรตีนจะหยุดการเจริญเติบโต การแบ่งเซลล์พืช และระดับการรวมตัวกันของโปรตีน สะท้อนว่าไม่เพียงแต่สถานะของสารตั้งต้นที่จำเป็นต่อการแบ่งเซลล์ แต่เช่นไรก็ตามส่วนประกอบของเอ็นไซม์และ

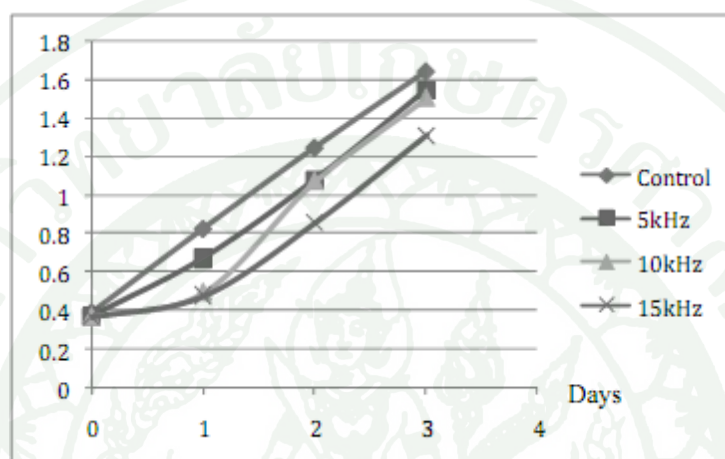
ระดับความสัมพันธ์ของเมตาบลิซึม การเพิ่มขึ้นของสารละลายน้ำตาลและโปรตีน ซึ่งให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วยเสียงนั้นก่อให้เกิดกระบวนการสร้างของดอกเบญจมาศ ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาอะไมเลสแสดงให้เห็นว่าเป็นข้อดีของการสลายของน้ำตาล เช่นเดียวกันปฏิกิริยาการย่อยสลายก็มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นหลังจากได้รับเสียงกระตุ้น (Yi *et al.*, 2003)

5. Experimental Investigation on the Effects of Audible Sound to the Growth of *Aspergillus* Spp.

งานวิจัยนี้อธิบายถึงผลกระทบของเสียงต่อการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus* spp. ทำการเพาะเลี้ยง *Aspergillus* บนอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) และ Potato Dextrose Broth (PDB) และปล่อยคลื่นเสียงเป็นเวลา 5 hr/ day เป็นเวลา 3 วัน การทดลองนี้ถูกทำการสังเกตเป็นเวลา 3 วัน และทำการเก็บข้อมูลทุกๆ วันหลังจากที่ปล่อยคลื่นเสียงแล้ว ทำการวัดพารามิเตอร์ 4 อย่าง คือ จำนวนโคโลนี unit per ml, ค่าความขุ่น (optical density), ความยาวของ germ tube และ ขนาดของโคโลนี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคลื่นเสียงมีผลต่อการเจริญเติบโตของ *Aspergillus* เมื่อ *Aspergillus* ได้รับคลื่นเสียงที่มีความถี่ 5 kHz, 10 kHz และ 15 kHz การเจริญมีการตอบสนองต่อความถี่ที่แตกต่างกัน ที่ความถี่สูงสุดมีผลต่อการยับยั้งการเจริญของ *Aspergillus* ซึ่งทั้ง 3 ความถี่ยับยั้งการเจริญของ *Aspergillus* เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ได้เปิดเสียง) และยับยั้งสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 15 kHz

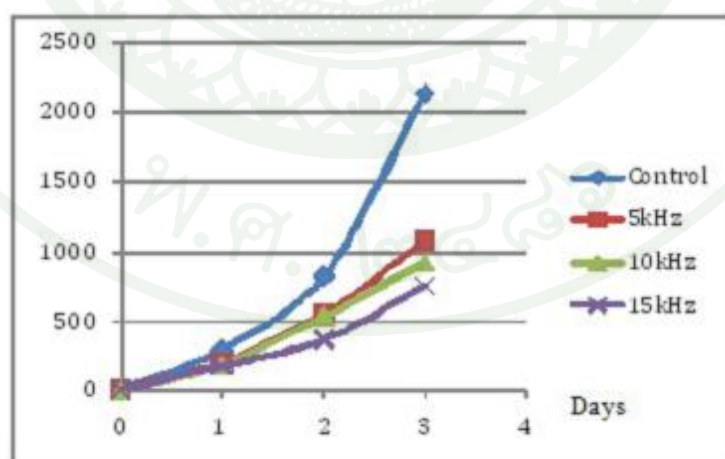
ในการวิจัยกล่าวว่า การกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงมีนัยสำคัญต่อผลิตผลของแคลลัสดอกเบญจมาศ ความสัมพันธ์ของการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงและการเจริญเติบโตของแคลลัสด้วยรูปแบบความเหมาะสมสามารถทำนายได้ (Jiping *et al.*, 2003) ในอีกทางหนึ่งการทดลองของ Bochu *et al.*, 2004 โดยการใช้คลื่นเสียงที่เหมาะสมกับแคลลัสของดอกเบญจมาศ (1.4 kHz หรือ 0.095 kdb) พบว่าแคลลัสดอกเบญจมาศมีนัยสำคัญสูงกว่า IAA แต่ต่ำกว่า ABA level เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับเสียง ผลกระทบของเสียงกระตุ้นต่อเมตาบอลิซึมของรากดอกเบญจมาศได้ทำการศึกษาเช่นเดียวกัน และยังพบว่าการเจริญเติบโตของรากไม่ถูกยับยั้งแต่เร่งให้เกิดภายใต้สภาวะเสียงกระตุ้นที่เหมาะสม (Yi *et al.*, 2003) ในการทดลองอื่นๆ ทำการศึกษาถึงดัชนีการแตกหน่อ ความสูงของลำต้น ความสัมพันธ์ของอัตราของน้ำหนักสด ความสามารถในการแตกราก ปฏิกิริยาของระบบราก และความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ในข้าวเปลือก พบว่าที่ความถี่เสียง 400 Hz, 100 dB คือ “Best frequency and intensity” ซึ่งเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการกระตุ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มคลื่นความถี่เสียงเป็น 4 kHz, 111 dB กลับส่งผลให้ที่เยื่อเมล็ดพันธุ์ ถึงอาจจะถือว่า

เป็นข้อดีอีกทางเลือกหนึ่งในการที่จะกระตุ้นหรือทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียหรือบางส่วนหรือส่วนประกอบของพืชข้าง จากสมมติฐานมีการประยุกต์ใช้ในบางจุดประสงค์ของความถี่ที่แน่นอนต่อการทดลองกับ *Aspergillus* ผลกระทบของการประเมินเปรียบเทียบกับ การทดลองด้วยการใช้วิธีการวัดความชื้น, Colony forming unit, การยืดยาวของ germ tube และการวัดขนาดของโคโลนี ซึ่งเทียบกับชุดควบคุมตามลำดับ ดังรูปที่ 17,18, 19, และ 20



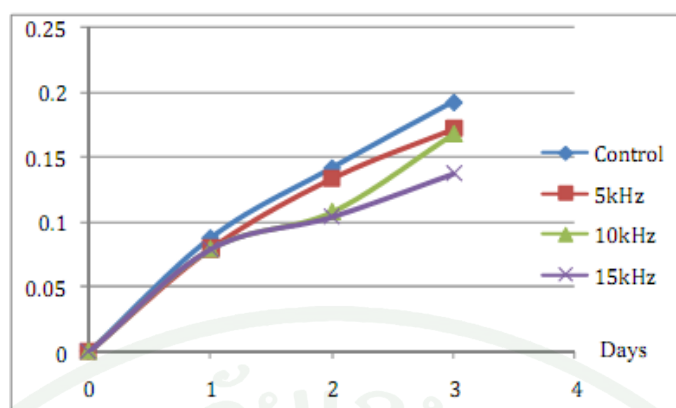
ภาพที่ 17 ผลของค่าการดูดกลืนแสงของ *Aspergillus* spp. ที่ความถี่เสียงแตกต่างกัน

ที่มา: Karippen *et al.* (2009)



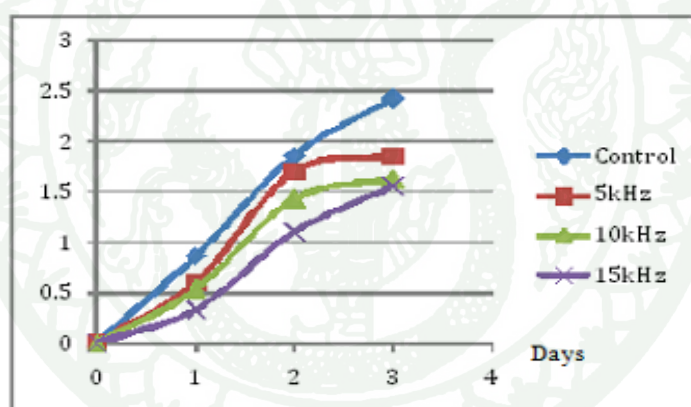
ภาพที่ 18 ผล colony forming units ของ *Aspergillus* spp. ที่ความถี่เสียงแตกต่างกัน

ที่มา: Karippen *et al.* (2009)



ภาพที่ 19 ผลความยาว germ tube elongation ของ *Aspergillus* spp. ที่ความถี่เสียงแตกต่างกัน ด้วย การวัดขนาดของโคโลนี (ชม.)

ที่มา: Karippen *et al.* (2009)



ภาพที่ 20 ผลค่าเฉลี่ยขนาดโคโลนีของ *Aspergillus* spp. ที่ความถี่เสียงแตกต่างกัน

ที่มา: Karippen *et al.* (2009)

จากการศึกษาครั้งนี้ เสนอว่าคลื่นเสียงมีผลกระทบต่อการเจริญของ *Aspergillus* spp. การใช้ความถี่สูง (5, 10 และ 15 kHz) สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตได้ พบว่าที่ 15 kHz สามารถยับยั้งได้สูงสุด ซึ่งให้เห็นว่า การวิจัยในอนาคตอาจจะพิจารณาใช้ความถี่สูงในการพิสูจน์หาความจริงในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ในระยะเวลาที่สั้นๆ จากผลการทดลองอาจจะเป็นผลดีกับอุตสาหกรรมอาหาร เพราะจะทำให้การหมดอายุของอาหารเกิดขึ้นได้ช้าลง การวิจัยในอนาคตควรพิจารณาปัจจัยภายในของโรงงานที่มีส่วนในการที่จะยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราด้วย (Karippen *et al.*, 2009)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. แบคทีเรียและอุปกรณ์สร้างระบบทดลอง

1.1 แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* TISTR 126 และแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* TISTR 358 จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ดังภาพที่ 21



(ก)



(ข)

ภาพที่ 21 ลักษณะบรรจุภัณฑ์แบคทีเรียสายพันธุ์บริสุทธิ์

(ก) ลักษณะบรรจุภัณฑ์ภายนอก

(ข) ลักษณะแบคทีเรียบรรจุภายในหลอดสูญญากาศ

1.2 กล่องเก็บเสียง ซึ่งบุด้วยฟองน้ำหนา 3 ชนิด คือ ฟองน้ำสะท้อนเสียง, ฟองน้ำซับเสียง และผ้าห่มซับเสียง ดังภาพที่ 22 และ 23



(ก)

(ข)

ภาพที่ 22 ด้านในของกล่องทดลอง

(ก) ด้านในฝากล่องติดตั้งลำโพงเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดเสียง

(ข) ภายในกล่องที่บุด้วยผ้าห่มซับเสียง ความร้อน และด้านในบุฟองน้ำซับเสียง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 ด้านนอกของกล่องทดลอง

(ก) ด้านนอกของฝากล่องใช้วัสดุชนิดโพลียูรีเทน

(ข) ด้านนอกของตัวกล่องทดลองใช้วัสดุชนิดโพลียูรีเทนบุเพื่อสะท้อนเสียง

1.3 เครื่องขยำ (Shaker) ยี่ห้อ New braunswich scientific

1.4 ชุดเครื่องกำเนิดความถี่เสียง ดังรูป



ภาพที่ 24 ชุดเครื่องกำเนิดความถี่เสียง ประกอบด้วยเครื่องเล่น DVD และเครื่องขยายเสียง

2. อุปกรณ์วิเคราะห์ความถี่เสียงในการทดลอง

2.1 โปรแกรมสร้างความถี่เสียง NCH Swift Sound

2.2 โปรแกรมวิเคราะห์ความถี่เสียง Adobe Audition 1.5

2.3 เครื่องวัดระดับความดังเสียง (Sound Level meter) ยี่ห้อ Rion รุ่น NA-28



ภาพที่ 25 เครื่องวัดเสียง (Sound Level Meter) ที่ใช้ในการทดลอง

3. อุปกรณ์วิเคราะห์น้ำหนักแห้งของจุลชีพ (Dry weight)

3.1 ชุดกรอง Millipore Filter

3.2 กระดาษกรองชนิด Cellulose Acetate Filter ยี่ห้อ Sartorius ขนาดรูกรอง 0.45 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

3.3 Vacuum Pump

3.4 เตาอบที่ให้อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ Binder รุ่น E053/E2

3.5 ตู้ดูดความชื้น (Desiccators)

3.6 เครื่องชั่งชนิดละเอียดตศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Denver รุ่น TB-224

3.7 เครื่องชั่งชนิดละเอียดตศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Chyo รุ่น MP-3000

4. อุปกรณ์เลี้ยงจุลชีพและการเตรียมหัวเชื้อ

4.1 จานเลี้ยงเชื้อ

4.2 Loop เขี่ยเชื้อ

4.3 Spreader

4.4 ตู้บ่มเชื้อยี่ห้อ New brunswick รุ่น Innova™ 4230

4.5 หม้อนึ่งความดันที่ให้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ที่ให้ความดันที่ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ยี่ห้อ Tommy รุ่น SX-500

4.6 ตู้แช่เย็น ที่ให้อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

5. อุปกรณ์เครื่องแก้ว

5.1 ขวดชมพู่

5.2 บีกเกอร์

5.3 กระบอกตวง

5.4 ขวดปรับปริมาตร

5.5 ขวดฝาเกลียว

5.6 หลอดเลี้ยงเชื้อ

5.7 ปีเปต

6. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของระบบทดลอง

6.1 Thermometer

7. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density, OD)

7.1 Spectrophotometer meter ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-2800

7.2 Glass cuvette

7.3 กระบอกน้ำกลั่น

8. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ค่า COD

8.1 หลอด COD

8.2 เตาอบที่ให้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ Binder

9. การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon, TOC)

9.1 ชุดกรอง Millipore Filter

9.2 เครื่องวิเคราะห์ TOC-VCSH ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น H511045



ภาพที่ 26 เครื่องมือวิเคราะห์ TOC

สารเคมี

1. สารเคมีอาหารเลี้ยงจุลชีพ

1.1 ชนิดเหลว (Nutrient broth) ยี่ห้อ Hi-media

1.2 ชนิดแข็ง (Nutrient agar) ยี่ห้อ Criterion

ตารางที่ 8 องค์ประกอบของอาหารเลี้ยงจุลชีพ

ชนิดอาหาร	องค์ประกอบ	จำนวน (g/L)
Nutrient Agar	Agar	15
	Casein Peptone	5
	Yeast Extract	2.5
	Glucose	1.0
Nutrient Broth	Peptic digest of animal tissue	5.00
	Sodium chloride	5.00
	Beef extract	1.50
	Yeast extract	1.50

2. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ COD

2.1 $K_2Cr_2O_7$

2.2 Ag_2SO_4

2.3 Conc. H_2SO_4

2.4 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$

2.5 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

2.6 $HgSO_4$

2.7 $C_{12}H_{18}N_2 \cdot H_2O$

วิธีการ

1. วิธีการวิเคราะห์และทดสอบตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st edition ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 วิธีการวิเคราะห์และทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ

Method	Standard
Laboratory Apparatus	9030 B: Equipment Specifications
Washing and Sterilization	9040
Preparation of Culture Media	9050 A: General Procedures 9050 B: Water
Samples	9060 B: Preservation and storage
Heterotrophic Plate Count	9215 A: Introduction 9215 C: Spread Plate method
TOC	TOC – V 5000 A analyzer (Sample were filtered by Cellulose acetate membrane)
COD	5220 C: Closed reflux method
Dry Weight	2540 D: Suspended Solid (Sample were filtered by Cellulose acetate membrane)

2. การเตรียมหัวเชื้อแบคทีเรีย

นำแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* TISTR 126 และแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* TISTR 358 บรรจุในหลอด ampoule ภายในสุญญากาศจากสถาบันวิทยาศาสตร์ ทำการเปิดหลอดด้วยความระมัดระวังเพราะเชื้อในลักษณะแห้งนั้นเบามากอาจกระเด็นออกมาได้ ทำให้หลอดแตกเบาๆ และปล่อยให้อากาศเข้าไปอย่างช้าๆ โดยใช้ตะไบทำให้หลอดแตกเป็นรอยบริเวณตรงกลางของจุกสำลีที่อยู่ในหลอด และใช้แท่งแก้วลนไฟให้ร้อนแดงจี้ให้แตก จุกสำลียังอยู่ข้างในทำให้อากาศเข้าไปทีละน้อย หลังจากประมาณ 1 นาที ความดันของอากาศภายในและภายนอกจะเท่ากัน นำส่วนบนของหลอดออกไป โดยที่จุกสำลียังติดอยู่กับหลอด

อีกส่วนหนึ่ง นำจุลสารีออกและสวมจุลสารีใหม่ที่ปราศจากเชื้อแทนหลอดส่วนที่ถูกตัดและสารีเก่า จะมีเชื้อปะปนอยู่ จึงควรนำไปฆ่าเชื้อเสียก่อน ใช้พาสเจอร์ไปเปิดดูอาหารเหลวใส่ลงไปในเชื้อที่ทำแห้งภายในหลอด และผสมเบาๆ จะเห็นว่าเชื้อละลายเกือบทันที ระหว่างผสมไม่ควรทำให้กระเด็นและเกิดฟองอากาศ (สมบุรณ์, 2553) จากนั้นถ่ายเชื้อที่ละลายลงในสารอาหาร Nutrient Broth (NB) นำไปบ่มในตู้เลี้ยงเชื้อภายใต้อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง จากนั้นนำ Bacteria suspension ที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงที่เหมาะสม แล้วเก็บรักษาในตู้แช่เย็น 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อเริ่มต้นในการทดลองต่อไป

3. การทำกราฟมาตรฐาน

กราฟมาตรฐาน 4 กราฟ ได้แก่ กราฟมาตรฐานค่า OD กับน้ำหนักแห้งของจุลชีพ, กราฟมาตรฐานค่า OD กับค่า COD, กราฟมาตรฐานค่า OD กับ TOC และกราฟมาตรฐานค่า TOC กับค่า COD

1.1 ใช้ระบบการเลี้ยงเชื้อแบบแบตช์ (Batch) ในหลอดทดลองแก้ว ทำการเตรียมหัวเชื้อโดยถ่ายเชื้อจากหัวเชื้อเริ่มต้น ลงใน Nutrient Broth ใหม่ ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12-18 ชั่วโมง ในสภาวะควบคุมที่ไม่มีการเปิดเสียง จากนั้นนำไปวัดค่า OD ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร และทำการเจือจางให้ได้ค่า OD เท่ากับ 1

1.2 ทำการผสมหัวเชื้อที่ได้จากข้อ 3.1 กับ Nutrient Broth ที่เจือจางลง 20 เท่า ใส่หัวเชื้อ 2% ของปริมาตรโดยรวม แบ่งใส่หลอดทดลองแก้ว

1.3 นำไปบ่มในกล่องเก็บเสียง ที่วางบนเครื่องเขย่า ที่มีระดับความแรงในการเขย่า 200 รอบต่อนาที (rpm) ทำการบ่มเชื้อที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างเชื้อทุกๆ 2 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง

1.4 นำตัวอย่างเชื้อที่เก็บนั้นมาวิเคราะห์ค่า OD ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้ง, ค่า COD และค่า TOC แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากวิเคราะห์ พล็อตเป็นกราฟมาตรฐานต่างๆ

4. การหาระยะเวลาในการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย (Bacterial Growth)

4.1 ใช้ระบบการเลี้ยงเชื้อแบบเบตช์ (Batch) ในหลอดทดลองแก้ว ทำการเตรียมหัวเชื้อ โดยถ่ายเชื้อจากหัวเชื้อเริ่มต้น ลงใน Nutrient Broth ใหม่ ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12-18 ชั่วโมง ในสภาวะควบคุมที่ไม่มีการเปิดเสียง จากนั้นนำไปวัดค่า OD ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร และทำการเจือจางให้ได้ค่า OD เท่ากับ 1

4.2 ทำการผสมหัวเชื้อที่ได้จากข้อ 4.1 กับ Nutrient Broth ที่เจือจางลง 20 เท่า ใส่หัวเชื้อ 2% ของปริมาตรโดยรวม แบ่งใส่หลอดทดลองแก้ว

4.3 นำไปบ่มในกล่องเก็บเสียง ที่วางบนเครื่องเขย่า ที่มีระดับความเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที (rpm) ทำการบ่มเชื้อที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างเชื้อทุกๆ 1/2 ชั่วโมง และ 1 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง

4.4 นำตัวอย่างเชื้อที่เก็บนั้นมาวิเคราะห์ค่า OD ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร แล้วนำค่าที่ได้พล็อตเป็นลงกราฟ

5. ระบบการทดลอง

ในการทดลองได้แบ่งออกเป็นชุดแบคทีเรียแกรมบวกและชุดแบคทีเรียแกรมลบอย่างละ 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุม 25 กลุ่ม และกลุ่มทดลอง 50 กลุ่ม โดยกลุ่มควบคุม จะทำการเลี้ยงจุลชีพ กลุ่มแบคทีเรียใช้อากาศในสภาวะไม่มีความถี่เสียงรบกวน และกลุ่มทดลองในสภาวะที่เปิดความถี่เสียงรบกวนอย่างต่อเนื่อง และเป็นจังหวะตามจุดประสงค์ของการทดลอง โดยติดตั้งลำโพงเสียงไว้ภายในกล่องเก็บเสียง กำหนดระดับความดังเสียง 3 ระดับ คือ 60, 80 และ 100 dB(C) ในรูปสัญญาณเสียงแบบดิจิตอล Sample rate 44.1 kHz Bit depth 16 bit ระบบเสียง Stereo

5.1 ใช้การเลี้ยงเชื้อแบบเบตช์ (Batch) ในหลอดแก้วทดลอง เตรียมหัวเชื้อดังข้อ 3.1 และ 3.2 นำไปบ่มในกล่องเก็บเสียงวางบนเครื่องเขย่า ที่ความเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที (rpm)

5.2 ทำการบ่มเชื้อจนเข้าสู่สภาวะ Steady stage จากนั้นนำมาวัดค่า OD ที่ 600 นาโนเมตร จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากกราฟมาตรฐาน

5.3 นำมาวิเคราะห์และแปลผลการทดลอง เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของกลุ่มควบคุมเทียบกับกลุ่มทดลอง เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม และระหว่างชุดการทดลอง ด้วยโปรแกรมทางสถิติ SPSS 11.5

5.4 ค่าจลนศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และแปลผลการทดลอง ได้แก่

5.4.1 ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield)

$$\text{Growth Yield (mg cells/mg TOC removed)} = \frac{X_t - X_0}{S_{0(\text{TOC})} - S_{t(\text{TOC})}}$$

$$\text{Growth Yield (mg cells/mg COD removed)} = \frac{X_t - X_0}{S_{0(\text{COD})} - S_{t(\text{COD})}}$$

X_0 = ปริมาณน้ำหนักแห้งของจุลชีพ ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ 0 ชั่วโมง (mg/L)

X_t = ปริมาณน้ำหนักแห้งของจุลชีพ ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ระยะ Steady stage ชั่วโมง (mg/L)

S_0 = ปริมาณสารอาหาร ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ 0 ชั่วโมง (mg/L)

S_t = ปริมาณสารอาหาร ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ระยะ Steady stage, ชั่วโมง (mg/L)

5.4.2 อัตราการโตจำเพาะ (Specific growth rate)

$$\text{อัตราการโตจำเพาะ (hr}^{-1}\text{)} = \frac{\frac{X_t - X_0}{t}}{X}$$

X_0 = ปริมาณน้ำหนักแห้งของจุลชีพ ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ 0 ชั่วโมง (mg/L)

X_t = ปริมาณน้ำหนักแห้งของจุลชีพ ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ระยะ Steady stage ชั่วโมง (mg/L)

X = ปริมาณน้ำหนักแห้งเฉลี่ย (mg/L) เท่ากับ $\frac{X_0 + X_t}{2}$

t = เวลาการบ่มเชื้อที่ระยะ Steady stage, ชั่วโมง

5.4.3 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific substrate utilization)

$$\text{อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (mg TOC removed/mg cells-hr)} = \frac{S_{0(\text{TOC})} - S_{t(\text{TOC})}}{\frac{t}{X}}$$

$$\text{อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (mg COD removed/mg cells-hr)} = \frac{S_{0(\text{COD})} - S_{t(\text{COD})}}{\frac{t}{X}}$$

S_0 = ปริมาณสารอาหาร ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ 0 ชั่วโมง (mg/L)

S_t = ปริมาณสารอาหาร ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ระยะ Steady stage ชั่วโมง (mg/L)

X = ปริมาณน้ำหนักรวมเฉลี่ย (mg/L) เท่ากับ $\frac{X_0 + X_t}{2}$

t = เวลาการบ่มเชื้อที่ระยะ Steady stage, ชั่วโมง

5.4.4 การคำนวณค่าความแตกต่างของค่าจลนศาสตร์ต่างๆ ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

$$\text{ค่าความแตกต่าง (\%)} = \frac{\text{กลุ่มทดลอง} - \text{กลุ่มควบคุม}}{\text{กลุ่มควบคุม}} \times 100$$

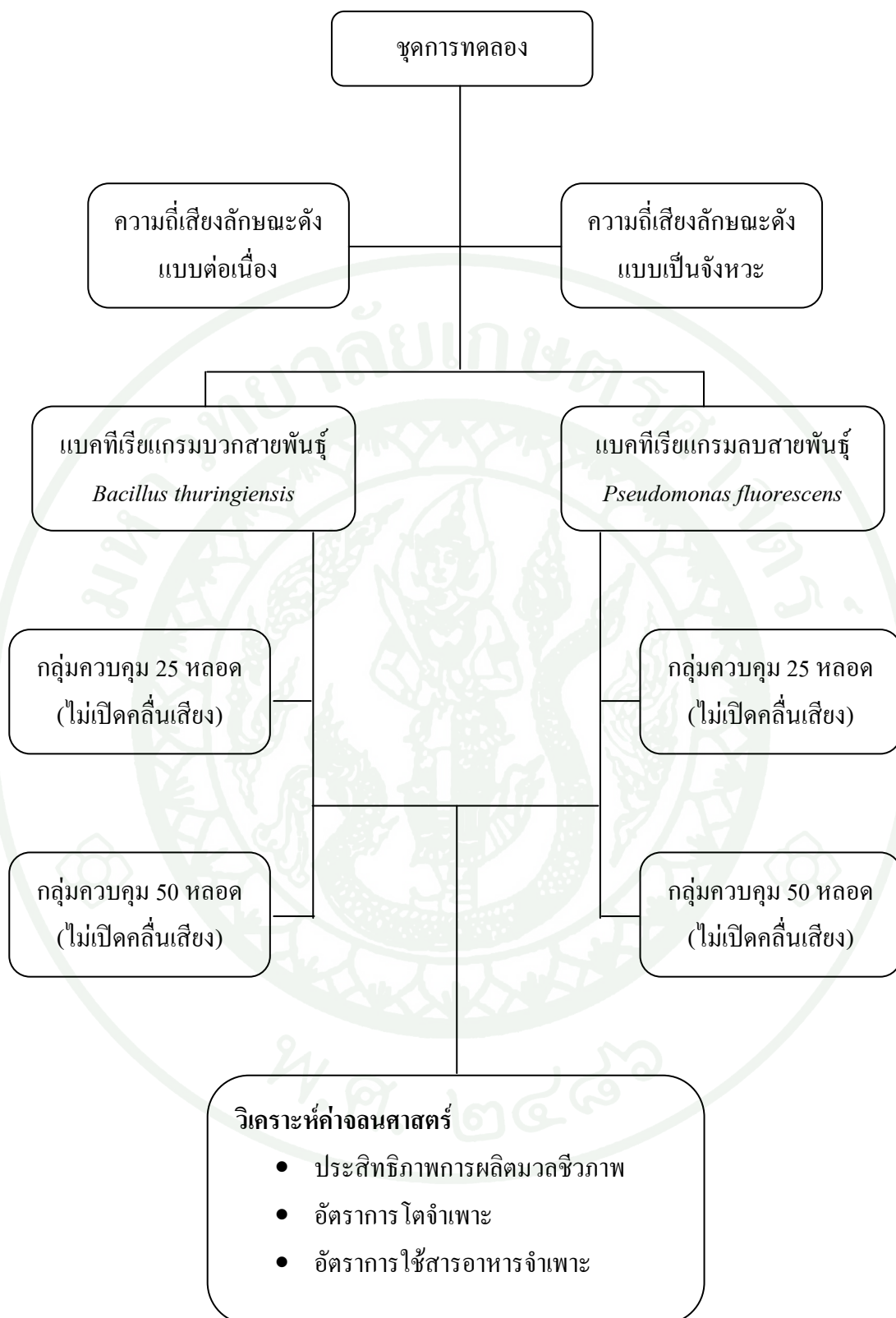
6. อุปกรณ์การวิเคราะห์ความถี่เสียงที่นำมาใช้ทดลอง

6.1 การวิเคราะห์ระดับความถี่เสียง และความดังเสียง โดยใช้เครื่องวัดระดับเสียง Sound Level Meter แบบแยกความถี่ (1/3 Octave band)

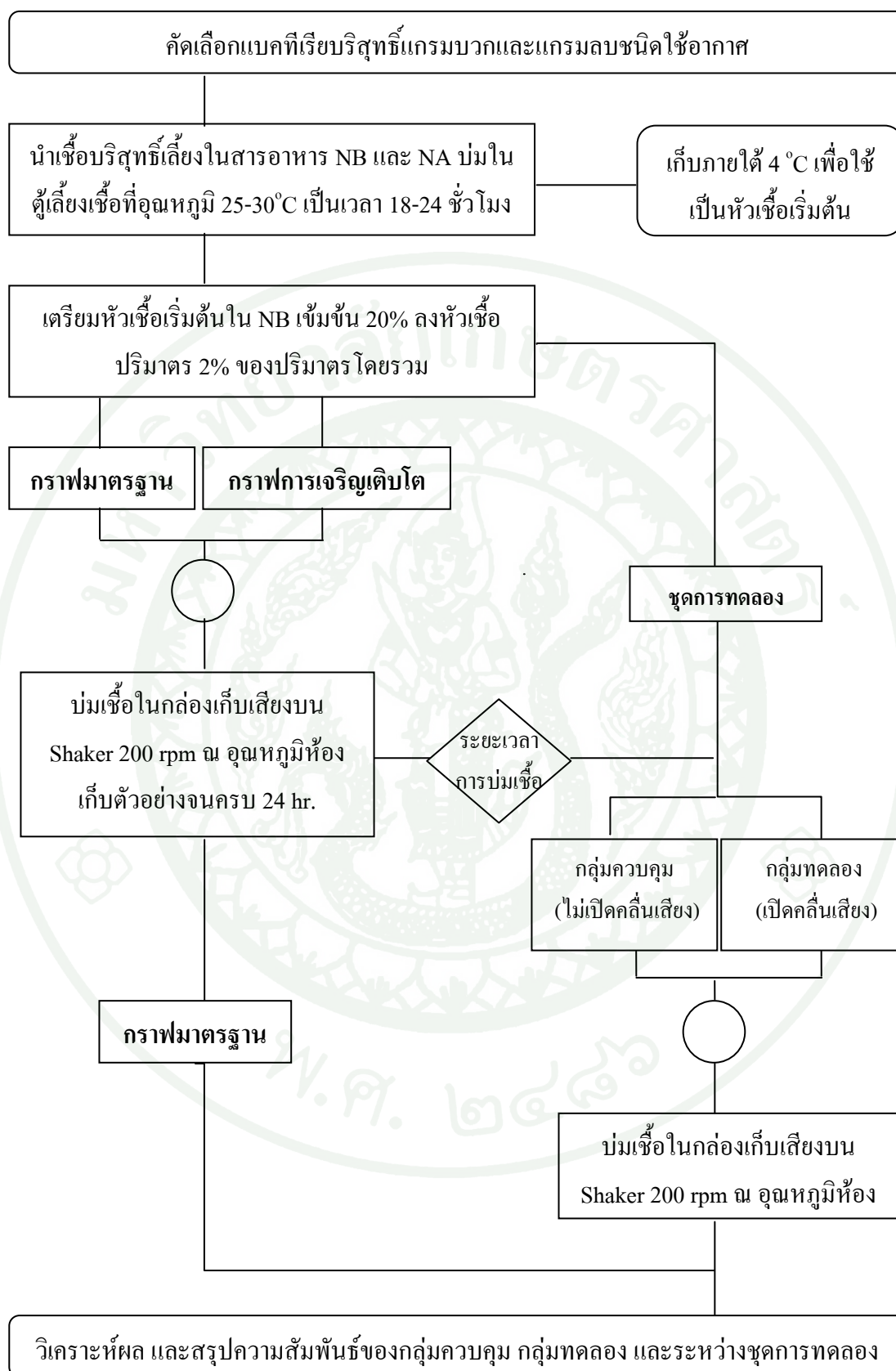
6.2 การวิเคราะห์รูปแบบของคลื่นเสียง โดยใช้โปรแกรม Audacity 1.5

7. ศึกษาความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับความถี่เสียงและกลุ่มทดลองที่ได้รับความถี่เสียง

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3 และ 5 แปลผลและวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS 11.5



ภาพที่ 27 ชุดการทดลอง



ภาพที่ 28 วิธีการทดลองโดยรวม

สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 1 อาคาร 11 ชั้น 1 และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 2 อาคาร 8 ชั้น 3 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ระยะเวลาในการทำการทดลอง

การทดลองเริ่มตั้งแต่เดือน มิถุนายน 2553 ถึง เมษายน 2554



ตารางที่ 10 ระยะเวลาและงานที่ปฏิบัติในแต่ละขั้นตอนการทดลอง

งานที่ปฏิบัติ	ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน											
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
หาข้อมูลหัวข้อวิทยานิพนธ์												
รวบรวมข้อมูล และจัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์												
เตรียมเชื้อแบคทีเรีย สารเคมี และอุปกรณ์ในการทำกล่องเก็บเสียง												
วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการทดลอง												
ทำการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย												
ทดสอบความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงกับแบคทีเรีย												
วิเคราะห์ผลการทดลอง												
จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์												

ผลและวิจารณ์

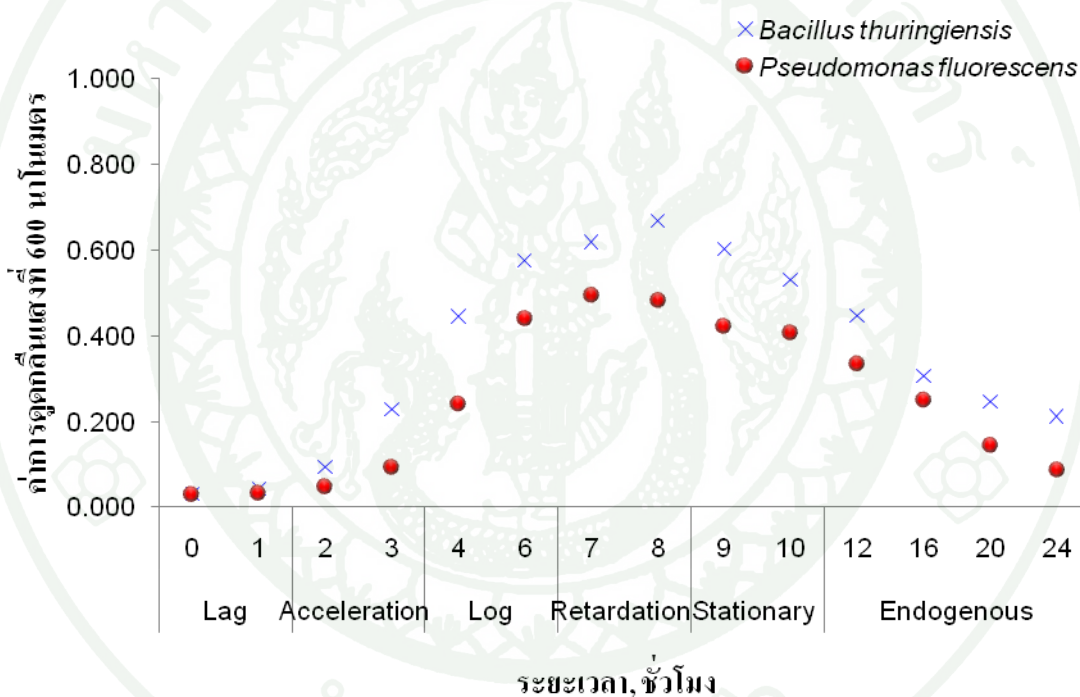
ผล

1. ผลการศึกษาหาระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ ด้วยวิธีการวัดความขุ่นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Turbidimetric method)

ในการศึกษาการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* แบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* ครั้งนี้ได้ทำการเพาะเลี้ยงเซลล์แบคทีเรียในอาหารเหลว (Nutrient Broth) แล้วทำการวัดการเจริญเติบโตด้วยวิธีการวัดความขุ่นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Turbidimetric method) เนื่องจากการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียในอาหารเหลวจะบดบังแสงที่ผ่านมา แสงที่ผ่านออกจากตัวอย่างจะกระทบ Phototube และ Galvanometer เปลี่ยนเป็นพลังงานแสงให้เป็นพลังไฟฟ้า โดยแสดงออกมาเป็นค่า %transmittance และ Optical density ถ้าตัวอย่างมีเซลล์มากจะขุ่นมากแสงจะผ่านไปได้น้อย ค่า %transmittance จะต่ำ ส่วนค่า Optical density จะสูง จากการทดลองได้นำแบคทีเรียไปเลี้ยงในอาหารเหลว โดยไม่มีการการเติมหรือเปลี่ยนแปลงอาหารซึ่งเรียกว่าการเลี้ยงแบบกะ (Batch) ภายใต้สภาวะไร้อากาศในกล่องเก็บเสียงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เพียงแต่แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* มีการเจริญเติบโตให้ปริมาณที่มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อมีปริมาณเซลล์ตั้งต้นเท่ากัน

จากภาพที่ 29 แสดงผลการทดลองศึกษาหาระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับลักษณะแบบแผนการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย ดังแสดงในภาพที่ 1 ภัทรชัย (2549) กล่าวว่า ระยะ Logarithmic phase (Exponential phase) เป็นช่วงที่จุลชีพเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว แต่ค่าอัตราการเจริญจำเพาะมีค่าคงที่ หรือเรียกว่า Steady state ซึ่งความหนาแน่นเซลล์และความเข้มข้นของตะกอนคงที่ เป็นช่วงที่สำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียในระบบ สอดคล้องกับสุเทพ (2551) ซึ่งกล่าวว่า การเลี้ยงเชื้อในถังปฏิกรณ์แบบ Batch และแบบไหลต่อเนื่องสารอาหารส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ใหม่ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารอินทรีย์ หรือสารอินทรีย์ สำหรับในถังปฏิกรณ์แบบ Batch ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพสูงสุด (Maximum yield) คือ มวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้นระหว่าง Exponential growth phase และ Declining growth phase ที่สัมพันธ์กับปริมาณสารอาหารที่ใช้ตลอดระยะเวลาเดียวกัน และสาวิตรี (2552)

กล่าวว่า ระยะ Logarithmic phase หรือ Exponential phase เรียกสั้นๆ ว่า Log phase เป็นระยะที่เซลล์มีการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วแบบทวีคูณ จาก 1 เป็น 2 จาก 2 เป็น 4 ไปเรื่อยๆ ระยะนี้จะใช้ในการคำนวณหา Generation time หรือ Doubling time หรือระยะเวลาที่เซลล์เพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า เซลล์ในระยะนี้จะมีกิจกรรมทางเมตาบอลิซึมสูงที่สุด ในขณะที่เดียวกันก็เป็นระยะเวลาที่เซลล์ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมากที่สุด ถ้านำเซลล์ที่อยู่ในระยะนี้มา ฉายรังสี หรือ ทดสอบยาปฏิชีวนะ เซลล์จะถูกทำลายง่ายกว่าระยะอื่น ดังนั้นจึงทำการเลือกนำเซลล์ที่มีความเหมาะสมในช่วงระยะดังกล่าวข้างต้น คือระยะ Logarithmic phase ซึ่งจะตรงกับผลที่ได้ดังภาพที่ 29 ที่ระยะ 4-6 ชั่วโมง มาทำการทดสอบกับสภาวะองค์ประกอบของสิ่งแวดล้อมต่างๆ ในการศึกษาครั้งนี้



ภาพที่ 29 ผลการทดลองศึกษาหาระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์

ทั้งนี้จากภาพที่ 29 ยังสามารถพิจารณาถึงอัตราการเจริญของแบคทีเรียได้ คือ การคำนวณหาค่า Doubling time ต่อชั่วโมง ซึ่งมักถูกใช้ในการทำนายความเร็วในการเพิ่มจำนวนของเชื้อ หากมีค่าน้อยแสดงว่าเจริญได้เร็วมาก หากค่ายิ่งมากก็ยิ่งเจริญช้า ดังสมการ (สาวตรี, 2552)

$$g = \frac{t}{n} \quad (16)$$

$$\text{เมื่อ } N = N_0 2^n \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } N &= \text{จำนวนเซลล์สุดท้าย} \\ N_0 &= \text{จำนวนเซลล์เริ่มต้น} \\ n &= \text{จำนวนครั้งของการแบ่งเซลล์} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } g = \frac{0.301t}{\log N - \log N_0} \quad (18)$$

จากสมการที่ 18 จะเห็นว่าการคำนวณหา Generation time หรือ Doubling time ได้นั้น จะต้องทำการนับจำนวนเซลล์แบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อ (plate count) เป็นการนับเฉพาะเซลล์ที่มีชีวิตและสามารถเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดที่ใช้ได้ ซึ่งเป็นวิธีการวัดการเจริญของแบคทีเรียด้วยวิธีวัดโดยตรง (Direct method) แต่เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ทำการศึกษาวัดการเจริญ (Phases of growth) ของแบคทีเรียด้วยวิธีวัดโดยอ้อม (Indirect method) ด้วยการวัดความขุ่น (Turbidity) โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสารเมื่อแบคทีเรียมีจำนวนเพิ่มขึ้นความขุ่นจะเพิ่มขึ้น สามารถนำค่าที่วัดได้ในช่วงเวลาต่างๆ มาเขียนเป็นกราฟการเจริญได้เช่นเดียวกันกับการนับจำนวนเซลล์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะ Log phase ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ จากภาพที่ 29 พบว่า แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* มีความขุ่นมากกว่าหรือแสดงว่าแบคทีเรียมีจำนวนเพิ่มขึ้นมากกว่าแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* สัมพันธ์กับสมการที่ 18 คือเมื่อเซลล์เริ่มต้นเท่ากัน ถ้าเซลล์สุดท้ายมากหรือมีค่าความขุ่นมากส่งผลให้ค่า Generation time หรือ Doubling time น้อย แสดงว่ามีอัตราการเจริญเติบโตสูง แต่ถ้าเซลล์สุดท้ายน้อยหรือมีค่าความขุ่นน้อยส่งผลให้ค่า Generation time หรือ Doubling time มาก แสดงว่ามีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำ จากค่า Generation time หรือ Doubling time ที่พิจารณาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* มีอัตราการเจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

2. ผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และค่าวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) ของความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ณ เวลาการเลี้ยงที่ 24 ชั่วโมง

การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าน้ำหนักแห้ง ค่าอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) และค่าความต้องการออกซิเจนเชิงเคมี (COD) ของกลุ่มแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ คือ แบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* และแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* ซึ่งได้จากการวัดความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสง (Optical density) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และค่าวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์การถดถอย และค่าวิเคราะห์สหสัมพันธ์

สายพันธุ์แบคทีเรีย	ผลการวิเคราะห์	
	สมการถดถอย	ค่าสหสัมพันธ์
<i>Bacillus thuringiensis</i>	$OD_t = 0.0023(DW_t) - 0.0833$	$R^2 = 0.9727$
	$OD_t = -0.0005(COD_t) + 1.0161$	$R^2 = 0.9649$
	$OD_t = -0.0015(TOC_t) + 1.0529$	$R^2 = 0.9534$
	$COD_t = 0.362(TOC_t) + 37.129$	$R^2 = 0.9583$
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	$OD_t = 0.0024(DW_t) - 0.0698$	$R^2 = 0.9776$
	$OD_t = -0.0005(COD_t) + 0.08527$	$R^2 = 0.9527$
	$OD_t = -0.0009(TOC_t) + 0.6895$	$R^2 = 0.9796$
	$COD_t = 0.4995(TOC_t) - 180.34$	$R^2 = 0.9756$

โดย ; $OD_t = f(DW_t)$

$OD_t = f(COD_t)$

$OD_t = f(TOC_t)$

OD_t = ค่าการดูดกลืนแสง ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ t ชั่วโมง ()

DW_t = ปริมาณน้ำหนักแห้งของจุลชีพ ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ t ชั่วโมง (mg/L)

COD_t = ปริมาณสารอาหารของ COD ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ t ชั่วโมง (mg/L)

TOC_t = ปริมาณสารอาหารของ TOC ณ เวลาการบ่มเชื้อที่ t ชั่วโมง (mg/L)

ความสัมพันธ์ของสมการถดถอยของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสง (Optical density) กับน้ำหนักรากแห้ง พบว่ามีความสัมพันธ์แปรผันตามกัน คือ เมื่อค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น ค่าน้ำหนักรากแห้งของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ของค่า COD และ TOC พบว่า เมื่อค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น แต่ค่า COD และค่า TOC ลดลง แสดงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน หรือแปรผันตรงข้ามกัน และความสัมพันธ์ของค่า COD กับค่า TOC พบว่าเมื่อค่า COD เพิ่มขึ้น ค่า TOC เพิ่มขึ้นตามกัน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์แปรผันตามกัน ดังกราฟในภาคผนวก ก ภาพผนวกที่ ก1, ก2, ก3 และ ก4 ตามลำดับ

จักรศิริ (2548) กล่าวว่า ค่าสหสัมพันธ์จะอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง 1.00 ถ้าหาก ค่าสหสัมพันธ์มีค่ามากกว่า 0 แล้วจะเป็นความสัมพันธ์ทางบวก ถ้าหากมีค่าน้อยกว่า 0 แล้วจะเป็นความสัมพันธ์ทางลบ ตัวแปรจะสัมพันธ์กันสูง ปานกลางหรือต่ำ ตามเกณฑ์ดังนี้

สัมพันธ์กันสูง	$r \geq 0.80$
หรือ	$r \leq -0.80$
สัมพันธ์กันปานกลาง	$0.50 < r < 0.80$
หรือ	$-0.80 < r < -0.50$
สัมพันธ์กันต่ำ	$-0.50 \leq r \leq 0.50$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าสหสัมพันธ์ จากการผลทดลองแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับน้ำหนักรากแห้ง, ค่า COD, ค่า TOC และค่า COD กับค่า TOC พบว่า มีความสัมพันธ์ทางบวกในลักษณะสัมพันธ์กันสูงตามเกณฑ์

3. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าการดูดกลืนแสง (Optical density) ณ เวลาการเพาะเลี้ยงที่ 4 ชั่วโมง ระหว่างกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม

ในการศึกษาวิจัยได้ออกแบบการทดลองโดยเพิ่มหลอดทดลอง โดยกลุ่มควบคุมมีจำนวน 25 หลอดทดลอง และกลุ่มทดลองจำนวน 50 หลอดทดลอง แล้วนำมาผลของค่าการดูดกลืนแสง (Optical density) ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อยืนยันผลการทดลองมีความถูกต้องในระดับที่สามารถเชื่อได้ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลองกับกลุ่มควบคุม และวิเคราะห์ผลความแตกต่างระหว่างกลุ่มของชุดการทดลองที่สภาวะความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะการปล่อยคลื่นความถี่เสียงที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบกลุ่มทดลองกับกลุ่มควบคุม ทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยประชากรสองชุด ซึ่งการทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับ 2 กลุ่มตัวอย่าง กรณีที่ 2 กลุ่มเป็นอิสระจากกัน (Hypothesis Testing of Means for Two Independent Sample) (ศิริชัย, 2551) ได้กำหนดสมมติฐานเพื่อการทดสอบ ไว้ดังนี้

H_0 : ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมแตกต่างกัน

หรือ $H_0: \mu_A = \mu_B$

หรือ $\mu_A - \mu_B = 0$

$H_1: \mu_A \neq \mu_B$

หรือ $\mu_A - \mu_B \neq 0$

โดยทดสอบค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยระหว่างกลุ่มทดลอง และกลุ่มควบคุมว่าแตกต่างกันหรือไม่ การวัดความเชื่อถือได้ของผลการทดสอบสมมติฐานเชิงสถิติโดยพิจารณาจาก α ซึ่งมีชื่อเรียกอีกชื่อว่า ระดับนัยสำคัญ (Significant level) หรืออาจพิจารณาจาก $(1-\alpha)$ โดยเมื่อคูณ 100 และจะเรียกว่า ระดับความเชื่อมั่น (Confident level) (สรชัย, 2553) ทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม SPSS 11.5 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์โปรแกรมในภาคผนวก ข ตารางภาคผนวกที่ ข1 ส่วนผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยค่า t-test แบบ 2 กลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระต่อกัน พบว่าค่าการดูดกลืนแสง (Optical density) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.005 และที่ช่วงความเชื่อมั่น 99.5% ดังแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม

ลักษณะเสียง/ ความถี่เสียง	ความดังเสียง, dB(C)	ระดับนัยสำคัญ (%)			
		<i>B. thuringiensis</i>	P-Value ()	<i>P. fluorescens</i>	P-Value ()
Continuous/ 500 Hz	60	99.5	0.000	99.5	0.000
	80	99.5	0.000	99.5	0.000
	100	99.5	0.001	99.5	0.000
Moderato/ 500 Hz	60	99.5	0.636	99.5	0.000
	80	99.5	0.573	99.5	0.000
	100	99.5	0.001	99.5	0.000
Continuous/ 1 kHz	60	99.5	0.000	99.5	0.000
	80	99.5	0.000	99.5	0.000
	100	99.5	0.000	99.5	0.005
Moderato/ 1 kHz	60	99.5	0.064	99.5	0.000
	80	99.5	0.531	99.5	0.369
	100	99.5	0.064	99.5	0.646
Continuous/ 5 kHz	60	99.5	0.064	99.5	0.064
	80	99.5	0.064	99.5	0.064
	100	99.5	0.064	99.5	0.088
Moderato/ 5 kHz	60	99.5	0.064	99.5	0.015
	80	99.5	0.064	99.5	0.064
	100	99.5	0.064	99.5	0.064
Continuous/ 10 kHz	60	99.5	0.000	99.5	0.003
	80	99.5	0.000	99.5	0.00
	100	99.5	0.000	99.5	0.006
Moderato/ 10 kHz	60	99.5	0.000	99.5	0.004
	80	99.5	0.000	99.5	0.000
	100	99.5	0.000	99.5	0.000

ส่วนการวิเคราะห์ผลความแตกต่างระหว่างกลุ่มของชุดการทดลองที่สภาวะความดัง ความถี่เสียง และลักษณะการปล่อยคลื่นความถี่เสียงที่แตกต่างกัน จากการทดลองได้ทำการทดสอบ ค่าเฉลี่ยสำหรับหลายกลุ่มตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Hypothesis Testing of Means for k Samples by Two-Way analysis of Variance) (ศิริชัย, 2551) เนื่องจากตัวแปรระดับความดังและความถี่เสียงเป็นปัจจัยแบบคงที่ สามารถกำหนดสมมติฐานสำหรับการทดสอบได้ 4 สมมติฐานดังต่อไปนี้

ก. สำหรับตัวแปรด้านแอมพลิจูด คือ ความดังเสียง ซึ่งจำแนกได้ 3 ระดับ (60, 80, 100 dB(C))

H_0 : ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยชุดการทดลองแต่ละความดังเสียงไม่แตกต่างกัน

H_1 : มีอย่างน้อย 2 ความดังเสียงที่ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของชุดการทดลองแตกต่างกัน

ข. สำหรับตัวแปรด้านความถี่ คือ ความถี่เสียง ซึ่งจำแนกได้ 4 เสียง (0.5, 1, 5, 10 kHz)

H_0 : ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยชุดการทดลองแต่ละความถี่เสียงไม่แตกต่างกัน

H_1 : มีอย่างน้อย 2 ความถี่เสียงที่ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของชุดการทดลองแตกต่างกัน

ค. สำหรับผลกระทบร่วมจากทั้ง 2 ตัวแปร คือ ความดังและความถี่เสียง

H_0 : ไม่มีผลกระทบร่วมระหว่างกลุ่มความดังและความถี่เสียงต่อค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย

H_1 : มีผลกระทบร่วมระหว่างกลุ่มความดังและความถี่เสียงต่อค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย

ถ้าปฏิเสธสมมติฐาน H_0 นี้แสดงว่า ความดังและความถี่เสียงมีผลกระทบร่วมต่อค่าการดูดกลืนแสง สามารถที่จะทดสอบความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยในส่วนต่างๆ แต่ละช่องภายใต้สมมติฐานดังนี้

ง. สำหรับผลกระทบจากทั้ง 2 ตัวแปร คือ ความดังเสียงและความถี่เสียง

H_0 : ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยชุดการทดลองแต่ละความดังและความถี่เสียงไม่แตกต่างกัน

H_1 : มีอย่างน้อย 2 กลุ่มที่ค่าการดูดกลืนแสงของชุดการทดลองแตกต่างกัน

ทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม SPSS ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติในภาคผนวก ข ตารางภาคผนวกที่ ข2-ข5 และแสดงผลการทดสอบค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของชุดการทดลองแบบที่เรียทั้ง 2 สายพันธุ์ จำแนกตามความดังและความถี่เสียง ด้วยลักษณะเสียงดังแบบต่อเนื่อง (Continuous) และลักษณะเสียงดังแบบเป็นจังหวะ ที่ความเร็ว 100 ครั้งต่อนาที (Moderato) ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของระหว่างชุดการทดลองของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์

ลักษณะเสียง	สายพันธุ์แบคทีเรีย	Status	Mean	S.D.	n	F-value	F-prob	
Continuous	<i>B. thuringiensis</i>	ความดังเสียง	60	-.0368	.0286	200	306.54	.000
			80	-.0479	.0248	200		
			100	-.0058	.0341	200		
		ความถี่เสียง	500 Hz	-.0179	.0428	150	55.53	.000
			1 kHz	-.0470	.0307	150		
			5 kHz	-.0183	.0156	150		
			10 kHz	-.0263	.0374	150		
		ผลกระทบร่วมความถี่และความดังเสียง					38.67	.000
	<i>P. fluorescens</i>	ความดังเสียง	60	.0217	.0186	200	233.18	.000
			80	.0249	.0319	200		
			100	.0264	.0314	200		
		ความถี่เสียง	500 Hz	.0017	.0347	150	17.13	.000
			1 kHz	.0147	.0417	150		
			5 kHz	.0139	.0371	150		
			10 kHz	.0034	.0281	150		
		ผลกระทบร่วมความถี่และความดังเสียง					3.20	.004
Moderato	<i>B. thuringiensis</i>	ความดังเสียง	60	-.0201	.0439	200	866.98	.000
			80	.0931	.1834	200		
			100	.1342	.1948	200		
		ความถี่เสียง	500 Hz	.2862	.2087	150	2243.7	.000
			1 kHz	.0135	.0462	150		
			5 kHz	.0278	.0397	150		
			10 kHz	-.0521	.0333	150		
		ผลกระทบร่วมความถี่และความดังเสียง					422.08	.000

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ลักษณะเสียง	สายพันธุ์แบคทีเรีย	Status	Mean	S.D.	n	F-value	F-prob
Moderato	<i>P. fluorescens</i>	ความดังเสียง	60	.0319	200	926.37	.000
			80	.0261	200		
			100	.1272	200		
		ความถี่เสียง	500 Hz	.1710	150	1152.7	.000
			1 kHz	.0218	150		
			5 kHz	.0270	150		
			10 kHz	.0334	150		
		ผลกระทบรวมความถี่และความดังเสียง				1065.6	.000

จากตารางที่ 13 แสดงผลการทดสอบด้วยสถิติ F-test ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และช่วงของค่าประมาณที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแบคทีเรียแกรมทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยการปล่อยความถี่ลักษณะเสียงดังต่อเนื่องและเป็นจังหวะ พบว่าที่ความดังเสียงต่างกันจะมีอย่างน้อย 2 ความดังเสียงที่ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแตกต่างกัน (F-prob = 0.000) และเมื่อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ได้รับความถี่เสียงต่างกันจะมีอย่างน้อย 2 ความถี่เสียงที่ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแตกต่างกัน (F-prob = 0.000) อีกทั้งเมื่อแบคทีเรียแกรมทั้ง 2 สายพันธุ์ได้รับความดังเสียงต่างกันและความถี่เสียงต่างกันจะมีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแตกต่างกัน (F-prob = 0.000)

4. ผลการคำนวณประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม

การทดลองครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพของความถี่เสียงลักษณะดังต่อเนื่องและเสียงดังเป็นจังหวะ เมื่อคำนวณ Growth Yield ด้วยน้ำหนักแห้งของจุลชีพที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณสารอาหารที่จุลชีพใช้ไป ด้วยการคำนวณใน 2 รูปแบบ คือ การคำนวณสารอาหารที่ถูกใช้ไปในรูปของค่า TOC และค่า COD

จากตารางที่ 14 แสดงน้ำหนักแห้งของจุลชีพที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณสารอาหารที่จุลชีพใช้ไปในเทคนิคตำแหน่งที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) (อ้างอิง COD

และ TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมจะเห็นว่ามีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงที่แตกต่างกันนั้น ไม่สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 30 และ 31 แต่เมื่อพิจารณาตัวเลขที่เป็นจริงนั้น จะพบว่ามีค่าความแตกต่างของค่า Growth yield ที่ทศนิยมตำแหน่งที่ 6 ซึ่งถือว่าต่างกันในระดับที่น้อยมาก ดังในภาคผนวกที่ 4 สอดคล้องกับรายงานของศุภจี (2553) ที่ทำการศึกษาถึงผลกระทบของเสียงเพลงต่อการใช้สารอาหารของจุลินทรีย์: กรณีศึกษากลุ่มแบคทีเรียใช้อากาศจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน กล่าวว่าการพิจารณาค่า Growth yield ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมจะเห็นว่ามีค่าเท่ากันแต่เมื่อพิจารณาตัวเลขที่เป็นจริงนั้น จะพบว่ามีค่าความแตกต่างของค่า Growth yield ที่ทศนิยมตำแหน่งที่ 5 ซึ่งถือว่าต่างกันในระดับที่น้อยมาก

ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) ของกลุ่มควบคุมและทดลอง ที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ โดยอ้างอิงกับค่า TOC และ COD

ลักษณะเสียง/ ความถี่เสียง	ระดับเสียง , dB(C)	กลุ่มทดลอง	Growth yield			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			TOC	COD	TOC	COD
Continuous/ 500 Hz	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.00	0.000	0.000
	80	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
Moderato/ 500 Hz	80	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 14 (ต่อ)

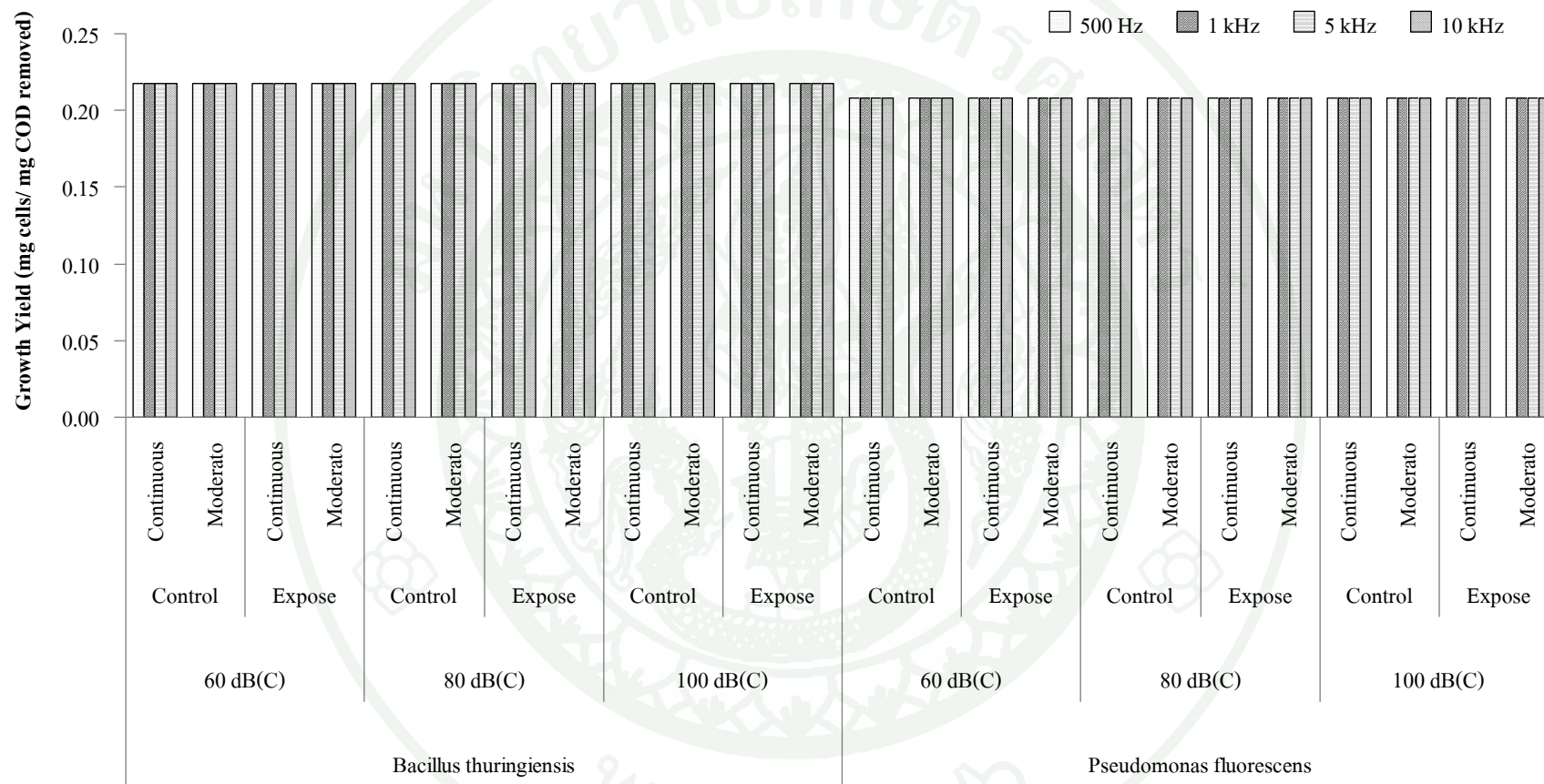
ลักษณะเสียง/ ความถี่เสียง	ระดับเสียง, dB(C)	กลุ่มทดลอง	Growth yield			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			TOC	COD	TOC	COD
Moderato/ 500 Hz	100	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
Continuous/ 1 kHz	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	80	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
Moderato/ 1 kHz	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	80	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
Continuous / 5 kHz	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 14 (ต่อ)

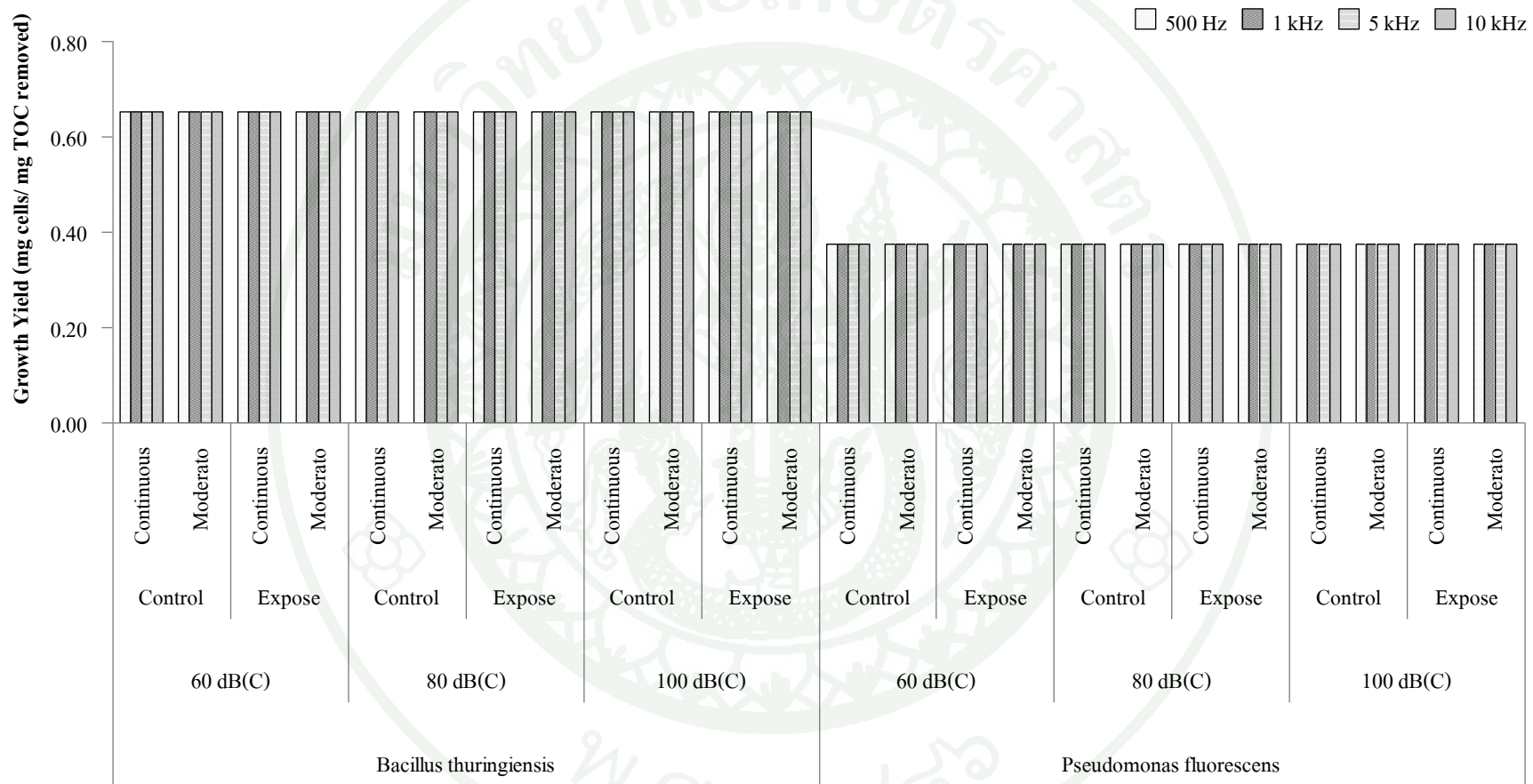
ลักษณะของ เสียง/ความถี่เสียง	ระดับเสียง, dB(C)	กลุ่มทดลอง	Growth yield			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			TOC	COD	TOC	COD
Continuous / 5 kHz	80	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
Moderato/ 5 kHz	80	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
Continuous/ 10 kHz	80	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ลักษณะของ เสียง/ ความถี่ เสียง	ระดับเสียง , dB(C)	กลุ่มทดลอง	Growth yield			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			TOC	COD	TOC	COD
Moderato/ 10 kHz	60	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	80	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000
	100	Control	0.375	0.208	0.652	0.217
		Expose	0.375	0.208	0.652	0.217
		ค่าความแตกต่าง, %	0.000	0.000	0.000	0.000



ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ (Growth Yield) (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ

5. ผลการคำนวณอัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม

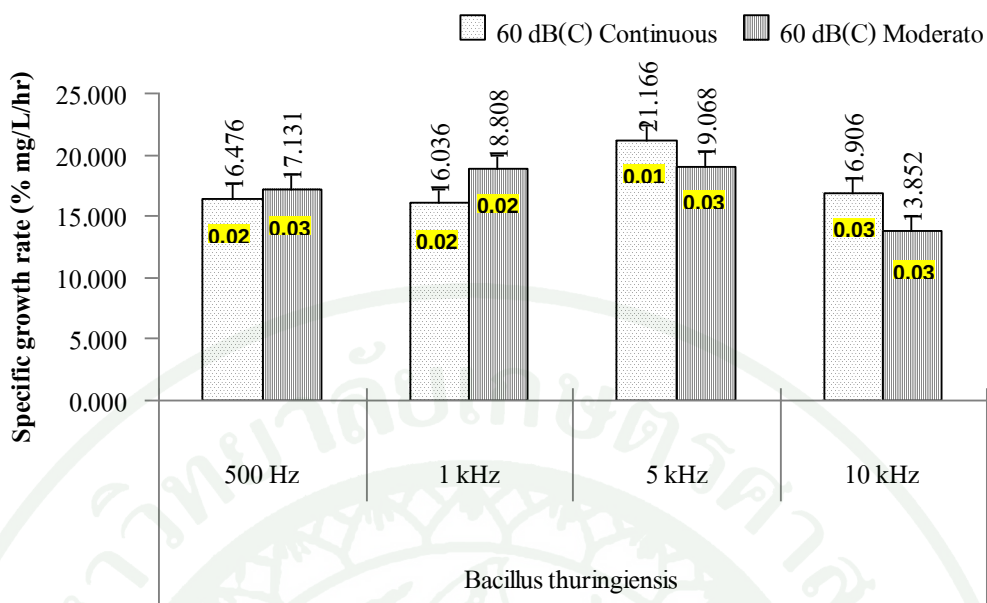
การพิจารณาอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม พบว่ามีความสัมพันธ์แปรผันตรง คือ เมื่อจุลชีพมีการใช้สารอาหารมาก จะทำให้มวลของจุลชีพเพิ่มมากขึ้น เมื่อแบคทีเรียได้รับความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะเสียงในลักษณะต่างๆ ส่งผลทำให้มีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะแตกต่างกัน ดังนี้

5.1 ผลการคำนวณที่ความดังเสียง 60 dB(C)

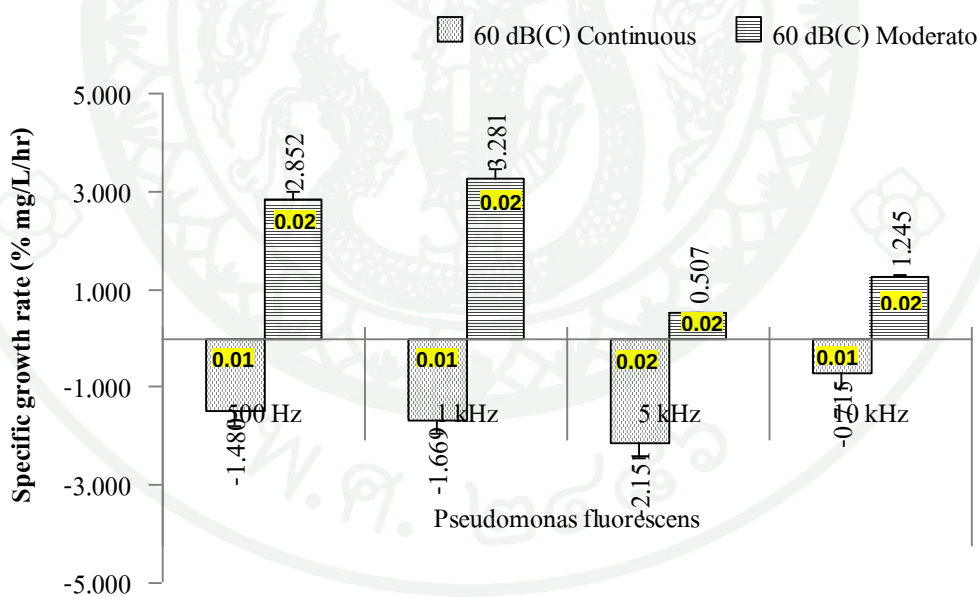
5.1.1 ผลการคำนวณอัตราการโตจำเพาะ (Sepecific Growth Rate)

อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการโตจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 5 kHz (21.166%), 10 kHz (16.906%), 500 Hz (16.476%) และ 1 kHz (16.036%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 5 kHz (19.068%), 1 kHz (18.808%), 500 Hz (17.131%) และ 10 kHz (13.852%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องที่ 5 kHz ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 32 (ก)

ส่วนอัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า ลักษณะของกราฟแสดงทิศทางที่เป็นลบหรือมีอัตราการโตจำเพาะ (Specific Growth Rate) ที่แย่ง โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะจากติดลบมากไปน้อยคือ 5 kHz (-2.151%), 1 kHz (-1.669%), 500 Hz (-1.480%) และ 10 kHz (-0.715%) ตามลำดับ ตรงกันข้ามกับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ พบว่าลักษณะของกราฟมีทิศทางที่เป็นบวกหรือมีอัตราการโตจำเพาะที่เพิ่มขึ้น โดยเรียงจากมากไปน้อยคือ 1 kHz (3.281%), 500 Hz (2.852%), 10 kHz (1.245%) และ 5 kHz (0.507%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 1 kHz ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 32 (ข)



(ก) อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



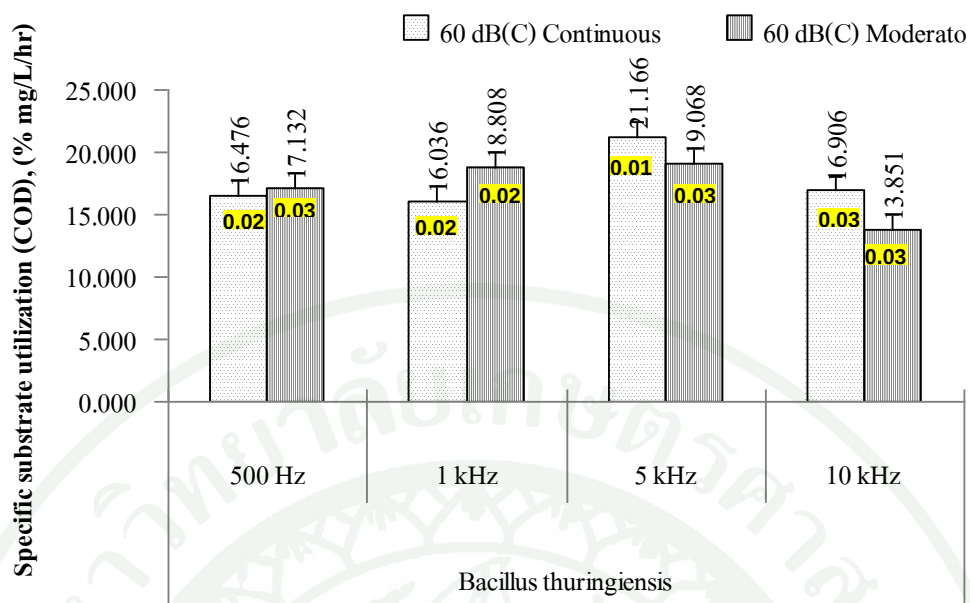
(ข) อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

ภาพที่ 32 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงดังระดับ 60 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

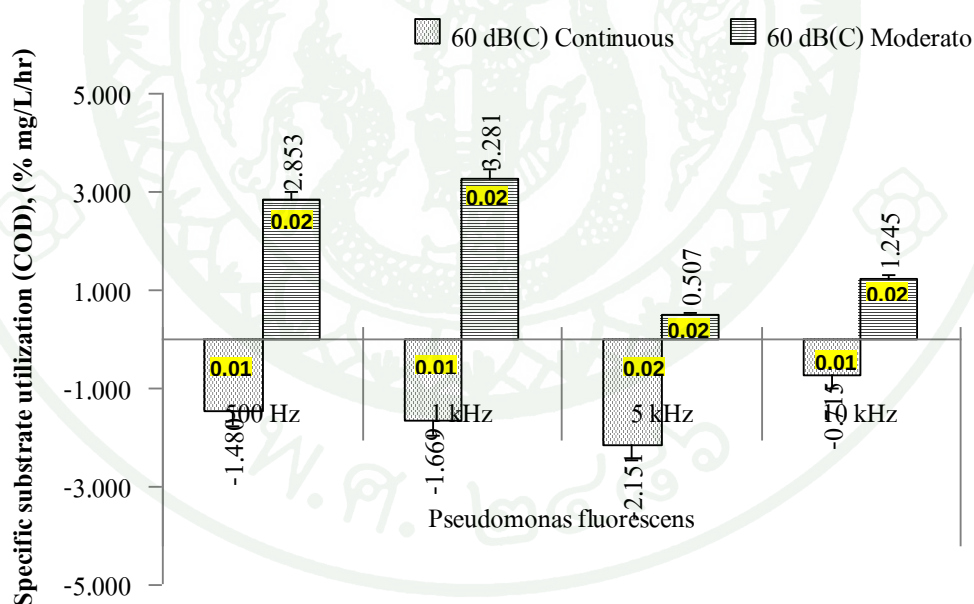
5.12 ผลการคำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Substrate Utilization) (อ้างอิง COD)

อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 5 kHz (21.166%), 10 kHz (16.906%), 500 Hz (16.476%) และ 1 kHz (16.036%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 5 kHz (19.068%), 1 kHz (18.808%), 500 Hz (17.132%) และ 10 kHz (13.851%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องที่ 5 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 33 (ก)

ส่วนอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า ลักษณะของกราฟแสดงทิศทางที่เป็นลบหรือมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่แย่ง โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากติดลบมากไปน้อยคือ 5 kHz (-2.151%), 1 kHz (-1.669%), 500 Hz (-1.480%) และ 10 kHz (-0.715%) ตามลำดับ ตรงกันข้ามกับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ พบว่าลักษณะของกราฟมีทิศทางที่เป็นบวกหรือมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่เพิ่มขึ้น โดยเรียงจากมากไปน้อยคือ 1 kHz (3.281%), 500 Hz (2.853%), 10 kHz (1.245%) และ 5 kHz (0.507%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 1 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 33 (ข)



(ก) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



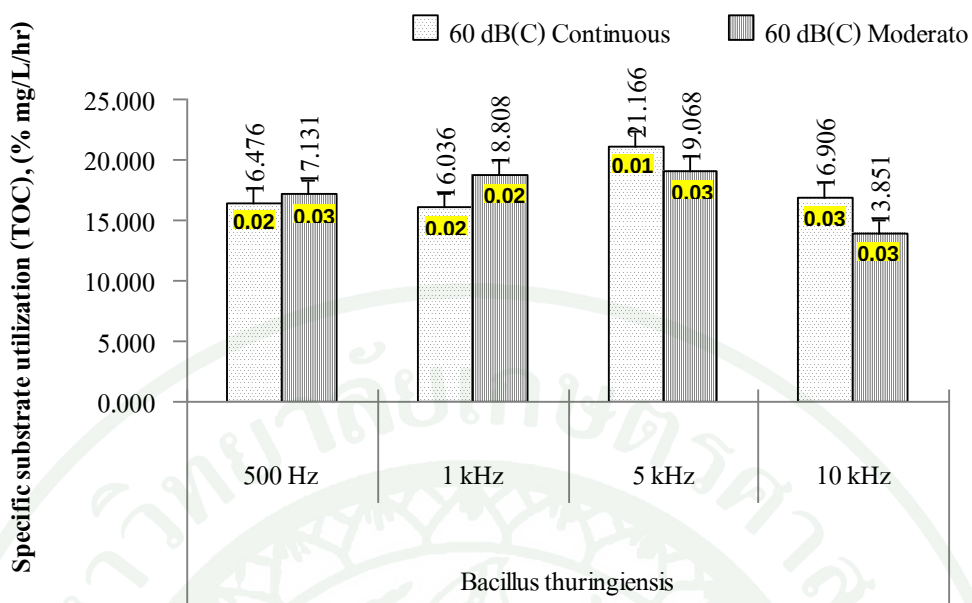
(ข) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

ภาพที่ 33 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อรับความถี่เสียงดังระดับ 60 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

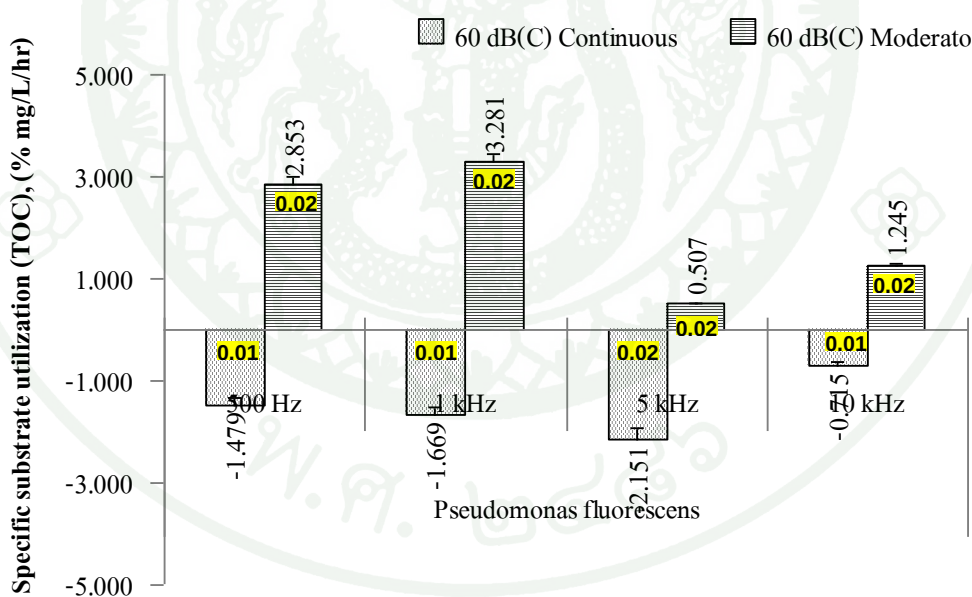
5.13 ผลการคำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Substrate Utilization) (อ้างอิง TOC)

อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 5 kHz (21.166%), 10 kHz (16.906%), 500 Hz (16.476%) และ 1 kHz (16.036%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 5 kHz (19.068%), 1 kHz (18.808%), 500 Hz (17.131%) และ 10 kHz (13.851%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องที่ 5 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 34 (ก)

ส่วนอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า ลักษณะของกราฟแสดงทิศทางที่เป็นลบหรือมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่แย่ง โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากติดลบมากไปน้อยคือ 5 kHz (-2.151%), 1 kHz (-1.669%), 500 Hz (-1.479%) และ 10 kHz (-0.715%) ตามลำดับ ตรงกันข้ามกับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ พบว่าลักษณะของกราฟมีทิศทางที่เป็นบวกหรือมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่เพิ่มขึ้น โดยเรียงจากมากไปน้อยคือ 1 kHz (3.281%), 500 Hz (2.853%), 10 kHz (1.245%) และ 5 kHz (0.507%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 1 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 34 (ข)



(ก) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



(ข) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

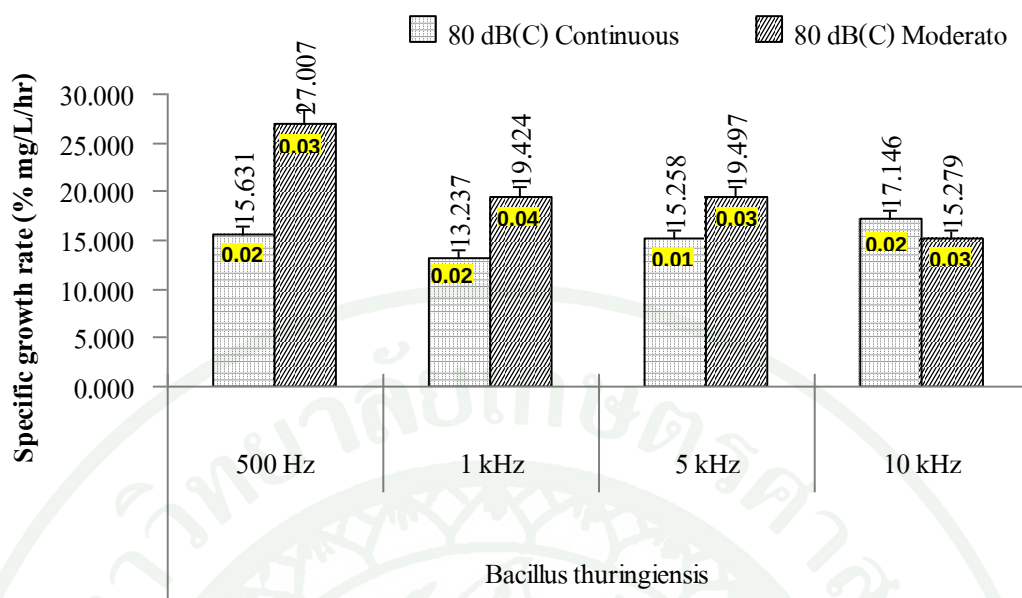
ภาพที่ 34 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อรับความถี่เสียงดังระดับ 60 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

5.2 ผลการคำนวณที่ความดังเสียง 80 dB(C)

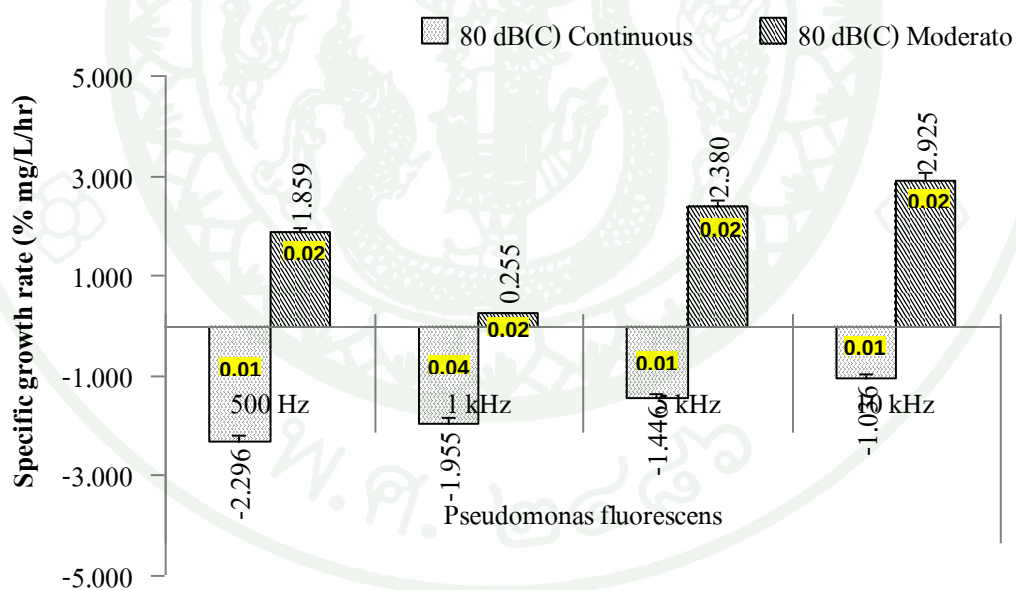
5.2.1 ผลการคำนวณอัตราการโตจำเพาะ (Sepecific Growth Rate)

อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการโตจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 10 kHz (17.146%), 500 Hz (15.631%), 5 kHz (15.237%) และ 1 kHz (13.237%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 500 Hz (27.007%), 5 kHz (19.497%), 1 kHz (19.424%) และ 10 kHz (15.279%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 500 Hz ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 35 (ก)

ส่วนอัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า ลักษณะของกราฟแสดงทิศทางที่เป็นลบหรือมีอัตราการโตจำเพาะ (Specific Growth Rate) ที่แย่ง โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะจากติดลบมากไปน้อยคือ 500 Hz (-2.296%), 1 kHz (-1.955%), 5 kHz (-1.446%) และ 10 kHz (-1.036%) ตามลำดับ ตรงกันข้ามกับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ พบว่าลักษณะของกราฟมีทิศทางที่เป็นบวกหรือมีอัตราการโตจำเพาะที่เพิ่มขึ้น โดยเรียงจากมากไปน้อยคือ 10 kHz (2.925%), 5 kHz (2.380%), 500 Hz (1.859%) และ 1 kHz (0.255%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 10 kHz ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 35 (ข)



(ก) อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



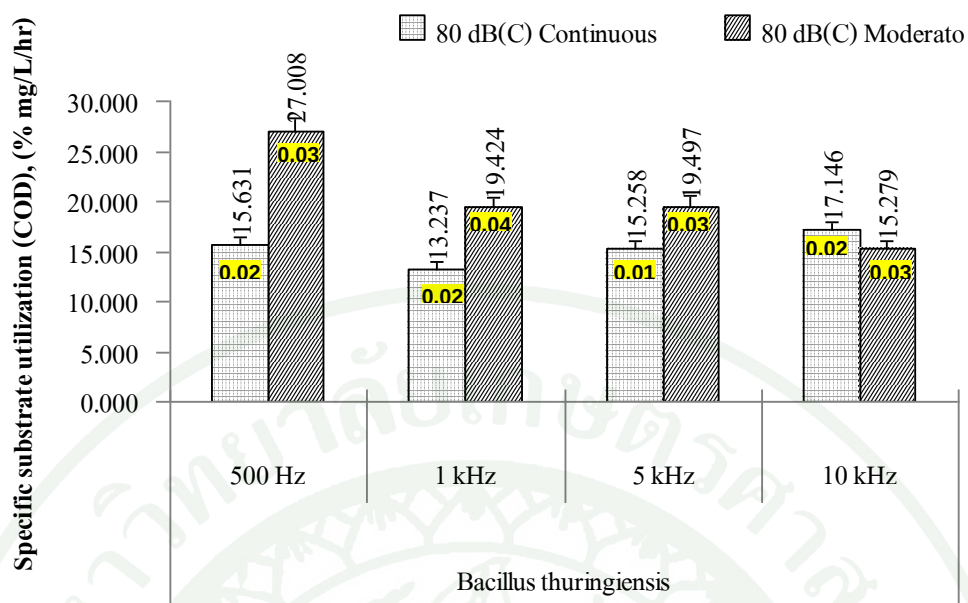
(ข) อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

ภาพที่ 33 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงดังระดับ 80 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

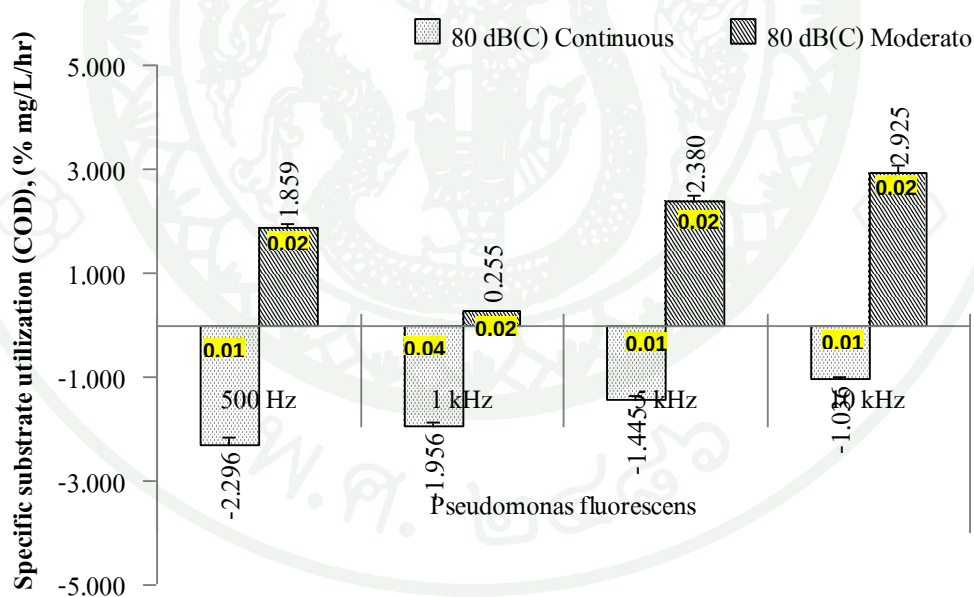
5.2.2 ผลการคำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Substrate Utilization) (อ้างอิง COD)

อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 10 kHz (17.146%), 500 Hz (15.631%), 5 kHz (15.237%) และ 1 kHz (13.237%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 500 Hz (27.008%), 5 kHz (19.497%), 1 kHz (19.424%) และ 10 kHz (15.279%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 500 Hz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 36 (ก)

ส่วนอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า ลักษณะของกราฟแสดงทิศทางที่เป็นลบหรือมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่แย่งลง โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากติดลบมากไปน้อยคือ 500 Hz (-2.296%), 1 kHz (-1.956%), 5 kHz (-1.445%) และ 10 kHz (-1.036%) ตามลำดับ ตรงกันข้ามกับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ พบว่าลักษณะของกราฟมีทิศทางที่เป็นบวกหรือมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่เพิ่มขึ้น โดยเรียงจากมากไปน้อยคือ 10 kHz (2.925%), 5 kHz (2.380%), 500 Hz (1.859%) และ 1 kHz (0.255%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 10 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 36 (ข)



(ก) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



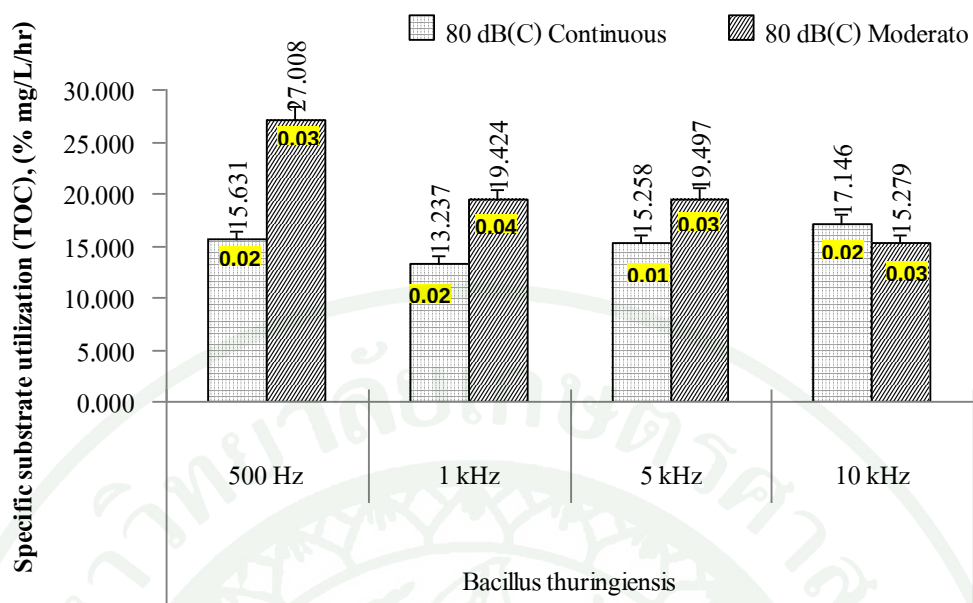
(ข) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

ภาพที่ 34 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อรับความถี่เสียงที่ระดับ 80 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

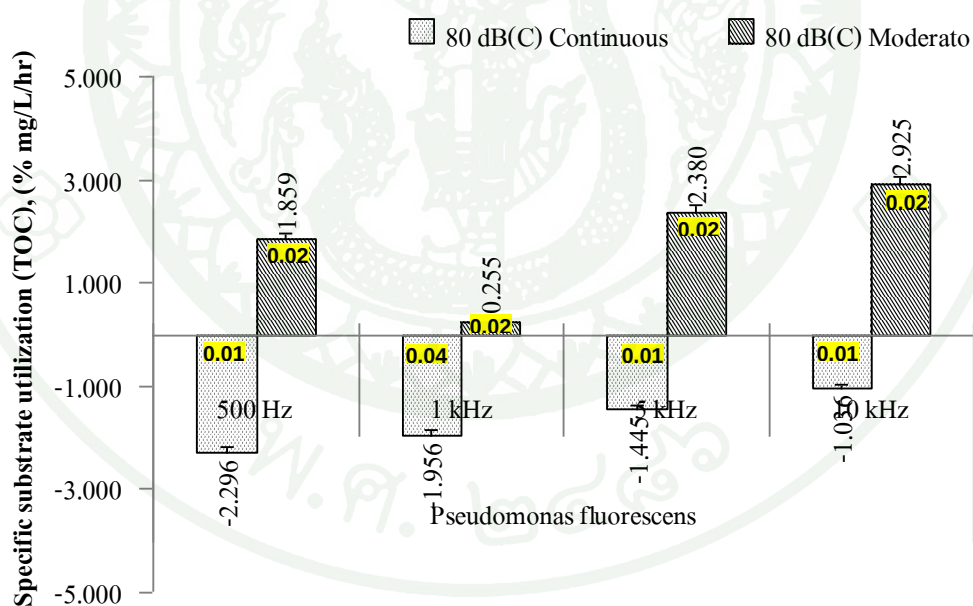
5.2.3 ผลการคำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Substrate Utilization) (อ้างอิง TOC)

อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 10 kHz (17.146%), 500 Hz (15.631%), 5 kHz (15.237%) และ 1 kHz (13.237%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 500 Hz (27.008%), 5 kHz (19.497%), 1 kHz (19.424%) และ 10 kHz (15.279%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 500 Hz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 37 (ก)

ส่วนอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า ลักษณะของกราฟแสดงทิศทางที่เป็นลบหรือมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่แย่งลง โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากติดลบมากไปน้อยคือ 500 Hz (-2.296%), 1 kHz (-1.956%), 5 kHz (-1.445%) และ 10 kHz (-1.036%) ตามลำดับ ตรงกันข้ามกับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ พบว่าลักษณะของกราฟมีทิศทางที่เป็นบวกหรือมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่เพิ่มขึ้น โดยเรียงจากมากไปน้อยคือ 10 kHz (2.925%), 5 kHz (2.380%), 500 Hz (1.859%) และ 1 kHz (0.255%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 10 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 37 (ข)



(ก) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



(ข) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

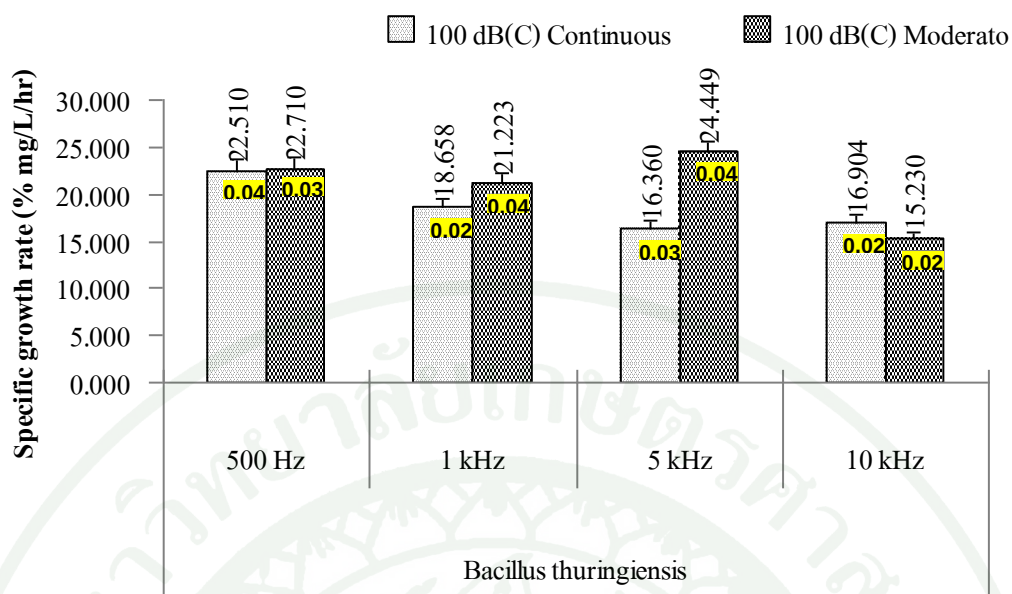
ภาพที่ 37 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อรับความเสี่ยงที่ระดับ 80 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

5.3 ผลการคำนวณที่ความดังเสียง 100 dB(C)

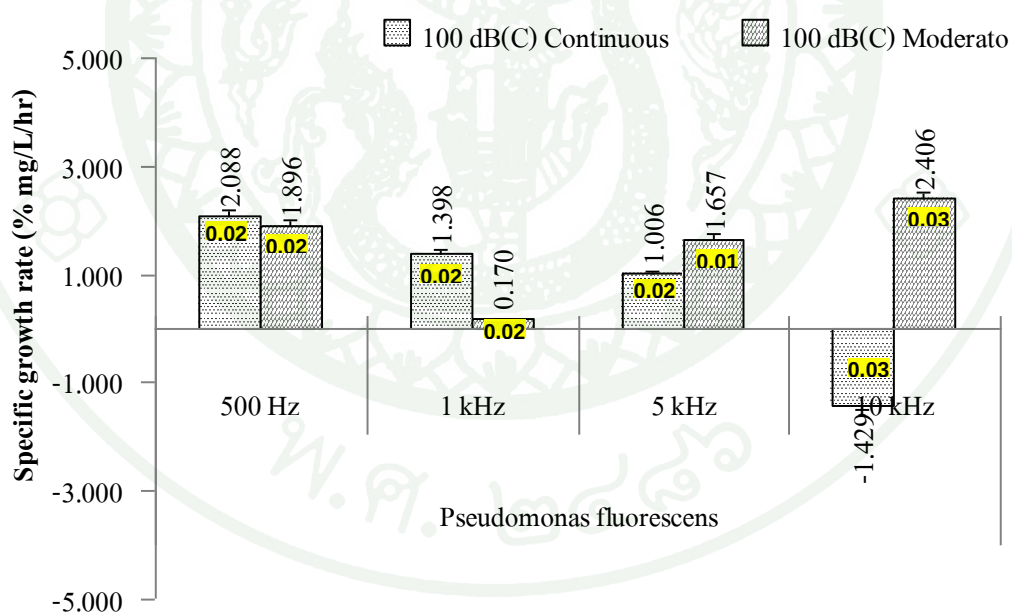
5.3.1 ผลการคำนวณอัตราการโตจำเพาะ (Specific Growth Rate)

อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการโตจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 500 Hz (22.510%), 1 kHz (18.658%), 10 kHz (16.904%) และ 5 kHz (16.360%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 5 kHz (24.449%), 500 Hz (22.710%), 1 kHz (21.223%) และ 10 kHz (15.230%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 5 kHz ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 36 (ก)

ส่วนอัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการโตจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 500 Hz (2.088%), 1 kHz (1.398%), 5 kHz (1.006%) และ 10 kHz (-1.429%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 10 kHz (2.406%), 500 Hz (1.896%), 5 kHz (1.657%) และ 1 kHz (0.170%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 10 kHz ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 36 (ข)



(ก) อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



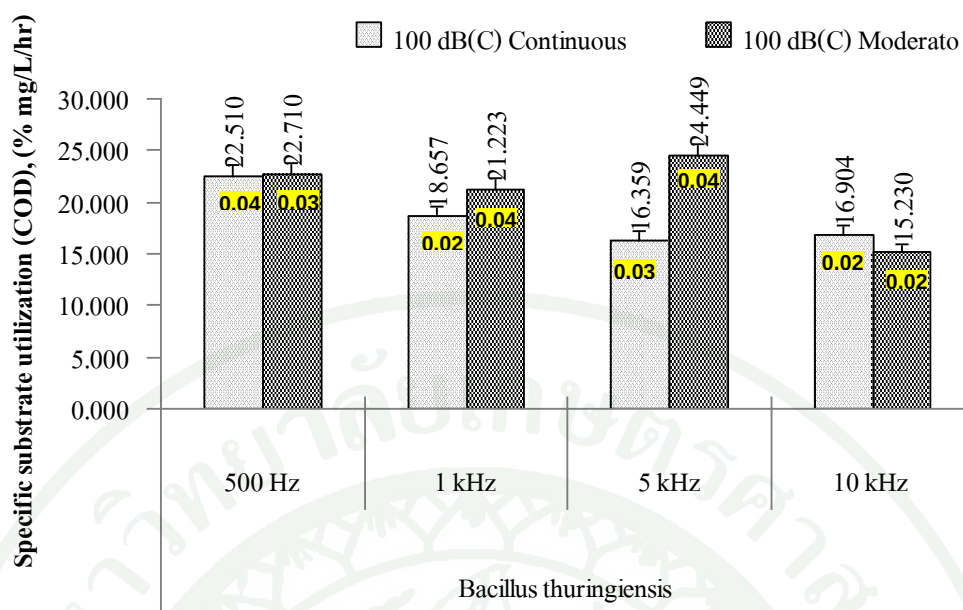
(ข) อัตราการโตจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

ภาพที่ 36 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อได้รับความถี่เสียงที่ระดับ 100 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

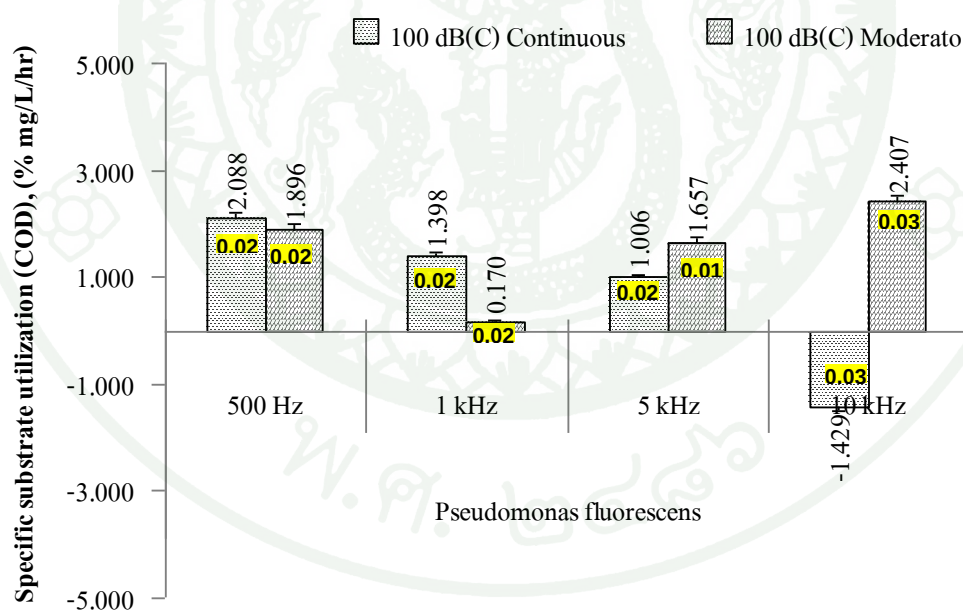
5.3.2 ผลการคำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Substrate Utilization) (อ้างอิง COD)

อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 500 Hz (22.510%), 1 kHz (18.657%), 10 kHz (16.904%) และ 5 kHz (16.359%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 5 kHz (24.449%), 500 Hz (22.710%), 1 kHz (21.223%) และ 10 kHz (15.230%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 5 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 39 (ก)

ส่วนอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 500 Hz (2.088%), 1 kHz (1.398%), 5 kHz (1.006%) และ 10 kHz (-1.429%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 10 kHz (2.407%), 500 Hz (1.896%), 5 kHz (1.657%) และ 1 kHz (0.170%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 10 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความดังเดียวกัน ดังภาพที่ 39 (ข)



(ก) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



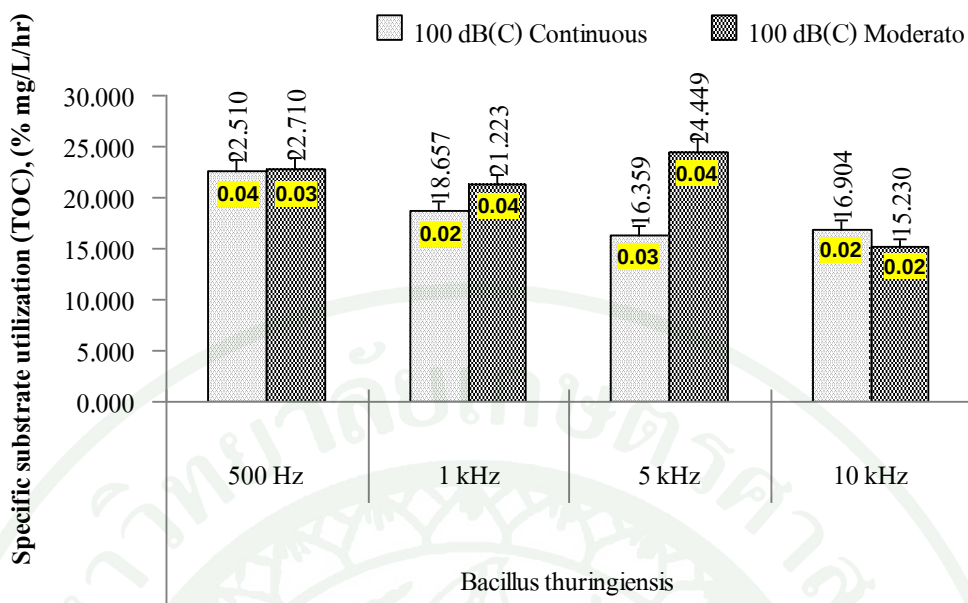
(ข) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

ภาพที่ 39 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อรับความเสี่ยงที่ระดับ 100 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

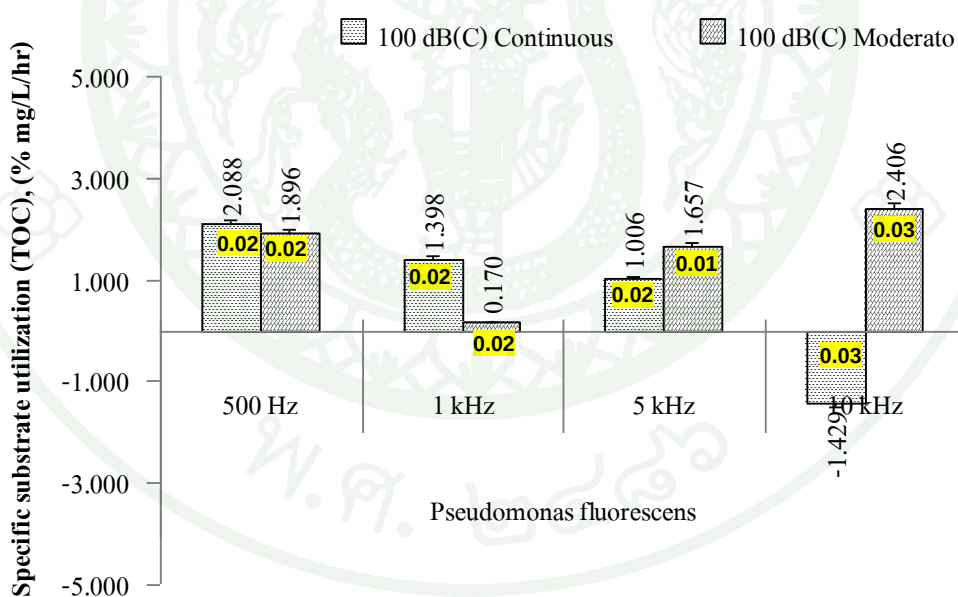
5.3.3 ผลการคำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Substrate Utilization) (อ้างอิง TOC)

อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 500 Hz (22.510%), 1 kHz (18.657%), 10 kHz (16.904%) และ 5 kHz (16.359%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 5 kHz (24.449%), 500 Hz (22.710%), 1 kHz (21.223%) และ 10 kHz (15.230%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 5 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความถี่เดียวกัน ดังภาพที่ 40 (ก)

ส่วนอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่า มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับความถี่เสียงที่ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องคือ 500 Hz (2.088%), 1 kHz (1.398%), 5 kHz (1.006%) และ 10 kHz (-1.429%) ตามลำดับ และความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะคือ 10 kHz (2.407%), 500 Hz (1.896%), 5 kHz (1.657%) และ 1 kHz (0.170%) ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าที่ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ 10 kHz ส่งผลต่ออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่เสียงอื่นๆ ที่ความถี่เดียวกัน ดังภาพที่ 40 (ข)



(ก) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis*



(ข) อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens*

ภาพที่ 40 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุม เมื่อรับความเสี่ยงที่ระดับ 100 dB(C) (ก) แบคทีเรียแกรมบวก และ (ข) แบคทีเรียแกรมลบ

จากการพิจารณาผลการเปรียบเทียบของอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* และแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* นั้น จะพบว่ากราฟจะมีลักษณะที่เท่ากัน แต่แท้จริงแล้วค่าของตัวเลขนั้น มีความแตกต่างกัน ที่ทศนิยมตำแหน่ง 3 ซึ่งน้อยมาก จึงทำให้ลักษณะของกราฟเหมือนกัน ด้วยความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับอัตราการโตเพาะจึงทำให้ลักษณะของกราฟ และการพิจารณาผลการทดลองแปรผันตามกันด้วยเช่นกันดังนี้

แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* มีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) สอดคล้องกับอัตราการโตจำเพาะที่เพิ่มขึ้น คือ เมื่อแบคทีเรียได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ ที่ระดับ 60, 80 และ 100 dB(C) ส่งผลให้แบคทีเรียมีการนำสารอาหารไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยการใช้สารอาหารปริมาณที่มาก การเจริญเติบโตก็จะเพิ่มขึ้นตามกัน ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ ส่งผลให้แบคทีเรียสายพันธุ์สามารถที่จะเพิ่มอัตราการโตจำเพาะ และมีอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ ส่วนแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ระดับ 60, 80 และ 100 dB(C) พบว่ามีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเป็นไปในทิศทางที่เป็นบวก ที่แสดงถึงอัตราการเจริญเติบโตมีมากขึ้นหรือเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแบคทีเรียได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องที่ระดับ 60 และ 80 dB(C) พบว่ามีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเป็นไปในทิศทางเป็นลบ ที่แสดงถึงอัตราการเจริญเติบโตที่ถูกยับยั้งหรือแย่ลง ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มความดังเสียงเป็น 100 dB(C) กลับพบว่าแบคทีเรียมีอัตราการโตจำเพาะและการใช้สารอาหารจำเพาะเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้นทั้งความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่อยู่ภายใต้สภาวะไร้องค์ประกอบเสียงใดๆ ปรกวน

และทั้งนี้จากผลการทดลองพบว่า ความถี่เสียงและระดับความดังเสียงที่เลือกใช้นั้น ส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียในลักษณะที่แตกต่างกันในรูปแบบที่ไม่แน่นอน ในการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ อีกทั้งความแตกต่างกันของลักษณะของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ เช่น โครงสร้างผนังเซลล์ องค์ประกอบของผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ ความต้านทานต่อการทำลายทางกายภาพ การสร้างสปอร์และไม่สร้างสปอร์ ขนาดของเซลล์ หรือแม้กระทั่งพื้นที่ผิวของเซลล์ที่ได้รับผลกระทบ ส่งผลให้แบคทีเรียมีการเลือกที่จะตอบสนองต่อความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงมีความแตกต่างกันได้

6. ลักษณะของความดังเสียงที่ใช้ในการทดลอง

ทำการวิเคราะห์ความดังเสียงด้วยการคำนวณกำลังอัดของเสียง (Sound pressure) ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของกำลังอัดของเสียงในหน่วย decibel ด้วยสมการที่ (7) แสดงผลดังตาราง 15

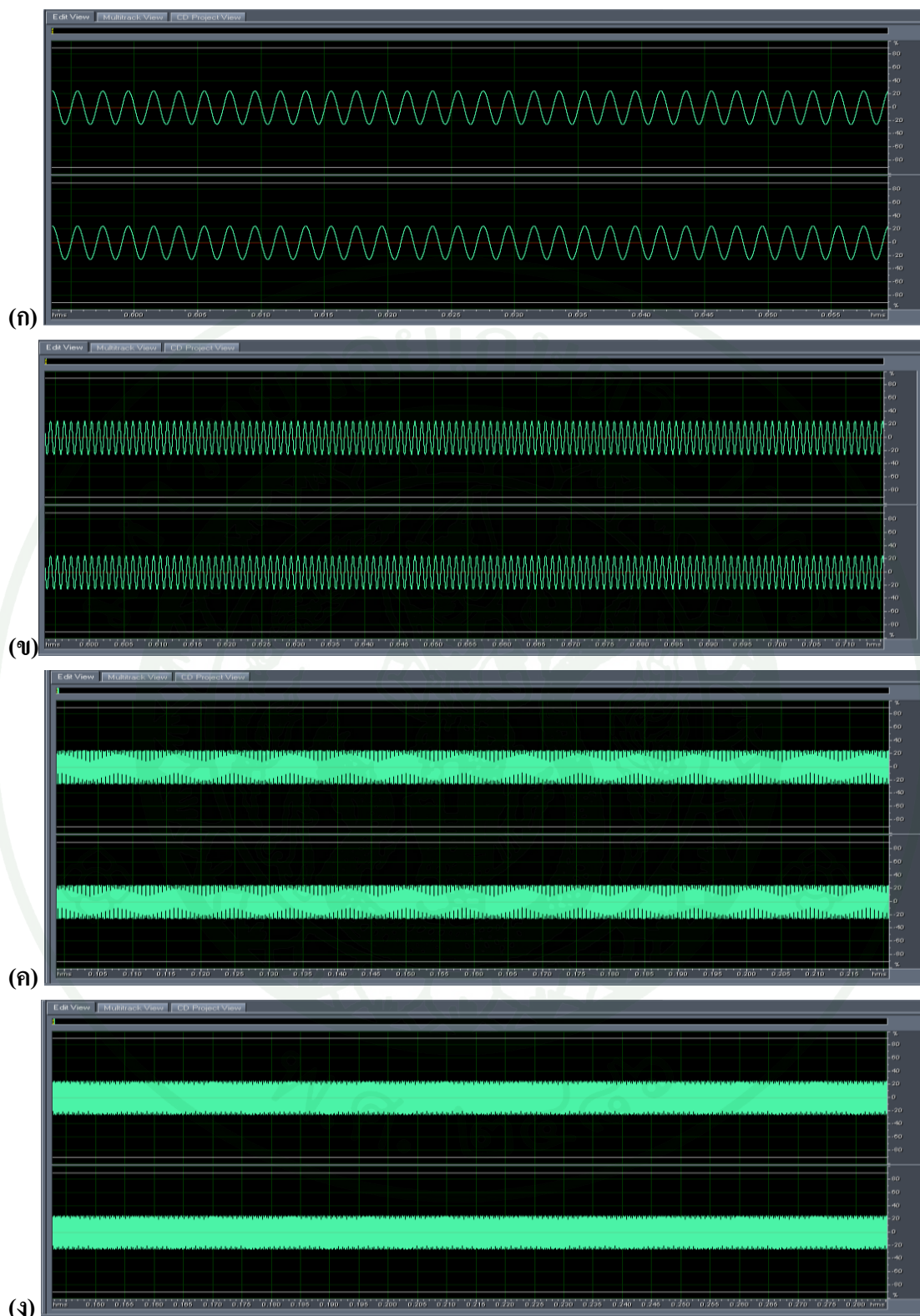
ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ความดังเสียงด้วยการคำนวณกำลังอัดของเสียง

ความดังเสียง, dB(C)	กำลังอัดของเสียง, P_2
60	$P_2 = 29.0 \times 10^{-10} \times 10^{\frac{dB}{20}} = 29.0 \times 10^{-10} \times 10^{\frac{60}{20}} = 29.0 \times 10^{-7}$
80	$P_2 = 29.0 \times 10^{-10} \times 10^{\frac{dB}{20}} = 29.0 \times 10^{-10} \times 10^{\frac{80}{20}} = 29.0 \times 10^{-6}$
100	$P_2 = 29.0 \times 10^{-10} \times 10^{\frac{dB}{20}} = 29.0 \times 10^{-10} \times 10^{\frac{100}{20}} = 29.0 \times 10^{-5}$

จากวิเคราะห์ความดังเสียงด้วยการคำนวณหากำลังอัดของเสียง (Sound pressure) จากนิยามของ bar พบว่า ความดังเสียงที่ 60 dB มีกำลังอัดเสียงที่ส่งออกมาคือ 29.0×10^{-7} ที่ความดัง 80 dB กำลังอัดเสียงเพิ่มขึ้นเป็น 29.0×10^{-6} และเมื่อเพิ่มความดังสูงขึ้นอีกเป็น 100 dB พบว่ากำลังอัดเสียงมีค่าเพิ่มขึ้นคือ 29.0×10^{-5} ตามลำดับ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า เมื่อความดังเสียงเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของเสียงที่ปล่อยออกมาให้เพิ่มขึ้นตามลำดับ

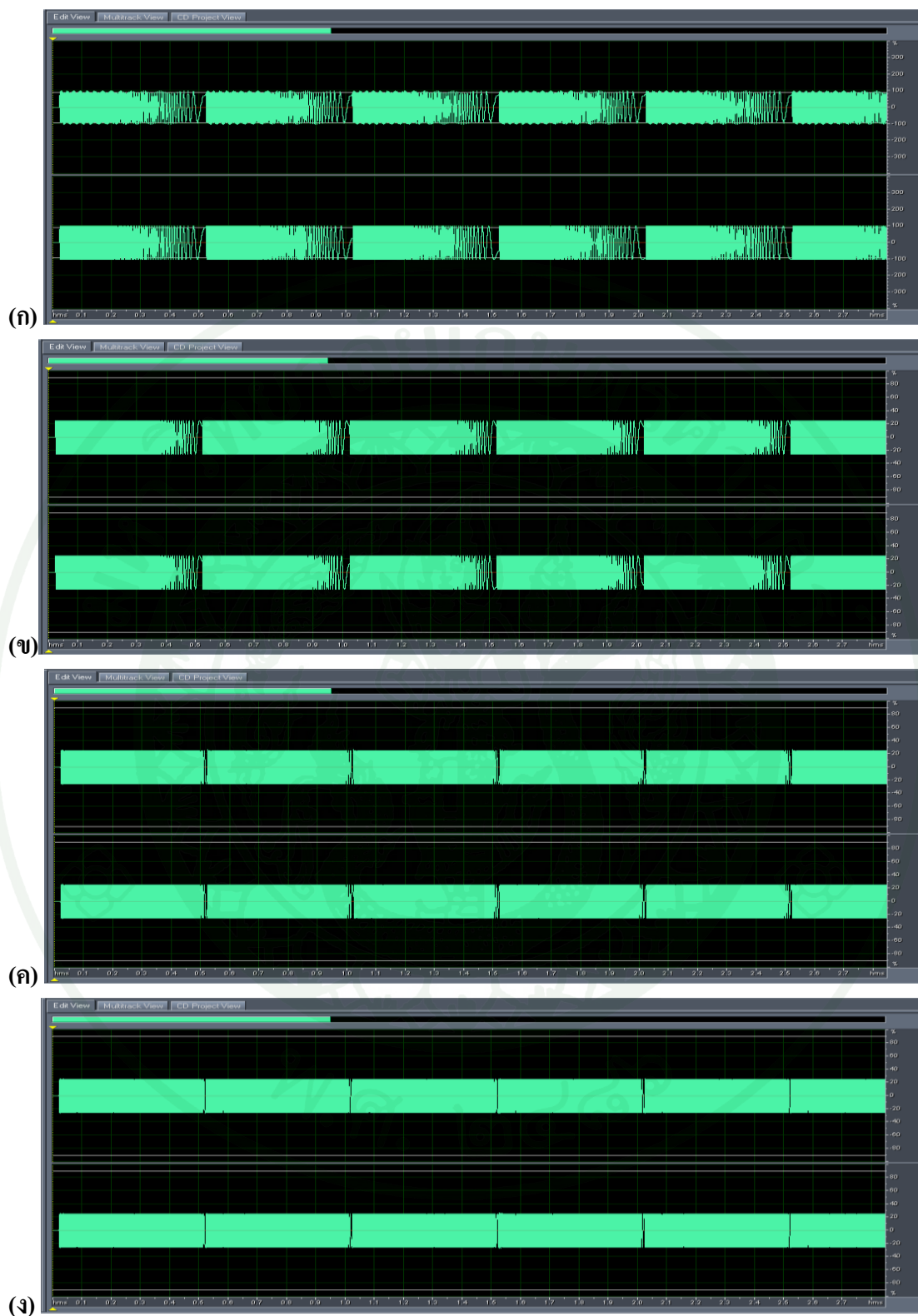
7. ลักษณะของความถี่เสียงที่ใช้ในการทดลอง

ในการวิเคราะห์ลักษณะคลื่นความถี่เสียงที่ใช้ในการทดลองใช้โปรแกรม Adobe Audition 1.5 โดยรูปแบบของคลื่นเสียงที่ได้ จะอยู่ในรูปของ Amplitude ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ ที่ระดับ Amplitude $\pm 20\%$ ถึง $\pm 30\%$ ลักษณะความถี่เสียงที่ใช้จะมีลักษณะต่อเนื่อง และลักษณะความถี่เสียงเป็นจังหวะที่ความเร็ว 100 ครั้งต่อนาที โดยที่ความถี่ต่ำจะมีลักษณะของความยาวคลื่นยาว ส่วนความถี่สูงจะมีลักษณะความยาวคลื่นสั้น โดยเรียงความถี่ที่มีลักษณะความยาวยาวมากไปน้อยดังนี้ 500 Hz, 1 kHz, 5 kHz และ 10 kHz ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าความถี่คลื่นและความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กันแบบผกผันคือ ความยาวคลื่นสั้นจะมีความถี่สูง (มาก) ส่วนคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาวจะมีความถี่ต่ำ (น้อย) และแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะคลื่นความถี่เสียงที่ใช้ในการทดลองดังภาพที่ 41 และ 42



ภาพที่ 41 ลักษณะความถี่เสียงดังแบบต่อเนื่อง (Continuous)

(ก) 500 Hz (ข) 1 kHz (ค) 5 kHz (ง) 10 kHz



ภาพที่ 42 ลักษณะความถี่เสียงดังแบบเป็นจังหวะที่ความเร็ว 100 ครั้งต่อนาที (Moderato)

(ก) 500 Hz (ข) 1 kHz (ค) 5 kHz (ง) 10 kHz

8. ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ต่อลักษณะของความถี่เสียง และความดังเสียงที่ใช้ในการทดลองกับอัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ

เมื่อนำผลการทดลองในข้อ 5, 6 และ 7 มาพิจารณารวมกัน จะสามารถอธิบายถึงความแตกต่างอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ต่อความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงที่ใช้ในการทดลอง จากรายงานของ Ying *et al.* (2009) กล่าวว่าในอัตราการเจริญเติบโตของจำนวนเซลล์แบคทีเรียนั้นมีการตอบสนองในรูปแบบที่แน่นอนเมื่อได้รับการบำบัดด้วยเสียง แต่อย่างไรก็ตามระดับของการตอบสนองของจำนวนเซลล์แบคทีเรียจะแตกต่างกันเมื่อได้รับความถี่เสียงที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นความเห็นที่สอดคล้องกับรายงานของนักวิจัยท่านอื่นๆ สอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้พบว่า อัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ในอาหาร NB มีการตอบสนองต่อความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงที่ใช้ในการทดลองในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียง และความดังเสียงคือ 500 Hz, 80 dB(C) พบว่า ส่งผลให้อัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) สูงที่สุด ซึ่งเป็นความถี่เสียงต่ำ มีลักษณะความยาวคลื่นมาก (2.20 feet) เมื่อเทียบกับความถี่เสียง 1kHz, 5 kHz และ 10 kHz และมีกำลังอัดเสียงเท่ากับ 29.0×10^{-6} เป็นระดับที่ปานกลาง เมื่อเทียบกับกำลังอัดเสียงที่ความดัง 60 และ 100 dB(C) ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มหรือลดความดังเสียงในการทดลองเป็น 100 และ 60 dB(C) ที่ความถี่เดียวกัน (500 Hz) จะพบว่า แบคทีเรียมีการตอบสนองที่ลดลงส่งผลให้อัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหาร (TOC และ COD) ลดลงตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ความดังเสียงสูงหรือต่ำเกินไปส่งผลให้แบคทีเรียสายพันธุ์นี้มีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหาร (TOC และ COD) ที่ลดต่ำลง

ส่วนลักษณะของเสียงที่ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะและการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* พบว่าความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ เป็นลักษณะที่มีการปล่อยคลื่นความถี่เสียงแบบ ดัง เจียบ ดัง เจียบ ดัง เจียบ สลับกันไปมา ซึ่งมีการกระแทกของความถี่เสียงดังที่ส่งออกมากระทบตัวเซลล์แบคทีเรียเป็นจังหวะด้วยความเร็วจังหวะเสียง 100 ครั้งต่อนาที โดยมีการเรียกเสียงที่มีความเร็วจังหวะนี้ว่า “Moderato” ความถี่เสียงลักษณะแบบนี้ เมื่อเทียบกับความรู้สึคนุษย์แล้ว จะให้ความรู้สึกเหมือนถูกกระตุกและผ่อนคลายเป็นครั้งๆ อยู่เรื่อยๆ ซึ่งจะทำให้เกิดการกระตุ้นอยู่ตลอดเวลา ขณะเดียวกัน

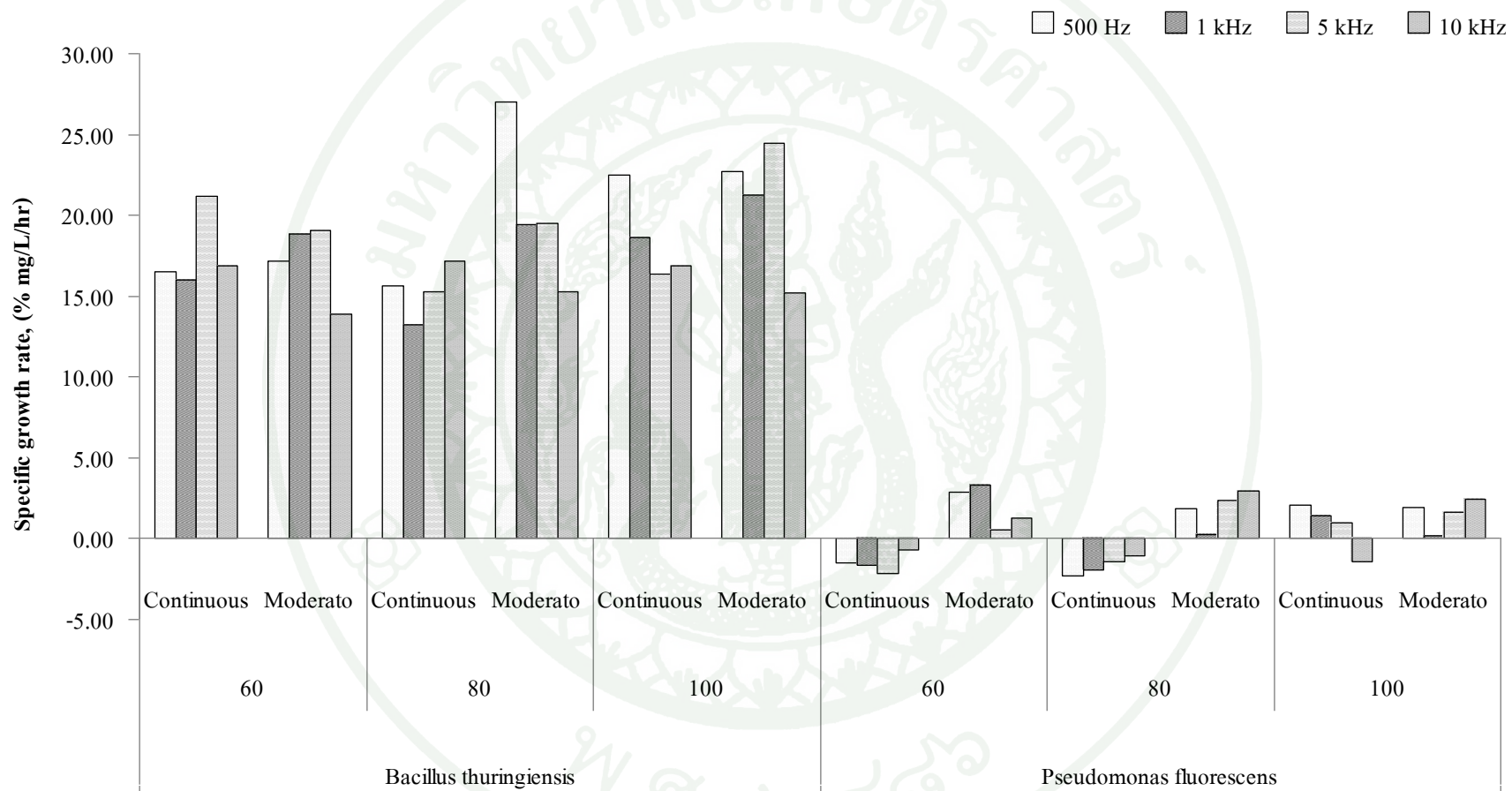
พบว่า แบคทีเรียสายพันธุ์นี้มีการตอบสนองที่ดีขึ้น โดยมีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อแบคทีเรียได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่อง เป็นลักษณะที่มีการปล่อยคลื่นความถี่เสียงแบบดังอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาไม่มีจังหวะหยุด เมื่อเทียบกับความรู้สึคนุษย์แล้ว จะให้ความรู้สึกเหมือนถูกรบกวน ซึ่งจะทำให้เกิดการรำคาญตลอดเวลา ขณะเดียวกันพบว่า แบคทีเรียสายพันธุ์นี้มีการตอบสนองได้น้อยกว่า โดยมีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ที่ต่ำลง

แบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียง และความดังเสียงคือ 1 kHz, 60 dB(C) พบว่า ส่งผลให้อัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) สูงที่สุด ซึ่งเป็นความถี่เสียงปานกลางลักษณะความยาวคลื่นปานกลางต่ำ (1.10 feet) เมื่อเทียบกับความถี่เสียง 500 Hz, 5 kHz และ 10 kHz และมีกำลังอัดเสียงเท่ากับ 29.0×10^{-7} เป็นระดับที่ต่ำ เมื่อเทียบกับกำลังอัดเสียงที่ความดัง 80 และ 100 dB(C) ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความดังเสียงในการทดลองเป็น 80 และ 100 dB(C) ที่ความถี่เดียวกัน (1 kHz) พบว่า แบคทีเรียมีการตอบสนองที่ลดลงส่งผลให้อัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารลดลง (TOC และ COD) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ความดังเสียงสูงขึ้นไปส่งผลให้แบคทีเรียสายพันธุ์นี้มีอัตราการใช้สารอาหารที่ลดต่ำลง

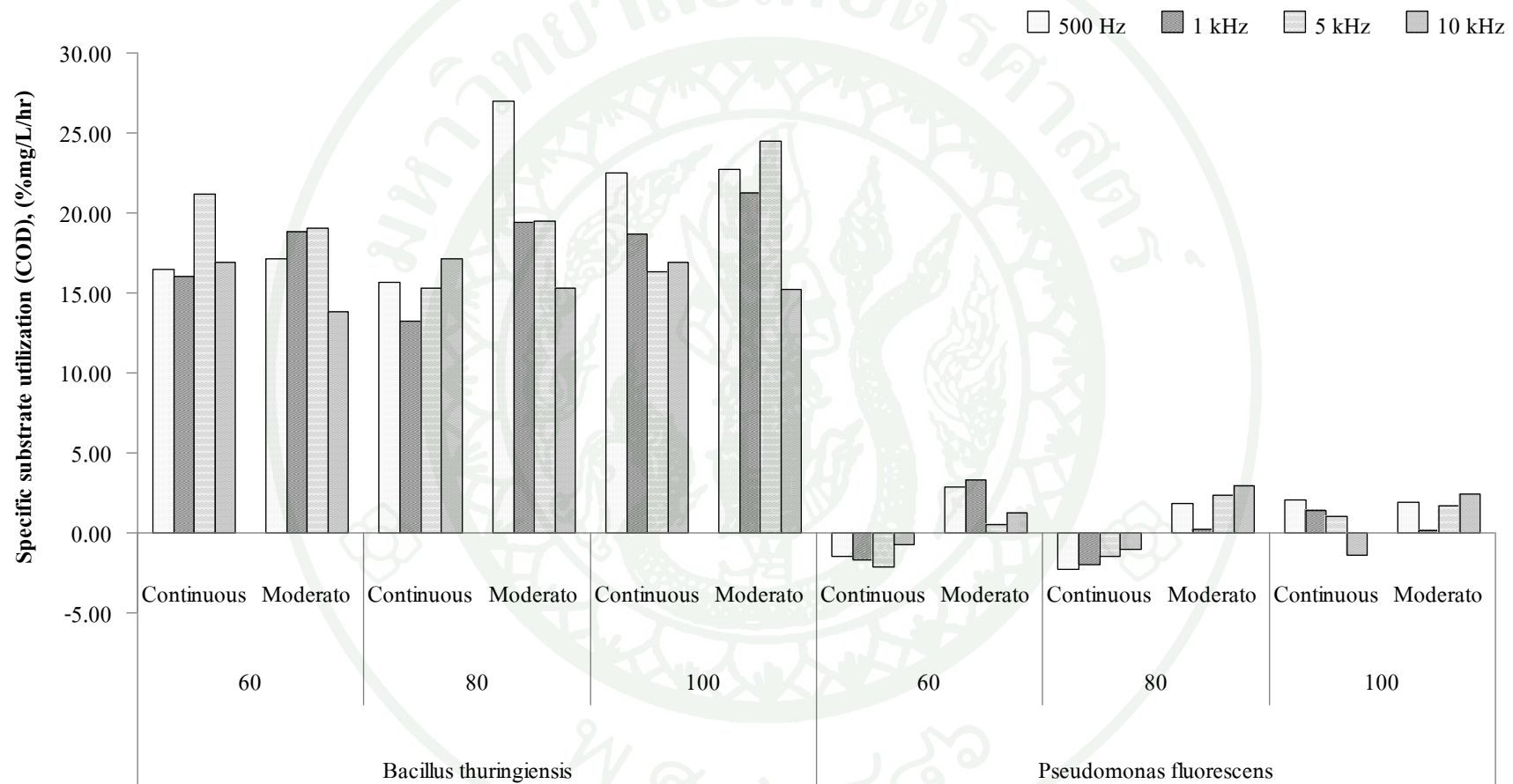
ส่วนลักษณะเสียงที่ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะและการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* ที่ความดังเสียง 60 dB(C) และ 80 dB(C) พบว่าความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ ส่งผลให้อัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) เพิ่มขึ้น และเมื่อแบคทีเรียได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่อง พบว่าแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มีการตอบสนองที่แย่ง โดยมีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) แสดงผลติดลบ แต่เมื่อความดังเสียงเพิ่มขึ้นเป็น 100 dB(C) พบว่า ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะและแบบต่อเนื่อง ส่งผลให้อัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) เพิ่มขึ้น เพียงแต่กลุ่มแบคทีเรียที่ได้รับ ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องจะมีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ลดลงเมื่อความถี่เสียงเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ

การพิจารณาเปรียบเทียบการตอบสนองของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ต่อความถี่เสียง และความดังเสียงที่แตกต่างกัน พบว่า อัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ที่สูงสุดของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* คือ ลักษณะเสียงดังเป็น

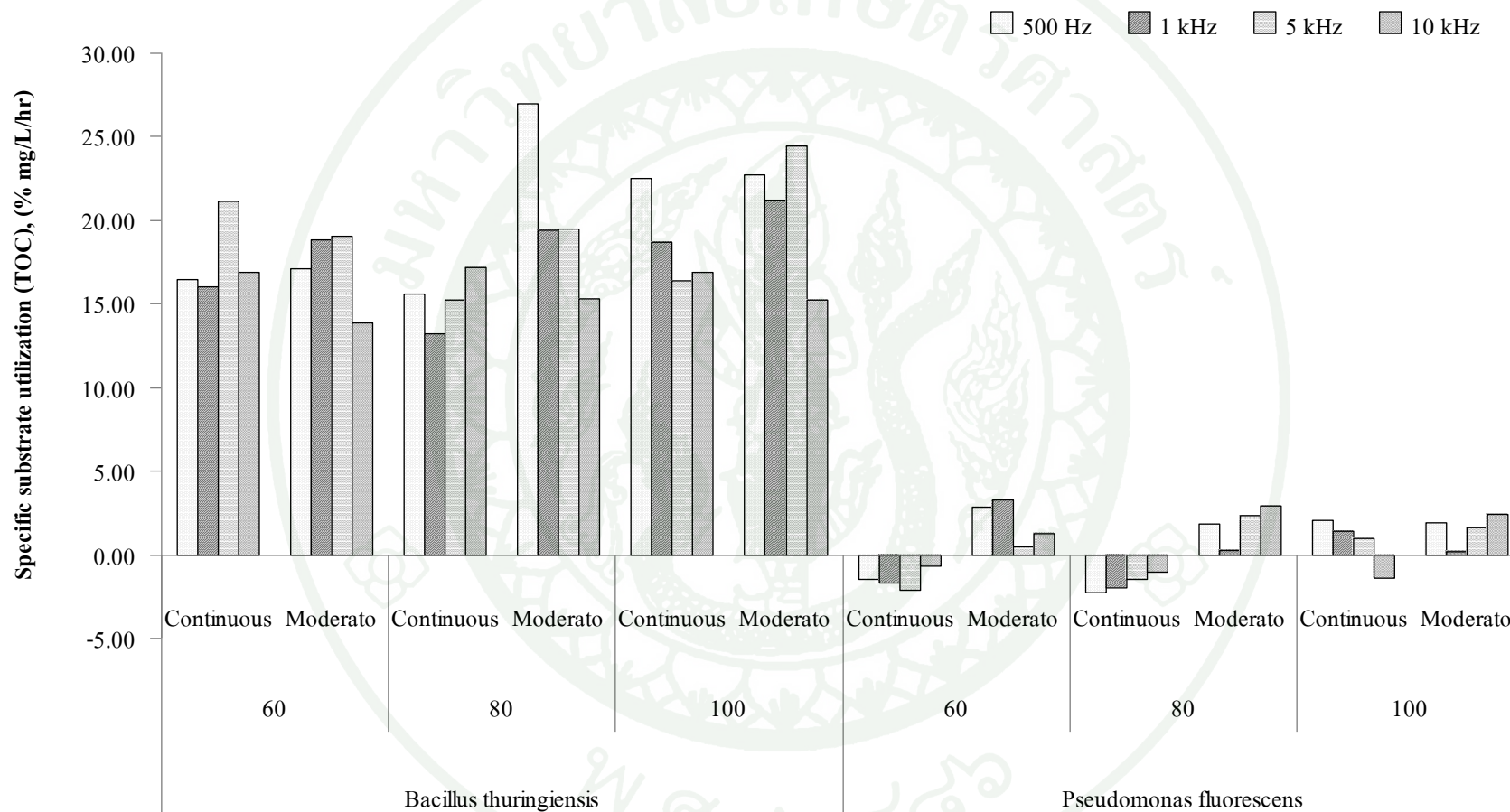
จังหวะที่ 500 Hz, 80 dB(C) (27.007%, 27.008% removal COD, 27.008% removal TOC) และแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* คือ ลักษณะเสียงดังเป็นจังหวะที่ 1 kHz, 60 dB(C) (3.281%, 3.281% removal COD, 3.281% removal TOC) เมื่อพิจารณาโครงสร้างของผนังเซลล์แบคทีเรียพบว่า แบคทีเรียแกรมบวกมีโครงสร้างผนังเซลล์เพียงชั้นเดียว (monolayer) องค์ประกอบของผนังเซลล์มีลิพิด (1-4%) และความต้านทานต่อการทำลายทางกายภาพดี ดังนั้นจึงตอบสนองต่อความถี่ต่ำ ระดับความยาวคลื่นมาก และกำลังอัดเสียงที่แรงได้มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบที่มีโครงสร้างผนังเซลล์ 3 ชั้น (Multilayer) และองค์ประกอบของผนังเซลล์มีลิพิด (11-22%) แต่ความต้านทานต่อการทำลายทางกายภาพน้อย จึงตอบสนองต่อความถี่สูง ระดับความยาวคลื่นน้อย และกำลังอัดเสียงที่ต่ำกว่าแบคทีเรียบวก แสดงผลดังภาพที่ 43, 44 และ 45



ภาพที่ 43 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมโดยรวมของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ



ภาพที่ 44 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง COD) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมโดยรวมของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ



ภาพที่ 45 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (อ้างอิง TOC) ของกลุ่มทดลองเทียบกับกลุ่มควบคุมโดยรวมของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ

วิจารณ์

จากผลการทดลองในการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า การตอบสนองของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ต่อความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียง มีลักษณะที่แตกต่างกัน พบว่า แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* มีการนำสารอาหารไปใช้เพื่อการเจริญหรือเพิ่มปริมาณของเซลล์ได้ดี ซึ่งตรงข้ามกับแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* กลับมีการนำสารอาหารไปใช้เพื่อการเจริญหรือเพิ่มปริมาณของเซลล์ได้น้อยกว่า เมื่อเทียบกับ แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* ซึ่งการตอบสนองของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่แตกต่างกัน เป็นผลจากความแตกต่างกันของลักษณะบางประการของแบคทีเรีย ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* มีขนาดของเซลล์ (1.0-1.2×3.0-4.5 μm) ถือว่ามีขนาดใหญ่ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวรับสัมผัสได้มากกับความถี่เสียงได้มากกว่า ส่วนแบคทีเรียแกรมลบ *Pseudomonas fluorescens* มีขนาดเซลล์เพียง (0.5-1×1.5-5 μm) ถือว่ามีขนาดเล็กกว่า และทำให้มีพื้นที่ผิวรับสัมผัสกับความถี่เสียงได้น้อยลง ส่วนโครงสร้างผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกมีเพียงชั้นเดียว (Monolayer) หนา 15-80 นาโนเมตร จึงทำให้องค์ประกอบเสียงต่างๆ ผ่านเข้าไปทำลายเพื่อทำลายองค์ประกอบภายในเซลล์ได้ยาก ส่วนโครงสร้างผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบมี 3 ชั้น (Mutilayer) แต่หนาเพียง 10-15 นาโนเมตร เป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของเสียงสามารถที่จะทะลุผ่านส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบภายในเซลล์ได้ง่าย และองค์ประกอบผนังเซลล์ที่แตกต่างกันของแบคทีเรียแกรมบวกพบว่า มีโปรตีนเพปติโดไกลแคนมากกว่า 50% ของน้ำหนักแห้ง ส่วนแบคทีเรียแกรมลบพบเพียง 10% ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งความแตกต่างของปริมาณโปรตีนนี้มีผลต่อการตอบสนองของแบคทีเรียภายใต้สภาวะเสียงต่างๆ ทางด้านกายภาพได้เช่นกัน

สอดคล้องกับสุรวีทย์ (2545) กล่าวว่า การตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมของแบคทีเรียที่อยู่ตามธรรมชาติมักประสบปัญหาสภาวะสิ่งแวดล้อมและแหล่งอาหารมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องตอบสนองและมีการปรับตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงนั้น การตอบสนองดังกล่าวของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับโปรตีนชนิดพิเศษที่อยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม โปรตีนเหล่านี้ฝังตัวทะลุผ่านชั้นของเยื่อหุ้มเซลล์ ดังนั้นปลายด้านหนึ่งจะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ขณะที่ปลายด้านตรงข้ามสัมผัสกับไซโทพลาสซึมภายในเซลล์ ส่วนโปรตีนที่อยู่ในเพอริพลาซซึม (Periplasm: บริเวณระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์กับเยื่อหุ้มด้านนอกของแบคทีเรียแกรมลบ ส่วนแบคทีเรียแกรมบวกเป็นบริเวณระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์) คือ ตัวรับทางเคมี (Chemoreceptor) ทำหน้าที่จดจำและยึดติดกับสารเคมีในสิ่งแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นสัญญาณทางโมเลกุล (Molecular signal) และมีความจำเพาะต่อกัน การจับกันของ

สัญญาณโมเลกุลกับโปรตีนมีผลทำให้โปรตีนเชื่อมที่อยู่อันในเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงแล้ว กระตุ้นโมเลกุลอื่นๆ ต่อไป จนแพร่เข้าสู่ไซโทพลาสซึมและกระตุ้นเซลล์ ดังนั้นเมื่อปริมาณโปรตีนที่มีมากกว่าในเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกจึงตอบสนองกับลักษณะทางกายภาพด้านเสียงได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบที่มีปริมาณโปรตีนในปริมาณที่ต่ำกว่า อีกทั้งแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* สามารถสร้างสปอร์ จึงส่งผลให้มีความทนทานต่อการทำลายทางกายภาพได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ *Pseudomonas fluorescens* ที่ไม่สามารถสร้างสปอร์และมีความทนทานต่อการทำลายทางกายภาพได้น้อย ส่งผลให้สอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* มีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหาร (อ้างอิง COD และ TOC) ที่มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ *Pseudomonas fluorescens*

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียง ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบที่ใช้ในการทดลอง แต่มีผลต่อการเพิ่มและลดอัตราการโตจำเพาะ อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของแบคทีเรียใช้อากาศทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยลักษณะของเสียง 2 แบบ (ลักษณะเสียงดังแบบต่อเนื่อง และลักษณะเสียงดังแบบจังหวะที่ความเร็ว 100 ครั้งต่อนาที หรือที่เรียกว่า Moderato) พบว่า แกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ความดังเสียง 60, 80 และ 100 dB(C) พบว่าแบคทีเรียมีการนำสารอาหารไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยเมื่อมีการใช้สารอาหารในปริมาณที่มาก อัตราการเจริญเติบโตก็จะเพิ่มขึ้นตามกัน ส่งผลต่ออัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) เพิ่มขึ้นตามกัน และพบว่าที่ความถี่เสียง 500 Hz ความดังระดับ 80 dB(C) และลักษณะเสียงดังแบบเป็นจังหวะนั้น ทำให้แบคทีเรียมีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) สูงที่สุดคิดเป็น 27.007% ส่วนแบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* เมื่อได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะที่ความดังระดับ 60 และ 80 dB(C) พบว่ามีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเป็นไปในทิศทางที่เป็นบวก ที่แสดงถึงอัตราการเจริญเติบโตมีมากขึ้นหรือเพิ่มขึ้น และพบว่าที่ความถี่เสียง 1 kHz ระดับความดังเสียง 60 dB(C) นั้น แบคทีเรียมีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) สูงที่สุดคิดเป็น 3.281% แต่เมื่อแบคทีเรียได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องที่ระดับเดียวกัน พบว่ามีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะเป็นไปในทิศทางเป็นลบ ที่แสดงถึงอัตราการเจริญเติบโตที่ถูกยับยั้งหรือแย่งลง ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความดังเสียงเป็น 100 dB(C) กลับพบว่าแบคทีเรียมีอัตราการโตจำเพาะ และการใช้สารอาหารจำเพาะเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้นทั้งความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ เพียงแต่กลุ่มแบคทีเรียที่ได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องจะมีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารลดลงเมื่อความถี่เสียงเพิ่มสูง (TOC และ COD) ขึ้นตามลำดับ

2. อัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ มีการตอบสนองต่อความถี่เสียง ระดับความดัง และลักษณะเสียงที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่งการตอบสนองที่แตกต่างกันของแบคทีเรียเกิดจากความแตกต่างของลักษณะบางประการของแบคทีเรีย เช่น โครงสร้างผนังเซลล์ องค์ประกอบของผนังเซลล์ ปริมาณ

โปรตีนในองค์ประกอบภายในเยื่อหุ้มเซลล์ ความสามารถในการสร้างสปอร์ และความต้านทานต่อการทำลายทางกายภาพ ส่งผลให้แบคทีเรียเลือกที่จะตอบสนองต่อความถี่เสียง ความดัง และลักษณะของเสียงอื่นๆ ด้วย

3. ลักษณะของเสียงที่แตกต่างกันสามารถเพิ่มอัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของกลุ่มแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ได้แตกต่างกันคือ กลุ่มแบคทีเรียเมื่อได้รับความถี่เสียงที่มีลักษณะดังแบบเป็นจังหวะส่งผลให้กลุ่มแบคทีเรียมีอัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะมากกว่าความถี่เสียงที่มีลักษณะดังแบบต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของศุภพจิ (2553) กล่าวว่าลักษณะของคลื่นเสียงที่สามารถเพิ่มอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของกลุ่มแบคทีเรียใช้อากาศจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ดีที่สุด จะต้องประกอบไปด้วยคุณสมบัติของคลื่นเสียงหลายๆ อย่างรวมกัน เรียงลำดับความสำคัญได้ดังนี้ ความหลากหลายของลักษณะคลื่นเสียงโดยรวม ความถี่สลับขึ้นลงของ Amplitude ความชัดเจนของช่วง Amplitude สูงและต่ำ และความสูงเฉลี่ยของ Amplitude เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองโดยใช้ความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะ ซึ่งมีลักษณะของเสียงมี Amplitude หลายหลาย ซึ่งต่างกับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องที่มีลักษณะคงที่ จึงทำให้แบคทีเรียกลุ่มที่ได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะมีอัตราการโตจำเพาะและอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะมากกว่าแบคทีเรียกลุ่มที่ได้ความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่อง

4. ระดับความดังที่แตกต่างกันในการทดลองครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าไม่เพียงแต่ความถี่เสียง และลักษณะของเสียงเท่านั้นที่จะส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (TOC และ COD) ของกลุ่มแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ แต่ความดังเสียงแตกต่างกันก็ส่งผลต่อกลุ่มแบคทีเรียได้แตกต่างเช่นกัน โดยกลุ่มแบคทีเรียแกรมบวกตอบสนองต่อความดังเสียงที่สูงกว่าแบคทีเรียแกรมลบ ที่ลักษณะเสียงดังแบบเดียวกัน

5. ช่วงความถี่ที่มนุษย์ได้ยินในระดับปกติ นั้น มีผลต่อการเจริญและการใช้สารอาหารของกลุ่มแบคทีเรียใช้อากาศแกรมบวกและแกรมลบไม่เพียงแต่กระตุ้น แต่สามารถที่จะยับยั้งหรือชะลอการเจริญและการใช้สารอาหารของกลุ่มแบคทีเรียได้เช่นกัน

6. ความรู้สึกของมนุษย์กับระดับเสียงที่ได้ยินที่ระดับ 60 dB เป็นเสียงสนทนาทั่วไป ผลการรับฟังในระดับปานกลาง และ 80 dB เป็นเสียงจราจรปกติ ผลการรับฟังในระดับที่ดัง แต่สามารถที่จะปฏิบัติงานได้ตามปกติ ขณะที่ระดับ 100 dB เป็นเสียงลักษณะของเครื่องเสียงสเตอริโอในห้อง หรือเสียงของเครื่องเจาะถนนแบบอัดลม ที่ทำให้การได้ยินของมนุษย์เสื่อมอย่างถาวร

ส่งผลให้ความสามารถของมนุษย์ลดลง แต่ในการทดลองกับแบคทีเรียพบว่า กลุ่มแบคทีเรียเมื่อได้รับความถี่เสียงดังเป็นจังหวะและต่อเนื่องที่ระดับ 100 dB(C) ยังมีการใช้สารอาหารและมีการเจริญเติบโต พิจารณาจากอัตราการโตจำเพาะที่เพิ่มขึ้น และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะที่หายไป ดังนั้นความถี่เสียงจากความรู้สึกได้ยินของมนุษย์ว่าดังมากดังน้อยแล้วทำให้การได้ยินของมนุษย์เสื่อมลงหรือส่งผลให้การทำงานของมนุษย์เสื่อมลงนั้นไม่ได้ มีความสัมพันธ์หรือสอดคล้องกับการเจริญเติบโต การขยายพันธุ์ของแบคทีเรียจากการทดลองในครั้งนี้

7. การใช้สารอาหารและการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรียใช้อากาศแถมบวกและแถมลบจะเกิดขึ้นได้ดี ไม่เพียงความถี่เสียงที่มีผลกระทบต่อกลุ่มแบคทีเรียเท่านั้น แต่ระดับความถี่ และลักษณะเสียงก็มีผลกระทบต่อกลุ่มแบคทีเรียเช่นกัน

ข้อเสนอแนะ

1. ระบบการทดลองแบบเบตซ์ในงานวิจัยนี้เดินระบบเพียง 4 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่อยู่ในช่วงสภาวะ Steady State ซึ่งเป็นช่วงที่จุลชีพเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว โดยความหนาแน่นเซลล์และความเข้มข้นของตะกอนคงที่ เป็นช่วงที่สำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียในระบบ แต่ผลกระทบของความถี่และความถี่เสี่ยง อาจจะส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียตั้งแต่ระยะการเจริญเติบโตในช่วงแรก หรือยังสามารถส่งผลกระทบหลังจากช่วงสภาวะ Steady State ได้เช่นกัน จึงอาจทำการศึกษาเป็นระบบการทดลองแบบต่อเนื่อง หรือเก็บตัวอย่างตลอดระยะเวลาการเดินระบบของการเจริญเติบโต (Growth Curve) ของจุลชีพ เพื่อจะได้ทราบช่วงเวลาของผลกระทบที่แท้จริงต่อจุลชีพ ซึ่งอาจจะทำให้เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพ อัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะได้ชัดเจน

2. ในกรณีศึกษา นี้ ทำการศึกษาเฉพาะแบคทีเรียสายพันธุ์เกรมบวกและเกรมลบใช้อากาศสายพันธุ์บริสุทธิ์ ที่ทำการคัดเลือกจากกลุ่มแบคทีเรียที่พบมากที่สุดเพื่อเป็นตัวแทนในการทดลองครั้ง ซึ่งในการคัดเลือกตัวอย่างที่นำมาทำการทดลองอาจไม่ใช่ตัวแทนที่ดีที่สุด ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ดังนั้นในการศึกษาทดลองต่อไปควรที่จะศึกษาหลายๆ สายพันธุ์เพื่อยืนยันผลการทดลองว่าแบคทีเรียมีการตอบสนองต่อความถี่และความถี่เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร และควรขยายวงกว้างออกไปในกลุ่มจุลชีพอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ในเชิงวิศวกรรมหรืออุตสาหกรรม เช่น การศึกษาในกลุ่มของสาหร่าย รา ยีสต์ หรือแม้กระทั่งแบคทีเรียกลุ่มไมโครออสโมฟิล และกลุ่มที่ทนทานต่อสภาวะต่างๆ เป็นต้น

3. การออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Treatment Process) หรือเรียกเป็นการบำบัดขั้นทุติยภูมิ (Secondary Treatment Process) ด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน ในภาพรวมของการพิจารณาออกแบบควรพิจารณาปัจจัยหลักๆ ดังนี้ คือ ชนิดของรูปแบบถังเดิมอากาศ เกณฑ์ค่าการออกแบบ ปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้น ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการ ปริมาณสารอาหารที่ต้องการ ระบบควบคุมสลัดจ์ชนิดเส้น และคุณภาพน้ำทิ้ง ส่วนการพิจารณาออกแบบในเชิงกายภาพควรพิจารณาปัจจัยหลักๆ ดังนี้ คือ ระบบเดิมอากาศแบบฟลู ระบบเดิมอากาศแบบกล ระบบเดิมอากาศอื่นๆ ถังเดิมอากาศและส่วนประกอบอื่นๆ และระบบแยกตะกอนแขวนลอย (เกรียงศักดิ์, 2547) แต่ในการควบคุมระบบจริงเมื่ออยู่ในพื้นที่ต่างกัน วันที่เริ่มการเดินระบบต่างกัน หรืออื่นๆ ทั้งๆ ที่ปัจจัยทุกด้านในการควบคุมระบบเหมือนกัน แต่ก็ยังประสบปัญหาในการควบคุมระบบได้ไม่เหมือนกับอีกที่หนึ่ง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของ

ความถี่เสียงต่อการดำรงชีพของแบคทีเรีย พบว่า ความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงที่ใช้ในการทดลองนั้น ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้จริง หากในการปฏิบัติจริงแล้วจะพบว่าสภาวะแวดล้อมของระบบบำบัดน้ำเสียนั้นถูกแวดล้อมด้วยคลื่นความถี่ต่างๆ ร่ายล้อมอยู่ทั่วไป เช่น ความถี่เสียงและความดังเสียงจากปั้มน้ำ เครื่องเติมอากาศ และเครื่องมือกลอื่นๆ ในระบบบำบัดน้ำเสีย ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ หากพิจารณาแล้วเครื่องมือเหล่านี้ล้วนแล้วสามารถที่จะปล่อยความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงต่างๆ จากการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์ภายในของตัวมันเองได้ตรงกับการตอบสนองของแบคทีเรียในระบบก็จะส่งผลได้ทั้งในแง่ดีและแง่ลบ กรณีที่เป็นคลื่นความถี่เสียงที่แบคทีเรียตอบสนองได้ดีก็จะส่งผลให้แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดี ทำให้สามารถควบคุมระบบได้ง่าย แต่ถ้าในกรณีเป็นคลื่นความถี่เสียงที่แบคทีเรียตอบสนองได้ไม่ดี ก็จะส่งผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ทำให้เดินระบบไม่ได้ตามเกณฑ์หรืออาจร้ายแรงถึงระดับระบบการออกแบบล้มเหลวหรือเดินระบบไม่ได้ก็เป็นได้ ดังนั้นจากผลการศึกษาค้นคว้าจึงสามารถนำไปเป็นข้อมูลอีกหนึ่งปัจจัยในการพิจารณาในการออกแบบระบบ หรือในการควบคุมระบบบำบัดได้

4. เนื่องจากการศึกษาค้นคว้าได้กำหนดเลือกใช้คลื่นความถี่เสียงจากตารางช่วงความถี่เสียงต่างๆ ซึ่งความถี่เสียงที่คัดเลือกมาใช้ในการทดลองอาจไม่ใช่ช่วงความถี่เสียงที่เกิดขึ้นในระบบการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นในการศึกษาทดลองต่อไปควรที่จะศึกษาความถี่เสียงที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดจริงก่อนที่ทำการทดลอง และจุลชีพที่เลือกใช้ก็ควรที่จะได้จากระบบบำบัดน้ำเสียจริงๆ เพื่อจะสามารถนำผลการทดลองที่ได้กลับไปใช้ได้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นๆ

5. การศึกษาผลกระทบของความถี่เสียงต่อการดำรงชีพของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ พบว่าอัตราการโตจำเพาะ และอัตราการใช้อาหารจำเพาะของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ มีการตอบสนองต่อความถี่เสียงลักษณะดังแบบเป็นจังหวะได้ดี แต่กลับตอบสนองต่อลักษณะความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่องไปในทิศทางที่แยกลง ถ้าจะมีการนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมการบำบัดน้ำเสียโดยการใช้จุลชีพใช้อาหารในการบำบัดน้ำเสีย การหมักขยะเพื่อผลิตไบโอแก๊ส เป็นต้น ควรที่จะเลือกใช้ความถี่เสียง ความดังเสียง และลักษณะของเสียงที่มีลักษณะเป็นจังหวะจึงจะส่งผลต่อการดำรงชีพที่ดีขึ้นไปใช้ประโยชน์ แต่ขณะเดียวกันหากต้องการกำจัดหรือยับยั้งไม่ให้แบคทีเรียต้องการเจริญเติบโต หรือแพร่ขยายพันธุ์ ในงานด้านอุตสาหกรรมที่มีการใช้ประโยชน์จากจุลชีพ เช่น อุตสาหกรรมทำนมเปรี้ยว อุตสาหกรรมอาหารหมักดอง โรงงานผลิตไวน์ เป็นต้น ด้านการแพทย์ เช่น กำจัดจุลชีพที่ติดมากับผ้าปูเตียง ปลอกหมอน เสื้อผ้าของผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล หรือด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ควรที่จะเลือกใช้ความถี่เสียง

ความดังเสียง และลักษณะของเสียงที่ส่งผลต่อการดำรงชีพที่แย่งหรือยับยั้งไปใช้ประโยชน์ในแต่
 ละความต้องการของสายงานนั้นๆ ซึ่งข้อดีของการใช้คลื่นความถี่เสียงมาช่วยเพิ่มหรือลดประสิทธิ
 ภาพคือ เป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก และไม่มีการใช้สารเคมีใดๆ ที่จะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหรือมนุษย์
 แต่อาจมีข้อเสียตรงที่คลื่นความถี่เสียงเป็นคลื่นที่มนุษย์รับรู้ได้ อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อประสาท
 ระบบการได้ยินของมนุษย์ จึงควรที่จะใช้ในสภาวะที่ปิดมิดชิดไว้การรบกวนออกมาภายนอก



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2547. **วิศวกรรมกรรมการจัดน้ำเสีย เล่ม 4**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ เอส. อาร์. พรินติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด, นนทบุรี.

คมสันต์ วงศ์วรรณ. 2551. **ดนตรีตะวันตก**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

จรรยา จันทน์ไฟแสง, ยุพา มงคลสุข, สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์ และ ประสิทธิ์ ศิวฒนาวงศ์. 2547.

เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ: โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีการใช้แบคทีเรียบีทีจากงานวิจัยสู่เกษตรกร. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ฉัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์. 2548. **การใช้ SPSS เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล**. แหล่งที่มา :

<http://www.watpon.com/spss>, 3 มีนาคม 2551.

นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และ ปรีชา สุวรรณพินิจ. 2552. **จุลชีววิทยาทั่วไป**. พิมพ์ครั้งที่ 7. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พรทิพา นวกิจกุล. 2536. **แบคทีเรียวิทยาทางสัตวแพทย์: แบคทีเรียชนิดแกรมบวก**. พิมพ์ครั้งที่ 1.

ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พรทิพย์ ศรีแดง. 2551. **ชีววิทยา และจุลชีววิทยาเบื้องต้นสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม**. พิมพ์ครั้งที่

1. เทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

พิชัย ปมาณิกบุตร. 2552. **เสียงจราจรและการสร้างแบบจำลองของเสียงจราจร Traffic Noise and**

Modeling of Traffic Noise. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ เม็ดทรายพรินติ้ง, กรุงเทพฯ.

ภัทรชัย กิรติสิน. 2549. ตำราวิทยาแบคทีเรียการแพทย์ **Textbook of Medical Bacteriology**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ วีเจ พรินต์ติ้ง, กรุงเทพฯ.

มันสิน ต้นทุลเวศน์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ราพีง มังคละสวัสดิ์. 2530. วิศวกรรมระบบเสียง **Audio Engineering**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

สมบุญ ชนาสุกวัฒน์. 2553. เทคนิคการเก็บรักษาจุลินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สมพงษ์ ใจดี. 2547. ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สมรภัทร เลิรน์นิง. 2552. เขียนเครื่องเสียง. สามัญสมรภัทรเลิรน์นิง, กรุงเทพฯ.

สรชัย พิศาลบุตร. 2553. สถิติวิศวกรรม **Engineering Statistics**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์วิทย์พัฒน์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

สาวิตรี วัทธัญไพศาล. 2552. จุลชีววิทยาเบื้องต้น (**Introductory Microbiology**). พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ มิเตอร์ก๊อปปี (ประเทศไทย), กรุงเทพฯ.

สุรวีทย์ สิมะรักษ์อำไพ. 2545. วิทยาแบคทีเรีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏสุรินทร์, สุรินทร์.

สุเทพ สิริวิทย์ปากรณ์. 2551. เทคโนโลยีน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2551. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 19. สำนักพิมพ์
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ศุภพจี พรพงษ์เมตตา. 2553. ผลกระทบของเสียงเพลงต่อการใช้อาหารของจุลชีพ: กรณีศึกษา
กลุ่มแบคทีเรียใช้อากาศจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุเทน พรหมแดง. 2551. **Adobe Audition** เหนือชั้นทุกงานเสียง. สำนักพิมพ์วิดีทัศน์, กรุงเทพฯ.

Atequip. 2007. **Calibrator**. EXTECH Sound Level Meters & Calibrators. Available Source:
<http://www.atequip.com>, January 13, 2011.

Antony, G., F. 2001. Bio Fungicides. **The Grama Karshaka Fertilizer Company Pvt Ltd**.
Available Source: <http://www.college.ucla.edu/webproject/>. June 13, 2011.

Beranek, L.L. and I.L. Ver. 1992. **Noise and Vibration Control Engineering**, John Wiley and
Sons, New York.

Bitton, G. 1994. **Wastewater Microbiology**, 2nd ed. John Wiley and Sons Publication, New York.

Bochu, W., S. Jiping, L. Biao, L. Jie and D. Chuanren. 2004. Sound wave stimulation triggers the
content change of the endogenous hormone of the Chrysanthemum mature callus.

Colloids and Surfaces B: Biointerface, 37 (3-4): 107-112.

Christian, L. 2002. **Vorfluter. Der Vorfluter unter dem Mikroskop.** Available Source:

<http://www.mikroskopie.de/schlamm/rehbach.htm>. June 9, 2010.

Cowan, J.P. 1994. **Handbook of Environmental Acoustics**, Van Nostrand Reinhold, New York.

Cunniff, P.F. 1977. **Environmental Noise Pollution**, John Wiley and Sons Publication, New York.

Everest, F. A. 2001. **The Master Handbook of Acoustics**. 4th Ed., McGraw-Hill. New York.

Foreman, J.E.K. 1990. **Sound Analysis and Noise Control**, Van Nostrand Reinhold, New York.

GeoNoise-Instruments Thailand. 2006. **Wind Screen**. Available Source: <http://www.geonoise-instruments.com>, January 13, 2011.

George H. 2008. **Sound Water Practices Ultrasonic Technology Controls Aglae and Biofilm**.

Available Source: <http://www.algaecontrol.us>, June 29, 2010.

Hassall J.R. and K. Zaveri. 1988. **Acoustics Noise Measurements**. 5th ed. Bruel & Kjaer, Denmark.

Hickling, R. 1988. **Handbook of Acoustics**, John Wiley and Sons Publication, New York.

Hiraish, A., Y. Ueda., and J. Ishihara. 1998. Quinone profiling of bacterial communities in natural and synthetic sewage activated sludge for enhanced phosphate removal. **Appl. Environ. Microbiol.** 64: 992-998.

Jenkins, D., M. G. Richard and G. T. Daigger. 1993. **Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming**, 2nd ed. Boca Ration: Lewis Publishers.

Jiping, S., W. Bochu, L. Meisheng, Z. Hongyang, C. Xin and D. Chuanren. 2003. Optimal designs for sound wave stimulation on the growth conditions of Chrysanthemum callus. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, 30 (1-2): 93-98.

Joyce, E., S.S. Phull, J.P. Lorimer and T.J. Mason. 2003. The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured *Bacillus* species. **Ultrasonic Sonochemistry**. 10: 315-318.

Karippen, P., J. Dayou and C. Phin. 2009. Experimental Investigation on the Effects of Audible Sound to the Growth of *Aspergillus* Spp. **Modern Applied Science**. 3(4): 137-141.

Mckane, M., L. Larry and J. Kandel. 1996. **Microbiology: Essentials and Applications**. McGraw-Hill Inc., New York.

Metcalf & Eddy, Inc. 2004. **Wastewater Engineering: Treament, and Reuse**. 4th ed. International Edition. McGraw-Hill Inc., Singapore.

Napavelly College. 2010. ***Pseudomonas fluorescens*-Gram stain**. Available Soure: [http://www.napavalley.edu/people/srose/PublishingImages/Pseudomonas%20fluorescens%20\(Gram%20stain\).jpg](http://www.napavalley.edu/people/srose/PublishingImages/Pseudomonas%20fluorescens%20(Gram%20stain).jpg). Febuary 2, 2011.

Peterson, A. and E. Gross. 1967. **Handbook of Noise Control, West Concord**. General Radio Company.

Piyasena, P., E. Mohareb and R.C. McKellar. 2003. Inactivation of microbes using ultrasound: A review. **International Journal of Food Microbiology**, 87(3): 207-216.

Raman Spectroscopy Research group, Department of Analytical Chemistry, Ghent University.

2010. **Bacterial Identification**. Available Source:

http://www.analchem.ugent.be/Raman/Html/bacterial_identification.php, January 14, 2010.

Romney, H., J. Cassandra and Y. Raymond. 2010. **Gram stain of *Bacillus thuringiensis* cells**.

Photomicrographs from Biology 3400 Laboratory Exercise 3. Available Source:

<http://people.uleth.ca/~selibl/Biol3200/Morphology04/Exer304.html>. June 14, 2011.

Smith, B.J., R.J. Peters and S. Owen. 1982. **Acoustics and Noise Control**, Longman, London, U.K.

Spicer, W. J. 2000. **Clinical bacteriology, mycology and parasitology: an illustrated colour text / W. John Spicer ; illustrated by Peter Lamb**. Harcourt Publishers Limited, China.

Talaro, K. P. and A. Talaro. 1999. **Fundamentals in microbiology**, 4th ed. Bonton: WCB McGraw-Hill, New York.

Team Tech Instruments 2008. **Sound Level meter**. Available Source:

<http://www.teamtech.com.sg/onosokki/LA-2560.htm>, January 13, 2011.

Wu, W., J. Hu., X. Gu and Y. Zang. 1987. Cultivation of anaerobic granular sludge with aerobic activated sludge as seed. **Water Res.** 21: 789-799.

Yi, J., W. Bochu, W. Xiujuan, W. Daohong, D. Chuanren, Y. Toyama and A. Sakanishi. 2003.

Effect of sound wave on the metabolism of chrysanthemum roots. **Colloids and**

Surfaces B: Biointerface, 29 (2-3): 115-118.

Ying, J., J. Dayou and C. Phin. 2009. Experimental Investigation on the Effects of Audible Sound

to the Growth of *Escherichia coli*. **Modern Applied Science** 3: 124-127

Young, H. D. and A. Freedman. 1996. **Extended Version with Modern Physics: University**

Physics. 9th ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., United States.

Zhang, G., P. Zhang, J. Gao and Y Chen. 2007. Using acoustic cavitation to improve the

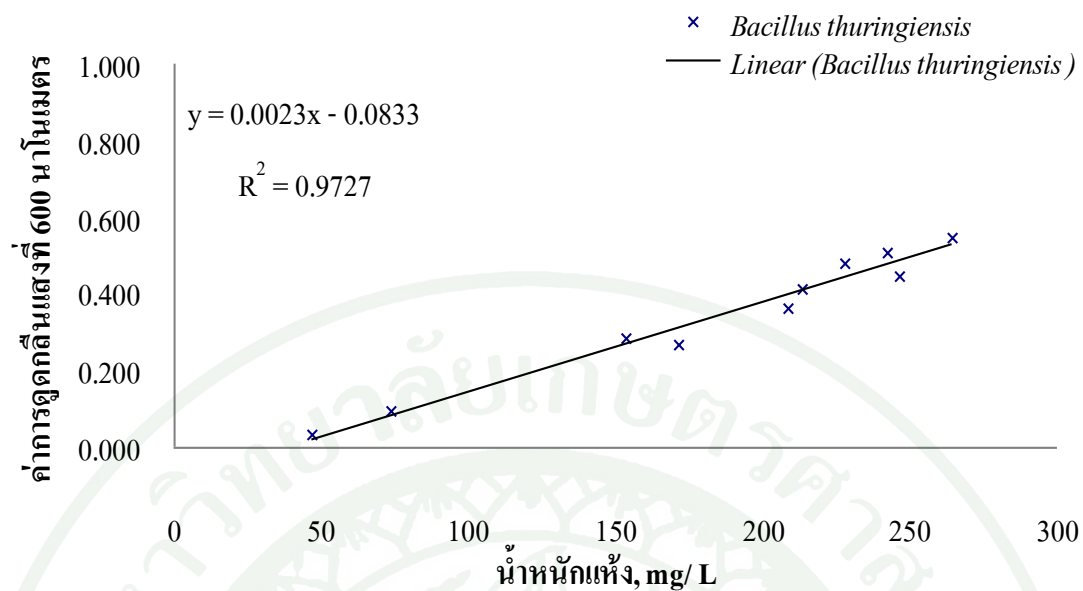
bioactivity of activated sludge. **Bioresoure Technology** 99 (2008): 1497-1502.



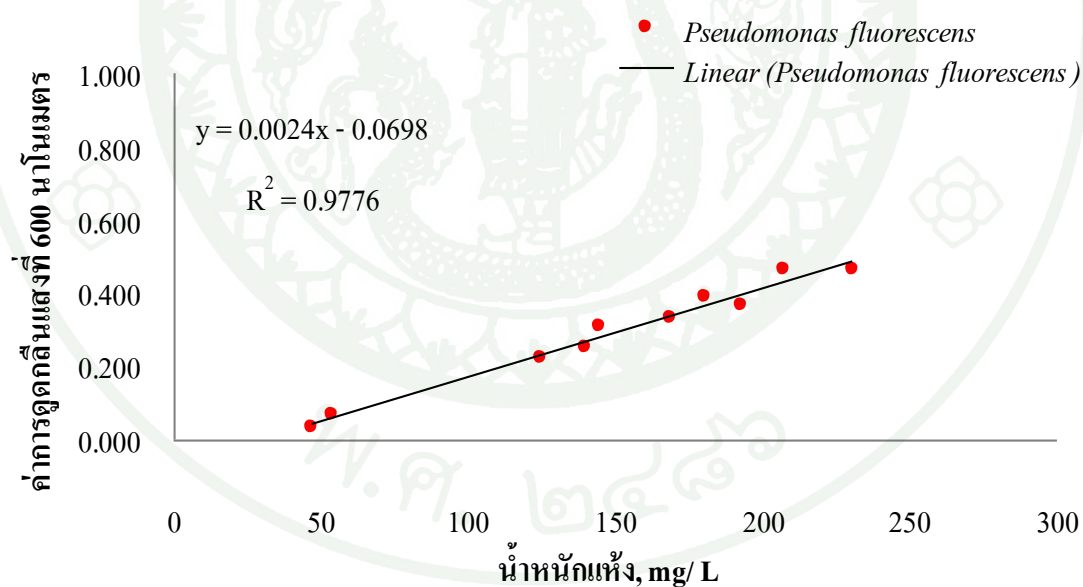


ภาคผนวก ก

การเจริญและการใช้สารอาหารของกลุ่มแบคทีเรียแกรมบวก
และแบคทีเรียแกรมลบ

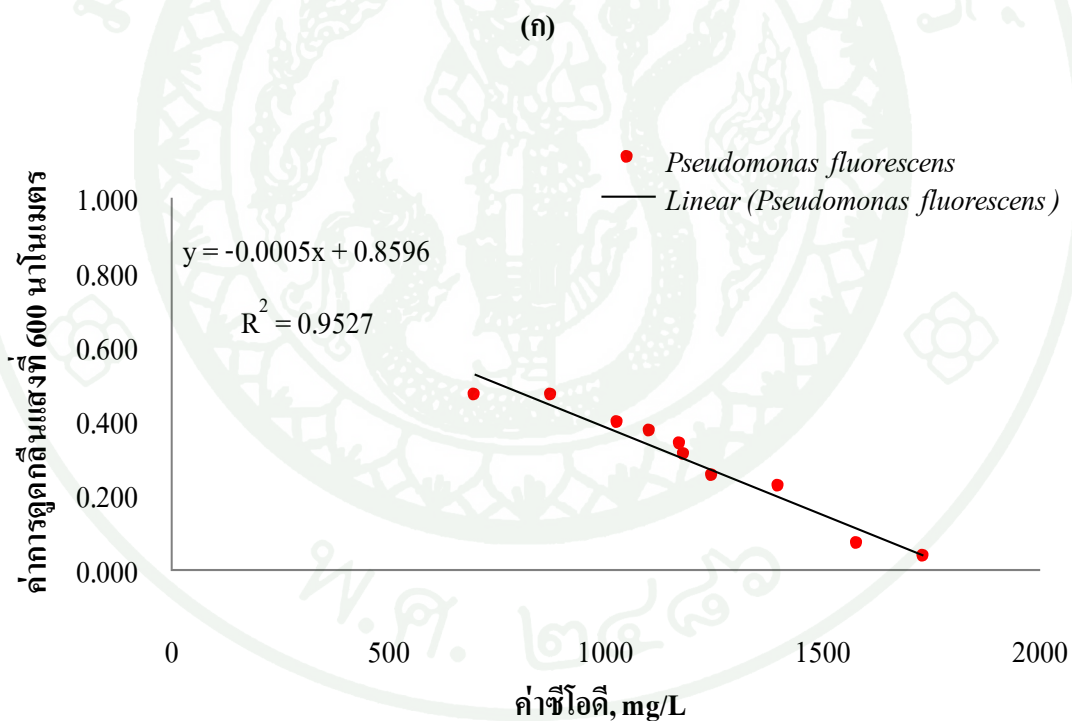
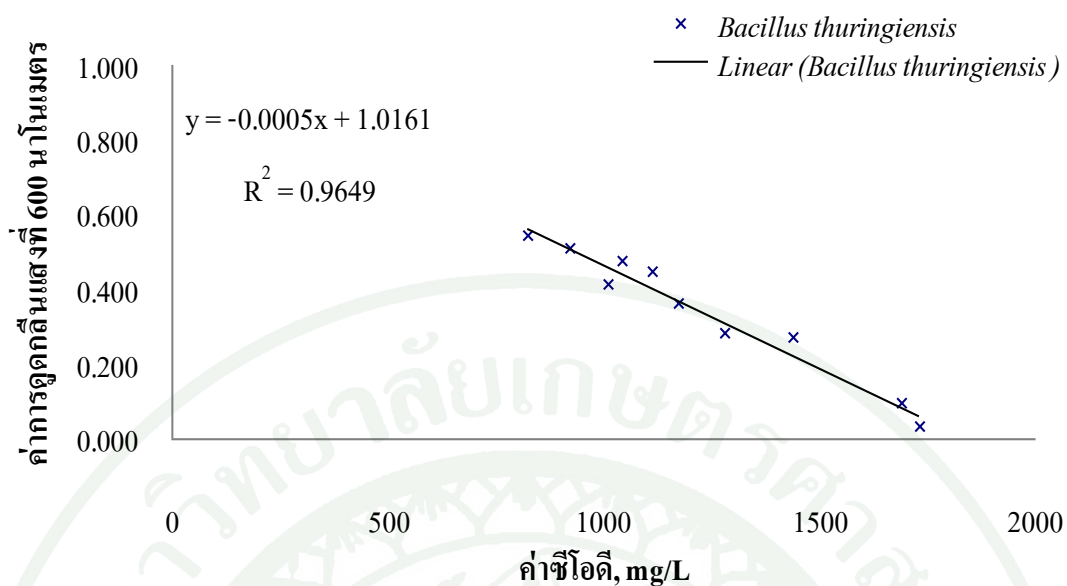


(ก)



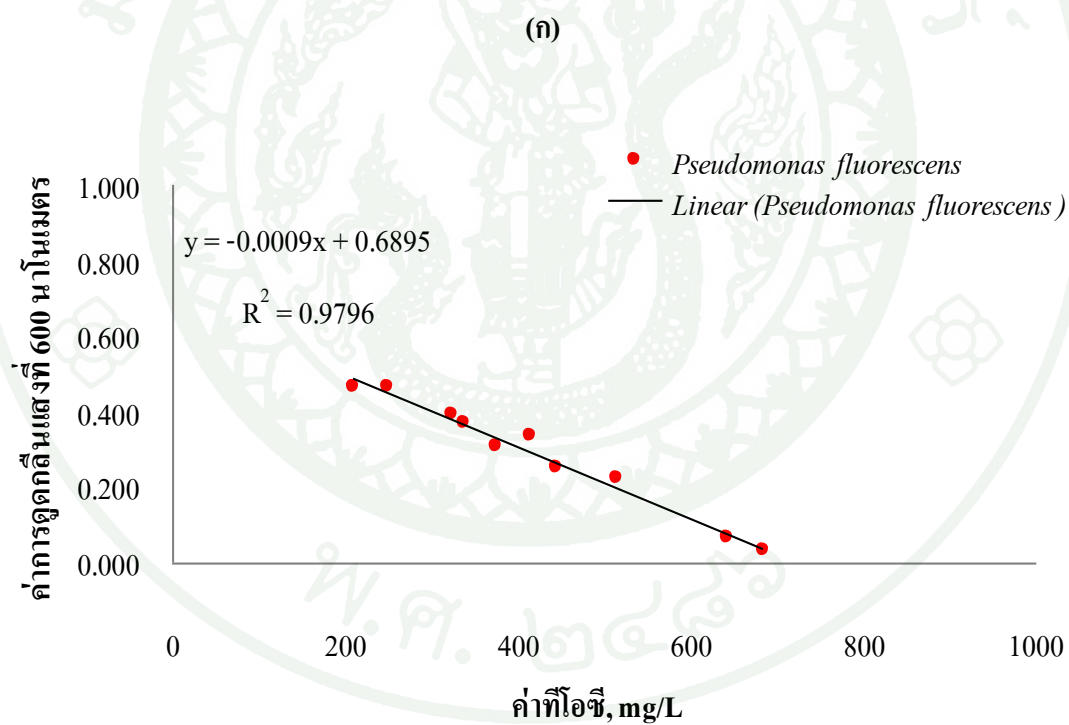
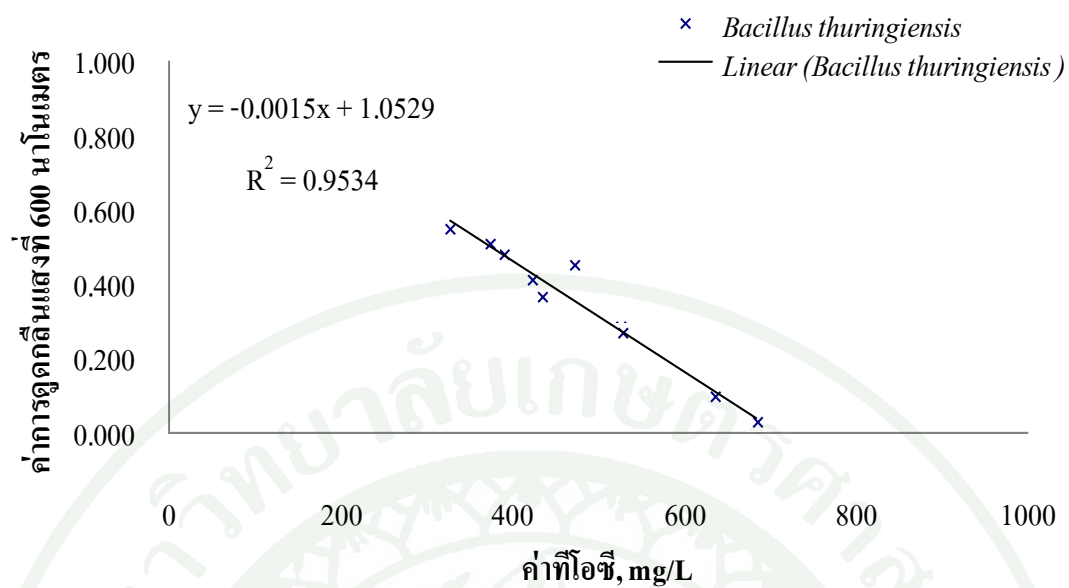
(ข)

ภาพผนวกที่ ก1 กราฟมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงกับน้ำหนักแห้งของจุลชีพ ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ (ก) *Bacillus thuringiensis* และ (ข) *Pseudomonas fluorescens*



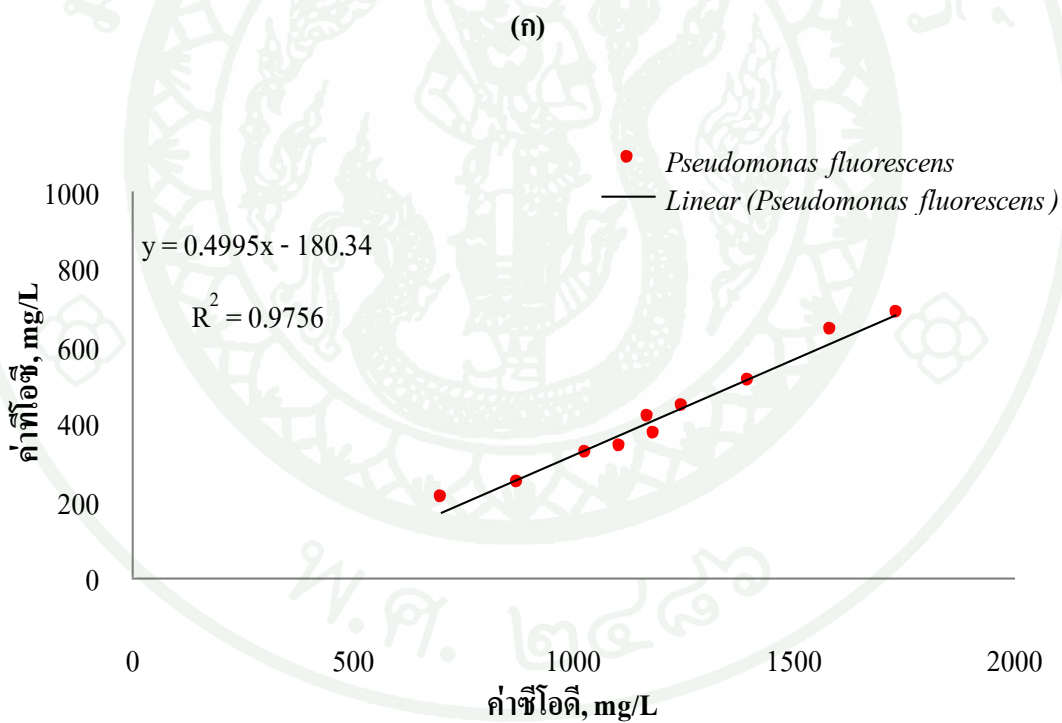
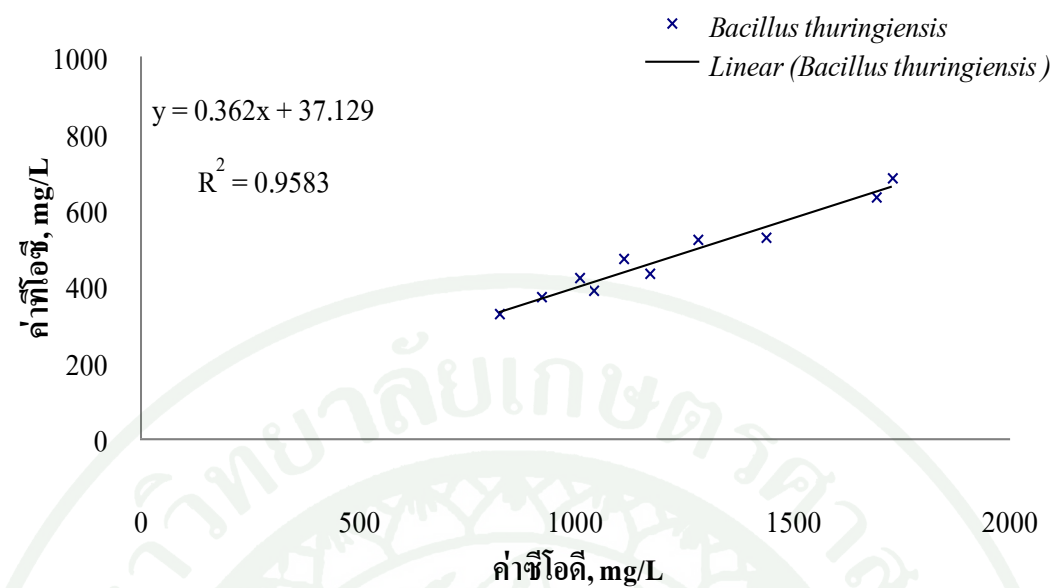
ภาพผนวกที่ ก2 กราฟมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงกับค่า COD ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์

(ก) *Bacillus thuringiensis* และ (ข) *Pseudomonas fluorescens*



ภาพผนวกที่ 3 กราฟมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงกับ TOC ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์

(ก) *Bacillus thuringiensis* และ (ข) *Pseudomonas fluorescens*



ภาพผนวกที่ ก4 กราฟมาตรฐานค่า COD กับ TOC ของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์

(ก) *Bacillus thuringiensis* และ (ข) *Pseudomonas fluorescens*

ตารางผนวกที่ ก1 คำนวณน้ำหนักแห้งของของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับเสียง, dB(C)	กลุ่มทดลอง	Dry weight cells, mg/L			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			ที่ 0 hr	ที่ 4 hr	ที่ 0 hr	ที่ 4 hr
Continuous/ 500	60	Control	44.917	230.933	51.261	286.322
		Expose	44.917	222.733	51.261	271.261
	80	Control	43.667	202.067	48.652	271.365
		Expose	43.667	192.242	48.652	249.148
	100	Control	37.750	233.033	46.826	225.904
		Expose	37.750	248.492	46.826	239.417
Moderato/ 500	60	Control	41.583	231.717	44.391	261.139
		Expose	41.583	250.783	44.391	262.591
	80	Control	43.167	211.317	56.391	212.287
		Expose	43.167	220.875	56.391	214.365
	100	Control	37.417	207.100	49.087	229.470
		Expose	37.417	218.083	49.087	239.009
Continuous/ 1k	60	Control	42.500	235.867	49.261	258.183
		Expose	42.500	225.683	49.261	232.930
	80	Control	38.375	264.233	45.617	291.678
		Expose	38.375	247.767	45.617	262.287
	100	Control	40.833	218.900	48.565	250.530
		Expose	40.833	227.067	48.565	244.339
Moderato/ 1k	60	Control	40.833	239.150	48.913	253.435
		Expose	40.833	263.392	48.913	249.139
	80	Control	36.167	223.967	48.913	248.270
		Expose	36.167	225.700	48.913	245.948
	100	Control	45.667	253.817	46.739	249.174
		Expose	45.667	254.983	46.739	273.791

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับเสียง, dB(C)	กลุ่มทดลอง	Dry weight cells, mg/L			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			ที่ 0 hr	ที่ 4 hr	ที่ 0 hr	ที่ 4 hr
Continuous/ 5k	60	Control	41.417	244.367	49.783	223.383
		Expose	41.417	230.058	49.783	216.470
	80	Control	35.000	220.567	44.043	275.070
		Expose	35.000	211.133	44.043	266.000
	100	Control	33.500	208.367	45.435	265.243
		Expose	33.500	214.892	45.435	257.070
Moderato/ 5k	60	Control	38.333	240.933	45.783	242.530
		Expose	38.333	244.725	45.783	244.217
	80	Control	40.917	214.033	47.609	261.261
		Expose	40.917	227.550	47.609	274.539
	100	Control	45.750	207.817	49.783	230.617
		Expose	45.750	215.483	49.783	252.183
Continuous/ 10k	60	Control	40.500	212.950	47.957	254.235
		Expose	40.500	209.150	47.957	237.417
	80	Control	38.833	218.850	45.783	218.357
		Expose	38.833	212.808	45.783	195.122
	100	Control	41.083	243.250	48.739	253.209
		Expose	41.083	233.592	48.739	233.913
Moderato/ 10k	60	Control	48.250	214.900	49.609	289.626
		Expose	48.250	220.683	49.609	255.096
	80	Control	44.500	235.683	44.478	250.461
		Expose	44.500	254.467	44.478	228.209
	100	Control	35.083	218.867	43.522	268.583
		Expose	35.083	235.950	43.522	257.417

ตารางผนวกที่ 2 ค่า COD ของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับเสียง, dB(C)	กลุ่ม ทดลอง	COD, mg/L			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			ที่ 0 hr	ที่ 4 hr	ที่ 0 hr	ที่ 4 hr
Continuous/ 500	60	Control	1643.200	750.320	1963.000	881.720
		Expose	1643.200	789.680	1963.000	951.000
	80	Control	1649.200	888.880	1975.000	950.520
		Expose	1649.200	936.040	1975.000	1052.720
	100	Control	1677.600	740.240	1983.400	1159.640
		Expose	1677.600	666.040	1983.400	1097.480
Moderato/ 500	60	Control	1659.200	746.560	1994.60	997.560
		Expose	1659.200	655.040	1994.60	990.880
	80	Control	1651.600	844.480	1939.400	1222.280
		Expose	1651.600	798.600	1939.400	1212.720
	100	Control	1679.200	864.720	1973.000	1143.240
		Expose	1679.200	812.000	1973.000	1099.360
Continuous/ 1k	60	Control	1654.800	726.640	1972.200	1011.160
		Expose	1654.800	775.520	1972.200	1127.320
	80	Control	1674.600	590.480	1988.960	857.080
		Expose	1674.600	669.520	1988.960	992.280
	100	Control	1662.800	808.080	1975.400	1046.360
		Expose	1662.800	768.880	1975.400	1074.840
Moderato/ 1k	60	Control	1662.800	710.880	1973.800	1033.000
		Expose	1662.800	594.520	1973.800	1052.760
	80	Control	1685.200	783.760	1973.800	1056.760
		Expose	1685.200	775.440	1973.800	1067.440
	100	Control	1639.600	640.480	1983.800	1052.600
		Expose	1639.600	634.880	1983.800	939.360

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับเสียง, dB(C)	กลุ่ม ทดลอง	COD, mg/L			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			ที่ 0 hr	ที่ 4 hr	ที่ 0 hr	ที่ 4 hr
Continuous/ 5k	60	Control	1660.000	685.840	1969.800	1171.240
		Expose	1660.000	754.520	1969.800	1203.040
	80	Control	1690.800	800.080	1996.200	933.480
		Expose	1690.800	845.360	1996.200	975.200
	100	Control	1698.000	858.640	1989.800	978.680
		Expose	1698.000	827.320	1989.800	1016.280
Moderato/ 5k	60	Control	1674.800	702.320	1988.200	1083.160
		Expose	1674.800	684.120	1988.200	1075.400
	80	Control	1662.400	831.440	1979.800	997.000
		Expose	1662.400	766.560	1979.800	935.920
	100	Control	1639.200	861.280	1969.800	1137.960
		Expose	1639.200	824.480	1969.800	1038.760
Continuous/ 10k	60	Control	1664.400	836.640	1978.200	1029.320
		Expose	1664.400	854.880	1978.200	1106.680
	80	Control	1672.400	808.320	1988.200	1194.360
		Expose	1672.400	837.320	1988.200	1301.240
	100	Control	1661.600	691.200	1974.600	1034.040
		Expose	1661.600	737.560	1974.600	1122.800
Moderato/ 10k	60	Control	1627.200	827.280	1970.600	866.520
		Expose	1627.200	799.520	1970.600	1025.360
	80	Control	1645.200	727.520	1994.200	1046.680
		Expose	1645.200	637.360	1994.200	1149.040
	100	Control	1690.400	808.240	1998.600	963.320
		Expose	1690.400	726.240	1998.600	1014.680

ตารางผนวกที่ ก3 ค่า TOC ของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับเสียง, dB(C)	กลุ่ม ทดลอง	TOC, mg/L			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			ที่ 0 hr	ที่ 4 hr	ที่ 0 hr	ที่ 4 hr
Continuous/ 500	60	Control	723.889	227.844	678.867	318.440
		Expose	723.889	249.711	678.867	341.533
	80	Control	727.222	304.822	682.867	341.373
		Expose	727.222	331.022	682.867	375.440
	100	Control	743.000	222.244	685.667	411.080
		Expose	743.000	181.022	685.667	390.360
Moderato/ 500	60	Control	732.778	225.756	689.400	357.053
		Expose	732.778	174.911	689.400	354.827
	80	Control	728.556	280.156	671.000	431.960
		Expose	728.556	254.667	671.000	428.773
	100	Control	743.889	291.400	682.200	405.613
		Expose	743.889	262.111	682.200	390.987
Continuous/ 1k	60	Control	730.333	214.689	681.933	361.587
		Expose	730.333	241.844	681.933	400.307
	80	Control	741.333	139.044	687.520	310.227
		Expose	741.333	182.956	687.520	355.293
	100	Control	734.778	259.933	683.000	373.320
		Expose	734.778	238.156	683.000	382.813
Moderato/ 1k	60	Control	734.778	205.933	682.467	368.867
		Expose	734.778	141.289	682.467	375.453
	80	Control	747.222	246.422	682.467	376.787
		Expose	747.222	241.800	682.467	380.347
	100	Control	721.889	166.822	685.800	375.400
		Expose	721.889	163.711	685.800	337.653

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับเสียง, dB(C)	กลุ่ม ทดลอง	TOC, mg/L			
			<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
			ที่ 0 hr	ที่ 4 hr	ที่ 0 hr	ที่ 4 hr
Continuous/ 5k	60	Control	733.222	192.022	681.133	414.947
		Expose	733.222	230.178	681.133	425.547
	80	Control	750.333	255.489	689.933	335.693
		Expose	750.333	280.644	689.933	349.600
	100	Control	754.333	288.022	687.800	350.760
		Expose	754.333	270.622	687.800	363.293
Moderato/ 5k	60	Control	741.444	201.178	687.267	385.587
		Expose	741.444	191.067	687.267	383.000
	80	Control	734.556	272.911	684.467	356.867
		Expose	734.556	236.867	684.467	336.507
	100	Control	721.667	289.489	681.133	403.853
		Expose	721.667	269.044	681.133	370.787
Continuous/ 10k	60	Control	735.667	275.800	683.933	367.640
		Expose	735.667	285.933	683.933	393.427
	80	Control	740.111	260.067	687.267	422.653
		Expose	740.111	276.178	687.267	458.280
	100	Control	734.111	195.000	682.733	369.213
		Expose	734.111	220.756	682.733	398.800
Moderato/ 10k	60	Control	715.000	270.600	681.400	313.373
		Expose	715.000	255.178	681.400	366.320
	80	Control	725.000	215.178	689.267	373.427
		Expose	725.000	165.089	689.267	407.547
	100	Control	750.111	260.022	690.733	345.640
		Expose	750.111	214.467	690.733	362.760

ตารางผนวกที่ ก4 ประสิทธิภาพการผลิตมวลชีวภาพของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับ เสียง, dB(C)	กลุ่ม ทดลอง	Growth Yield (mgTOC removed/mg cells-hr)		Growth Yield (mg COD removed/mg cells-hr)	
			<i>P.</i>	<i>B.</i>	<i>P.</i>	<i>B.</i>
			<i>fluorescens</i>	<i>thuringiensis</i>	<i>fluorescens</i>	<i>thuringiensis</i>
Continuous / 500	60	Control	0.3749990	0.6521737	0.2083326	0.2173914
		Expose	0.3749984	0.6521726	0.2083326	0.2173913
	80	Control	0.3750000	0.6521725	0.2083333	0.2173913
		Expose	0.3750000	0.6521743	0.2083333	0.2173917
	100	Control	0.3749990	0.6521718	0.2083330	0.2173909
		Expose	0.3750004	0.6521718	0.2083337	0.2173908
Moderato / 500	60	Control	0.3750015	0.6521738	0.2083341	0.2173915
		Expose	0.3749998	0.6521746	0.2083333	0.2173913
	80	Control	0.3750000	0.6521754	0.2083333	0.2173918
		Expose	0.3749992	0.6521734	0.2083329	0.2173914
	100	Control	0.3749992	0.6521752	0.2083329	0.2173918
		Expose	0.3749984	0.6521756	0.2083326	0.2173916
Continuous / 1k	60	Control	0.3750010	0.6521761	0.2083337	0.2173916
		Expose	0.3749992	0.6521734	0.2083330	0.2173906
	80	Control	0.3749994	0.6521748	0.2083330	0.2173914
		Expose	0.3750011	0.6521746	0.2083337	0.2173917
	100	Control	0.3750003	0.6521732	0.2083337	0.2173911
		Expose	0.3750015	0.6521735	0.2083341	0.2173914
Moderato / 1k	60	Control	0.3750002	0.6521747	0.2083337	0.2173916
		Expose	0.3750011	0.6521722	0.2083340	0.2173912
	80	Control	0.3750000	0.6521755	0.2083333	0.2173918
		Expose	0.3749995	0.6521746	0.2083330	0.2173915
	100	Control	0.3749998	0.6521746	0.2083333	0.2173915
		Expose	0.3749987	0.6521728	0.2083327	0.2173911

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับ เสียง, dB(C)	กลุ่ม ทดลอง	Growth Yield		Growth Yield	
			(mg TOC removed/mg cells-hr)		(mg COD removed/mg cells-hr)	
			<i>P.</i>	<i>B.</i>	<i>P.</i>	<i>B.</i>
			<i>fluorescens</i>	<i>thuringiensis</i>	<i>fluorescens</i>	<i>thuringiensis</i>
Continuous / 5k	60	Control	0.3750000	0.6521755	0.2083333	0.2173913
		Expose	0.3749990	0.6521758	0.2083326	0.2173914
	80	Control	0.3750010	0.6521751	0.2083337	0.2173917
		Expose	0.3749992	0.6521745	0.2083329	0.2173913
	100	Control	0.3750008	0.6521718	0.2083337	0.2173906
		Expose	0.3750008	0.6521739	0.2083337	0.2173915
Moderato / 5k	60	Control	0.3750005	0.6521712	0.2083333	0.2173904
		Expose	0.3750011	0.6521706	0.2083337	0.2173904
	80	Control	0.3749981	0.6521734	0.2083325	0.2173911
		Expose	0.3749992	0.6521727	0.2083330	0.2173909
	100	Control	0.3750006	0.6521711	0.2083338	0.2173904
		Expose	0.3749986	0.6521753	0.2083329	0.2173913
Continuous / 10k	60	Control	0.3749997	0.6521738	0.2083333	0.2173910
		Expose	0.3749994	0.6521724	0.2083333	0.2173903
	80	Control	0.3750010	0.6521726	0.2083337	0.2173914
		Expose	0.3750003	0.6521724	0.2083333	0.2173911
	100	Control	0.3750007	0.6521747	0.2083337	0.2173918
		Expose	0.3750017	0.6521743	0.2083341	0.2173914
Moderato / 10k	60	Control	0.3750000	0.6521723	0.2083333	0.2173909
		Expose	0.3749995	0.6521741	0.2083329	0.2173914
	80	Control	0.3749995	0.6521752	0.2083330	0.2173917
		Expose	0.3750007	0.6521759	0.2083337	0.2173920
	100	Control	0.3750013	0.6521749	0.2083341	0.2173914
		Expose	0.3750009	0.6521726	0.2083337	0.2173906

ตารางผนวกที่ ๓5 อัตราการโตจำเพาะของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

ลักษณะ/ ความถี่เสียง, Hz	ระดับเสียง, dB(C)	Specific Growth Rate (hr ⁻¹)			
		<i>P. fluorescens</i>		<i>B. thuringiensis</i>	
		Control	Expose	Control	Expose
Continuous/ 500	60	0.337	0.332	0.348	0.406
	80	0.322	0.315	0.348	0.402
	100	0.361	0.368	0.328	0.402
Moderato/ 500	60	0.348	0.358	0.355	0.415
	80	0.330	0.337	0.290	0.368
	100	0.347	0.354	0.324	0.397
Continuous/ 1k	60	0.347	0.342	0.340	0.394
	80	0.373	0.366	0.365	0.413
	100	0.343	0.348	0.338	0.401
Moderato/ 1k	60	0.354	0.366	0.338	0.402
	80	0.361	0.362	0.335	0.401
	100	0.361	0.362	0.335	0.401
Continuous/ 5k	60	0.355	0.347	0.318	0.385
	80	0.363	0.358	0.362	0.417
	100	0.361	0.365	0.354	0.412
Moderato/ 5k	60	0.363	0.365	0.341	0.406
	80	0.340	0.348	0.346	0.413
	100	0.320	0.325	0.322	0.401
Continuous/ 10k	60	0.340	0.338	0.341	0.399
	80	0.349	0.346	0.327	0.383
	100	0.383	0.356	0.350	0.339
Moderato/ 10k	60	0.317	0.321	0.354	0.403
	80	0.341	0.351	0.349	0.403
	100	0.362	0.371	0.361	0.415

ตารางผนวกที่ 6 อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับ เสียง, dB(C)	กลุ่ม ทดลอง	Specific substrate utilization (mg TOC removed/mg cells-hr)		Specific substrate utilization (mg COD removed/mg cells-hr)	
			<i>P.</i>	<i>B.</i>	<i>P.</i>	<i>B.</i>
			<i>fluorescens</i>	<i>thuringiensis</i>	<i>fluorescens</i>	<i>thuringiensis</i>
Continuous / 500	60	Control	0.899	0.534	1.618	1.602
		Expose	0.886	0.622	1.594	1.865
	80	Control	0.859	0.534	1.547	1.601
		Expose	0.840	0.617	1.512	1.851
	100	Control	0.962	0.503	1.731	1.510
		Expose	0.982	0.617	1.767	1.850
Moderato / 500	60	Control	0.928	0.544	1.670	1.632
		Expose	0.954	0.637	1.717	1.911
	80	Control	0.881	0.445	1.586	1.335
		Expose	0.897	0.565	1.615	1.695
	100	Control	0.925	0.496	1.665	1.489
		Expose	0.943	0.609	1.697	1.828
Continuous / 1k	60	Control	0.926	0.521	1.667	1.563
		Expose	0.911	0.605	1.639	1.814
	80	Control	0.995	0.559	1.791	1.678
		Expose	0.976	0.633	1.756	1.900
	100	Control	0.914	0.518	1.645	1.553
		Expose	0.927	0.614	1.668	1.843
Moderato / 1k	60	Control	0.944	0.519	1.700	1.556
		Expose	0.975	0.616	1.756	1.848
	80	Control	0.963	0.514	1.733	1.543
		Expose	0.965	0.614	1.737	1.843
	100	Control	0.927	0.524	1.668	1.573
		Expose	0.928	0.636	1.671	1.907

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลักษณะ/ ความถี่ เสียง, Hz	ระดับ เสียง, dB(C)	กลุ่ม ทดลอง	Specific substrate utilization (mg TOC removed/mg cells-hr)		Specific substrate utilization (mg COD removed/mg cells-hr)	
			<i>P.</i>	<i>B.</i>	<i>P.</i>	<i>B.</i>
			<i>fluorescens</i>	<i>thuringiensis</i>	<i>fluorescens</i>	<i>thuringiensis</i>
Continuous / 5k	60	Control	0.947	0.487	1.704	1.462
		Expose	0.927	0.590	1.668	1.771
	80	Control	0.968	0.555	1.743	1.665
		Expose	0.954	0.640	1.717	1.919
	100	Control	0.964	0.542	1.735	1.627
		Expose	0.974	0.631	1.753	1.893
Moderato/ 5k	60	Control	0.967	0.523	1.741	1.570
		Expose	0.972	0.623	1.750	1.869
	80	Control	0.905	0.530	1.630	1.591
		Expose	0.927	0.634	1.668	1.901
	100	Control	0.852	0.494	1.534	1.483
		Expose	0.866	0.615	1.559	1.846
Continuous / 10k	60	Control	0.907	0.523	1.633	1.570
		Expose	0.901	0.612	1.621	1.835
	80	Control	0.931	0.501	1.677	1.503
		Expose	0.922	0.587	1.659	1.760
	100	Control	0.948	0.519	1.706	1.557
		Expose	0.934	0.607	1.682	1.821
Moderato/ 10k	60	Control	0.844	0.542	1.520	1.627
		Expose	0.855	0.618	1.539	1.853
	80	Control	0.910	0.535	1.638	1.606
		Expose	0.936	0.617	1.686	1.852
	100	Control	0.965	0.553	1.737	1.659
		Expose	0.988	0.637	1.779	1.911



ภาคผนวก ข
แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS 11.5

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของ
แบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง ด้วยลักษณะเสียง
ดังแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง

Group Statistics

Sound type/ Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Continuous/ 500 Hz	60	<i>P. fluorescens</i>	control	25	.48444	.013657	.002731
			expose	50	.46476	.008506	.001203
		<i>B. thuringiensis</i>	control	25	.57524	.017333	.003467
			expose	50	.54060	.014503	.002051
	80	<i>P. fluorescens</i>	control	25	.41516	.008260	.001652
			expose	50	.39158	.020378	.002882
		<i>B. thuringiensis</i>	control	25	.54084	.017818	.003564
			expose	50	.48974	.018839	.002664
	100	<i>P. fluorescens</i>	control	25	.48948	.019915	.003983
			expose	50	.52658	.028489	.004029
		<i>B. thuringiensis</i>	control	25	.43628	.039533	.007907
			expose	50	.46736	.034002	.004809
Continuous/ 1 kHz	60	<i>P. fluorescens</i>	control	25	.49628	.016211	.003242
			expose	50	.47184	.010434	.001476
		<i>B. thuringiensis</i>	control	25	.51052	.023766	.004753
			expose	50	.45244	.021844	.003089
	80	<i>P. fluorescens</i>	control	25	.56436	.032340	.006468
			expose	50	.52484	.054666	.007731
		<i>B. thuringiensis</i>	control	25	.58756	.011504	.002301
			expose	50	.51996	.019609	.002773
	100	<i>P. fluorescens</i>	control	25	.45556	.015333	.003067
		<i>P. fluorescens</i>	expose	50	.47516	.018066	.002555

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type/ Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Continuous/ 1 kHz	100	<i>B.</i> <i>thuringiensis</i>	control	25	.49292	.022960	.004592
			expose	50	.47868	.018137	.002565
		<i>P.</i> <i>fluorescens</i>	control	25	.51668	.016157	.003231
			expose	50	.48234	.023759	.003360
	60	<i>B.</i> <i>thuringiensis</i>	control	25	.43048	.014796	.002959
			expose	50	.41458	.012627	.001786
		<i>P.</i> <i>fluorescens</i>	control	25	.45956	.010340	.002068
			expose	50	.43692	.015475	.002188
	80	<i>B.</i> <i>thuringiensis</i>	control	25	.54936	.009763	.001953
			expose	50	.52850	.018699	.002644
		<i>P.</i> <i>fluorescens</i>	control	25	.43028	.013356	.002671
			expose	50	.44594	.044100	.006237
Continuous/ 5 kHz	100	<i>B.</i> <i>thuringiensis</i>	control	25	.52676	.021172	.004234
			expose	50	.50796	.014620	.002068
		<i>P.</i> <i>fluorescens</i>	control	25	.44128	.008507	.001701
			expose	50	.43216	.017431	.002465
	60	<i>B.</i> <i>thuringiensis</i>	control	25	.50144	.015363	.003073
			expose	50	.46276	.038954	.005509
		<i>P.</i> <i>fluorescens</i>	control	25	.45544	.011601	.002320
			expose	50	.44094	.012210	.001727
	80	<i>B.</i> <i>thuringiensis</i>	control	25	.41892	.019780	.003956
			expose	50	.36548	.013805	.001952
		<i>P.</i> <i>fluorescens</i>	control	25	.51400	.037158	.007432
			expose	50	.49082	.030909	.004371
Continuous/ 10 kHz	100	<i>B.</i> <i>thuringiensis</i>	control	25	.49908	.011173	.002235
			expose	50	.45470	.019057	.002695

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type/ Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Moderato/ 500 Hz	60	<i>P.</i>	control	25	.48632	.021279	.004256
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.53208	.019693	.002785
		<i>B.</i>	control	25	.51732	.027075	.005415
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.52066	.029503	.004172
	80	<i>P.</i>	control	25	.43736	.016987	.003397
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.46030	.019816	.002802
		<i>B.</i>	control	25	.40496	.034389	.006878
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.40974	.034489	.004877
	100	<i>P.</i>	control	25	.42724	.020765	.004153
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.45360	.023229	.003285
		<i>B.</i>	control	25	.44448	.026464	.005293
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.46642	.024754	.003501
Moderato/ 1 kHz	60	<i>P.</i>	control	25	.50416	.014168	.002834
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.56234	.015560	.002200
		<i>B.</i>	control	25	.49960	.019146	.003829
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.48972	.022523	.003185
	80	<i>P.</i>	control	25	.46772	.014197	.002839
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.47188	.025636	.003625
		<i>B.</i>	control	25	.48772	.041133	.008227
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.48238	.031015	.004386
	100	<i>P.</i>	control	25	.53936	.021150	.004230
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.54216	.026411	.003735
		<i>B.</i>	control	25	.48980	.026952	.005390
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.54642	.046972	.006643

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type/ Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Moderato/ 5 kHz	60	<i>P.</i>	control	25	.50844	.014866	.002973
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.51754	.014834	.002098
		<i>B.</i>	control	25	.47452	.022057	.004411
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.47840	.027430	.003879
	80	<i>P.</i>	control	25	.44388	.021634	.004327
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.47632	.015791	.002233
		<i>B.</i>	control	25	.51760	.029986	.005997
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.54814	.023808	.003367
	100	<i>P.</i>	control	25	.42896	.010068	.002014
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.44736	.016657	.002356
		<i>B.</i>	control	25	.44712	.022859	.004572
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.49672	.048799	.006901
Moderato/ 10 kHz	60	<i>P.</i>	control	25	.44596	.019741	.003948
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.45984	.019061	.002696
		<i>B.</i>	control	25	.58284	.022586	.004517
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.50342	.029022	.004104
	80	<i>P.</i>	control	25	.49584	.016926	.003385
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.54092	.021925	.003101
		<i>B.</i>	control	25	.49276	.026601	.005320
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.44158	.018537	.002622
	100	<i>P.</i>	control	25	.45548	.029806	.005961
		<i>fluorescens</i>	expose	50	.49648	.025201	.003564
		<i>B.</i>	control	25	.53444	.022010	.004402
		<i>thuringiensis</i>	expose	50	.50876	.026098	.003691

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Independent Samples Test

Sound type, Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Equal variances	Levene's Test for Equality of		t-test for Equality of Means					99.5% Confidence	
				Variances		t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Interval of the	
				F	Sig.						Difference	
											Lower	Upper
Continuous/ 500 Hz	60	<i>P.</i>	Assumed	9.606	.003	7.665	73	.000	.01968	.002568	.012247	.027113
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			6.594	33.594	.000	.01968	.002985	.010713	.028647
		<i>B.</i>	Assumed	.010	.919	9.129	73	.000	.03464	.003794	.023656	.045624
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			8.600	41.266	.000	.03464	.004028	.022694	.046586
	80	<i>P.</i>	Assumed	3.663	.060	5.547	73	.000	.02358	.004251	.011274	.035886
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			7.099	70.869	.000	.02358	.003322	.013955	.033205
		<i>B.</i>	Assumed	.050	.824	11.271	73	.000	.05110	.004534	.037975	.064225
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			11.485	50.586	.000	.05110	.004449	.038039	.064161
	100	<i>P.</i>	Assumed	4.039	.048	-5.829	73	.000	-.03710	.006365	-.055525	-.018675
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-6.549	64.940	.000	-.03710	.005665	-.053564	-.020636
		<i>B.</i>	Assumed	.892	.348	-3.533	73	.001	-.03108	.008797	-.056547	-.005613
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			-3.359	42.209	.002	-.03108	.009254	-.058492	-.003668

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type, Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Equal variances	Levene's Test		t-test for Equality of Means					99.5% Confidence	
				for Equality of		t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Interval of the	
				Variances							Difference	
				F	Sig.						Lower	Upper
Continuous/ 1 kHz	60	<i>P.</i>	Assumed	2.323	.132	7.901	73	.000	.02444	.003093	.015485	.033395
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			6.861	34.253	.000	.02444	.003562	.013752	.035128
		<i>B.</i>	Assumed	.316	.575	10.541	73	.000	.05808	.005510	.042130	.074030
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			10.245	44.654	.000	.05808	.005669	.041338	.074822
	80	<i>P.</i>	Assumed	4.552	.036	3.328	73	.001	.03952	.011874	.005147	.073893
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			3.921	70.790	.000	.03952	.010080	.010312	.068728
		<i>B.</i>	Assumed	8.924	.004	15.891	73	.000	.06760	.004254	.055285	.079915
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			18.760	70.996	.000	.06760	.003603	.057160	.078040
	100	<i>P.</i>	Assumed	.647	.424	-4.648	73	.000	-.01960	.004217	-.031807	-.007393
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-4.911	55.731	.000	-.01960	.003991	-.031267	-.007933
		<i>B.</i>	Assumed	1.109	.296	2.928	73	.005	.01424	.004863	.000163	.028317
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			2.707	39.433	.010	.01424	.005260	-.001401	.029881
Continuous/ 5 kHz	60	<i>P.</i>	Assumed	3.993	.049	6.503	73	.000	.03434	.005280	.019054	.049626
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			7.366	66.103	.000	.03434	.004662	.020801	.047879

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type, Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Equal variances	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					99.5% Confidence Interval of the Difference	
				F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
Continuous/ 5 kHz	60	<i>B.</i>	Assumed	1.162	.285	4.852	73	.000	.01590	.003277	.006413	.025387
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			4.600	41.937	.000	.01590	.003456	.005658	.026142
	80	<i>P.</i>	Assumed	2.515	.117	6.604	73	.000	.02264	.003428	.012716	.032564
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			7.519	66.811	.000	.02264	.003011	.013898	.031382
		<i>B.</i>	Assumed	3.545	.064	5.221	73	.000	.02086	.003995	.009294	.032426
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			6.346	72.808	.000	.02086	.003287	.011343	.030377
	100	<i>P.</i>	Assumed	7.368	.008	-1.731	73	.088	-.01566	.009047	-.041849	.010529
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-2.308	64.214	.024	-.01566	.006785	-.035385	.004065
		<i>B.</i>	Assumed	.004	.948	4.500	73	.000	.01880	.004177	.006707	.030893
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			3.990	35.811	.000	.01880	.004712	.004703	.032897
Continuous/ 10 kHz	60	<i>P.</i>	Assumed	12.800	.001	2.467	73	.016	.00912	.003697	-.001581	.019821
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			3.045	72.99	.003	.00912	.002995	.000449	.017791
		<i>B.</i>	Assumed	2.619	.110	4.770	73	.000	.03868	.008110	.015204	.062156
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			6.132	70.33	.000	.03868	.006308	.020398	.056962

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type, Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Equal variances	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					99.5% Confidence Interval of the Difference	
						t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference		
				F	Sig.						Lower	Upper
Continuous/ 10 kHz	80	<i>P.</i>	Assumed	.181	.672	4.928	73	.000	.01450	.002943	.005982	.023018
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			5.013	50.38	.000	.01450	.002892	.006008	.022992
		<i>B.</i>	Assumed	.793	.376	13.621	73	.000	.05344	.003923	.042082	.064798
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			12.114	36.07	.000	.05344	.004412	.040249	.066631
	100	<i>P.</i>	Assumed	.141	.708	2.859	73	.006	.02318	.008106	-.000287	.046647
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			2.688	41.07	.010	.02318	.008622	-.002398	.048758
		<i>B.</i>	Assumed	7.831	.007	10.736	73	.000	.04438	.004134	.032413	.056347
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			12.677	71.01	.000	.04438	.003501	.034237	.054523
Moderato/ 500 Hz	60	<i>P.</i>	Assumed	.888	.349	-9.235	73	.000	-.04576	.004955	-.060104	-.031416
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-8.997	44.922	.000	-.04576	.005086	-.060776	-.030744
		<i>B.</i>	Assumed	.280	.598	-.475	73	.636	-.00334	.007037	-.023710	.017030
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			-.489	51.983	.627	-.00334	.006836	-.023382	.016702
	80	<i>P.</i>	Assumed	.348	.557	-4.947	73	.000	-.02294	.004638	-.036365	-.009515
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-5.209	55.242	.000	-.02294	.004404	-.035818	-.010062

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type, Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Equal variances	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					99.5% Confidence Interval of the Difference	
						t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference		
				F	Sig.						Lower	Upper
Moderato/ 500 Hz	80	<i>B.</i>	Assumed	.086	.770	-.566	73	.573	-.00478	.008440	-.029212	.019652
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			-.567	48.234	.573	-.00478	.008432	-.029586	.020026
	100	<i>P.</i>	Assumed	.590	.445	-4.794	73	.000	-.02636	.005499	-.042278	-.010442
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-4.978	53.224	.000	-.02636	.005295	-.041869	-.010851
		<i>B.</i>	Assumed	.020	.888	-3.536	73	.001	-.02194	.006204	-.039900	-.003980
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			-3.457	45.341	.001	-.02194	.006346	-.040666	-.003214
		<i>P.</i>	Assumed	.305	.583	-15.713	73	.000	-.05818	.003703	-.068899	-.047461
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-16.217	52.351	.000	-.05818	.003588	-.068695	-.047665
	60	<i>B.</i>	Assumed	.341	.561	1.878	73	.064	.00988	.005260	-.005346	.025106
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			1.984	55.653	.052	.00988	.004981	-.004681	.024441
	1 kHz	<i>P.</i>	Assumed	9.963	.002	-.754	73	.453	-.00416	.005518	-.020133	.011813
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-.903	72.136	.369	-.00416	.004605	-.017496	.009176
	80	<i>B.</i>	Assumed	2.818	.097	.629	73	.531	.00534	.008492	-.019243	.029923
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			.573	38.077	.570	.00534	.009323	-.022442	.033122

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type, Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Equal variances	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					99.5% Confidence Interval of the Difference	
				F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
Moderato/ 1 kHz	100	<i>P.</i>	Assumed	3.388	.070	-.461	73	.646	-.00280	.006076	-.020389	.014789
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-.496	58.574	.622	-.00280	.005643	-.019262	.013662
		<i>B.</i>	Assumed	8.227	.005	-5.574	73	.000	-.05662	.010158	-.086027	-.027213
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			-6.618	71.490	.000	-.05662	.008555	-.081401	-.031839
Moderato/ 5 kHz	60	<i>P.</i>	Assumed	.011	.916	-2.503	73	.015	-.00910	.003636	-.019626	.001426
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-2.501	48.016	.016	-.00910	.003639	-.019808	.001608
		<i>B.</i>	Assumed	.780	.380	-.614	73	.541	-.00388	.006317	-.022166	.014406
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			-.660	58.372	.512	-.00388	.005874	-.021019	.013259
	80	<i>P.</i>	Assumed	2.915	.092	-7.389	73	.000	-.03244	.004390	-.045149	-.019731
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-6.662	37.197	.000	-.03244	.004869	-.046971	-.017909
		<i>B.</i>	Assumed	1.424	.237	-4.795	73	.000	-.03054	.006369	-.048978	-.012102
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			-4.440	39.587	.000	-.03054	.006878	-.050987	-.010093
	100	<i>P.</i>	Assumed	3.938	.051	-5.069	73	.000	-.01840	.003630	-.028907	-.007893
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-5.937	70.222	.000	-.01840	.003099	-.027382	-.009418

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Sound type, Frequency	Volume, dB(C)	Bacteria type	Levene's Test		t-test for Equality of Means					99.5% Confidence		
			Equal variances	for Equality of		t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Interval of the	
				Variances							Difference	
				F	Sig.						Lower	Upper
Moderato/ 5 kHz	100	<i>B.</i>	Assumed	8.041	.006	-4.813	73	.000	-.04960	.010306	-.079435	-.019765
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			-5.992	72.814	.000	-.04960	.008278	-.073566	-.025634
Moderato/ 10 kHz	60	<i>P.</i>	Assumed	.521	.473	-2.938	73	.004	-.01388	.004724	-.027556	-.000204
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-2.903	46.628	.006	-.01388	.004781	-.027968	.000208
		<i>B.</i>	Assumed	1.448	.233	11.975	73	.000	.07942	.006632	.060221	.098619
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			13.012	59.966	.000	.07942	.006103	.061631	.097209
	80	<i>P.</i>	Assumed	3.490	.066	-9.014	73	.000	-.04508	.005001	-.059557	-.030603
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-9.820	60.356	.000	-.04508	.004590	-.058456	-.031704
		<i>B.</i>	Assumed	10.521	.002	9.707	73	.000	.05118	.005272	.035917	.066443
		<i>thuringiensis</i>	Not assumed			8.629	36.030	.000	.05118	.005931	.033444	.068916
	100	<i>P.</i>	Assumed	3.340	.072	-6.245	73	.000	-.04100	.006565	-.060006	-.021994
		<i>fluorescens</i>	Not assumed			-5.903	41.619	.000	-.04100	.006945	-.061590	-.020410
<i>B.</i>		Assumed	.761	.386	4.223	73	.000	.02568	.006082	.008075	.043285	
<i>thuringiensis</i>		Not assumed			4.470	56.039	.000	.02568	.005744	.008892	.042468	

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของ
แบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* ระหว่างชุดการทดลอง
ด้วยลักษณะเสียงดังแบบต่อเนื่อง ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง

Univariate Analysis of Variance: Between-Subjects Factors

		Value Label	N
VOLUME	1	60dB	200
	2	80dB	200
	3	100dB	200
FREQUENCY	1	500Hz	150
	2	1kHz	150
	3	5kHz	150
	4	10kHz	150

Descriptive Statistics, Dependent Variable: Optical Density

VOLUME	FREQUENCY	Mean	Std. Deviation	N
60dB	500Hz	-.01924	.008506	50
	1kHz	-.02416	.010434	50
	5kHz	-.03466	.023759	50
	10kHz	-.00884	.017431	50
	Total	-.02173	.018580	200
80dB	500Hz	-.02342	.020378	50
	1kHz	-.03916	.054666	50
	5kHz	-.02308	.015475	50
	10kHz	-.01406	.012210	50
	Total	-.02493	.031871	200
100dB	500Hz	.03758	.028489	50
	1kHz	.01916	.018066	50
	5kHz	.01594	.044100	50
	10kHz	.03304	.024413	50

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

VOLUME	FREQUENCY	Mean	Std. Deviation	N
100dB	Total	.02643	.031448	200
	500Hz	-.00169	.034736	150
	1kHz	-.01472	.041730	150
Total	5kHz	-.01393	.037090	150
	10kHz	.00338	.028148	150
	Total	-.00674	.036517	600

Tests of Between-Subjects Effects, Dependent Variable: Optical Density

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.381(a)	11	.035	48.815	.000
Intercept	.027	1	.027	38.406	.000
VOLUME	.331	2	.166	233.180	.000
FREQUENCY	.036	3	.012	17.133	.000
VOLUME * FREQUENCY	.014	6	.002	3.201	.004
Error	.418	588	.001		
Total	.826	600			
Corrected Total	.799	599			

a R Squared = .477 (Adjusted R Squared = .468)

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Post Hoc Tests: VOLUME

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I) VOLUME	(J) VOLUME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
60dB	60dB					
	80dB	.00320	.002665	.230	-.00203	.00844
	100dB	-.04816(*)	.002665	.000	-.05339	-.04292
80dB	60dB	-.00320	.002665	.230	-.00844	.00203
	80dB					
	100dB	-.05136(*)	.002665	.000	-.05659	-.04613
100dB	60dB	.04816(*)	.002665	.000	.04292	.05339
	80dB	.05136(*)	.002665	.000	.04613	.05659
	100dB					

Based on observed means. *The mean difference is significant at the .05 level.

Post Hoc Tests: FREQUENCY

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I) FREQUENCY	(J) FREQUENCY	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
500Hz	500Hz					
	1kHz	.01303(*)	.003077	.000	.00698	.01907
	5kHz	.01224(*)	.003077	.000	.00620	.01828
	10kHz	-.00507	.003077	.100	-.01112	.00097

ตารางผนวกที่ ๒ (ต่อ)

(I) FREQUENCY	(J) FREQUENCY	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1kHz	500Hz	-.01303(*)	.003077	.000	-.01907	-.00698
	1kHz					
	5kHz	-.00079	.003077	.798	-.00683	.00526
	10kHz	-.01810(*)	.003077	.000	-.02414	-.01206
5kHz	500Hz	-.01224(*)	.003077	.000	-.01828	-.00620
	1kHz	.00079	.003077	.798	-.00526	.00683
	5kHz					
	10kHz	-.01731(*)	.003077	.000	-.02336	-.01127
10kHz	500Hz	.00507	.003077	.100	-.00097	.01112
	1kHz	.01810(*)	.003077	.000	.01206	.02414
	5kHz	.01731(*)	.003077	.000	.01127	.02336
	10kHz					

Based on observed means. *The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของ
 แบคทีเรียแกรมลบสายพันธุ์ *Pseudomonas fluorescens* ระหว่างชุดการทดลอง
 ด้วยลักษณะเสียงดังแบบเป็นจังหวะ ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง

Univariate Analysis of Variance: Between-Subjects Factors

		Value Label	N
VOLUME	1	60dB	200
	2	80dB	200
	3	100dB	200
FREQUENCY	1	500Hz	150
	2	1kHz	150
	3	5kHz	150
	4	10kHz	150

Descriptive Statistics, Dependent Variable: Optical Density

VOLUME	FREQUENCY	Mean	Std. Deviation	N
60dB	500Hz	.04608	.019693	50
	1kHz	.05834	.015560	50
	5kHz	.00954	.014834	50
	10kHz	.01384	.019061	50
	Total	.03195	.027065	200
80dB	500Hz	.02330	.019816	50
	1kHz	.00388	.025636	50
	5kHz	.03232	.015791	50
	10kHz	.04492	.021925	50
	Total	.02611	.025749	200
100dB	500Hz	.44366	.061115	50
	1kHz	.00316	.026411	50
	5kHz	.02036	.016657	50
	10kHz	.04148	.025201	50

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

VOLUME	FREQUENCY	Mean	Std. Deviation	N
100dB	Total	.12717	.187240	200
	500Hz	.17101	.197458	150
	1kHz	.02179	.034605	150
Total	5kHz	.02074	.018242	150
	10kHz	.03341	.026101	150
	Total	.06174	.119417	600

Tests of Between-Subjects Effects, Dependent Variable: Optical Density

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	8.133(a)	11	.739	1064.082	.000
Intercept	2.287	1	2.287	3291.412	.000
VOLUME	1.288	2	.644	926.468	.000
FREQUENCY	2.403	3	.801	1152.723	.000
VOLUME * FREQUENCY	4.443	6	.740	1065.633	.000
Error	.409	588	.001		
Total	10.829	600			
Corrected Total	8.542	599			

a R Squared = .477 (Adjusted R Squared = .468)

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Post Hoc Tests: VOLUME

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I) VOLUME	(J) VOLUME	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
60dB	60dB					
	80dB	.00584(*)	.002636	.027	.00067	.01102
	100dB	-.09522(*)	.002636	.000	-.10039	-.09004
80dB	60dB	-.00584(*)	.002636	.027	-.01102	-.00067
	80dB					
	100dB	-.10106(*)	.002636	.000	-.10624	-.09588
100dB	60dB	.09522(*)	.002636	.000	.09004	.10039
	80dB	.10106(*)	.002636	.000	.09588	.10624
	100dB					

Based on observed means. *The mean difference is significant at the .05 level.

Post Hoc Tests: FREQUENCY

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I) FREQUENCY	(J) FREQUENCY	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
500Hz	500Hz					
	1kHz	.14922(*)	.003044	.000	.14324	.15520
	5kHz	.15027(*)	.003044	.000	.14430	.15625
	10kHz	.13760(*)	.003044	.000	.13162	.14358

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Post Hoc Tests: FREQUENCY

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I) FREQUENCY	(J) FREQUENCY	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1kHz	500Hz	-.14922(*)	.003044	.000	-.15520	-.14324
	1kHz					
	5kHz	.00105	.003044	.729	-.00492	.00703
	10kHz	-.01162(*)	.003044	.000	-.01760	-.00564
5kHz	500Hz	-.15027(*)	.003044	.000	-.15625	-.14430
	1kHz	-.00105	.003044	.729	-.00703	.00492
	5kHz					
	10kHz	-.01267(*)	.003044	.000	-.01865	-.00670
10kHz	500Hz	-.13760(*)	.003044	.000	-.14358	-.13162
	1kHz	.01162(*)	.003044	.000	.00564	.01760
	5kHz	.01267(*)	.003044	.000	.00670	.01865
	10kHz					

Based on observed means. *The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของ
แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* ระหว่างชุดการทดลอง ด้วย
ลักษณะเลียงดั่งแบบต่อเนื่อง ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง

Univariate Analysis of Variance: Between-Subjects Factors

		Value Label	N
VOLUME	1	60dB	200
	2	80dB	200
	3	100dB	200
FREQUENCY	1	500Hz	150
	2	1kHz	150
	3	5kHz	150
	4	10kHz	150

Descriptive Statistics, Dependent Variable: Optical Density

VOLUME	FREQUENCY	Mean	Std. Deviation	N
60dB	500Hz	-.03476	.014232	50
	1kHz	-.05856	.021844	50
	5kHz	-.01542	.012627	50
	10kHz	-.03824	.038954	50
	Total	-.03675	.028559	200
80dB	500Hz	-.05038	.018972	50
	1kHz	-.06804	.019609	50
	5kHz	-.02050	.018699	50
	10kHz	-.05252	.013805	50
	Total	-.04786	.024775	200
100dB	500Hz	.03136	.034002	50
	1kHz	-.01432	.018137	50
	5kHz	-.01904	.014620	50
	10kHz	.02510	.030562	50

ตารางผนวกที่ ๗4 (ต่อ)

Descriptive Statistics, Dependent Variable: Optical Density

VOLUME	FREQUENCY	Mean	Std. Deviation	N
100dB	Total	.00578	.034100	200
	500Hz	-.01793	.042765	150
	1kHz	-.04697	.030714	150
Total	5kHz	-.01832	.015566	150
	10kHz	-.02189	.044882	150
	Total	-.02628	.037367	600

Tests of Between-Subjects Effects, Dependent Variable: Optical Density

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.529(a)	11	.048	91.973	.000
Intercept	.414	1	.414	792.355	.000
VOLUME	.321	2	.160	306.542	.000
FREQUENCY	.087	3	.029	55.529	.000
VOLUME * FREQUENCY	.121	6	.020	38.673	.000
Error	.307	588	.001		
Total	1.251	600			
Corrected Total	.836	599			

a R Squared = .477 (Adjusted R Squared = .468)

ตารางผนวกที่ ๗4 (ต่อ)

Post Hoc Tests: VOLUME

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I)	(J)	Mean	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
VOLUME	VOLUME	Difference (I-J)			Lower Bound	Upper Bound
60dB	60dB					
	80dB	.01111(*)	.002287	.000	.00662	.01561
	100dB	-.04252(*)	.002287	.000	-.04701	-.03803
80dB	60dB	-.01111(*)	.002287	.000	-.01561	-.00662
	80dB					
	100dB	-.05364(*)	.002287	.000	-.05813	-.04914
100dB	60dB	.04252(*)	.002287	.000	.03803	.04701
	80dB	.05364(*)	.002287	.000	.04914	.05813
	100dB					

Based on observed means. *The mean difference is significant at the .05 level.

Post Hoc Tests: FREQUENCY

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I)	(J)	Mean	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
FREQUENCY	FREQUENCY	Difference (I-J)			Lower Bound	Upper Bound
500Hz	500Hz					
	1kHz	.02905(*)	.002640	.000	.02386	.03423
	5kHz	.00039	.002640	.882	-.00479	.00558
	10kHz	.00396	.002640	.134	-.00123	.00915

ตารางผนวกที่ ๗4 (ต่อ)

Post Hoc Tests: FREQUENCY

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I) FREQUENCY	(J) FREQUENCY	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1kHz	500Hz	-.02905(*)	.002640	.000	-.03423	-.02386
	1kHz					
	5kHz	-.02865(*)	.002640	.000	-.03384	-.02347
	10kHz	-.02509(*)	.002640	.000	-.03027	-.01990
5kHz	500Hz	-.00039	.002640	.882	-.00558	.00479
	1kHz	.02865(*)	.002640	.000	.02347	.03384
	5kHz					
	10kHz	.00357	.002640	.177	-.00162	.00875
10kHz	500Hz	-.00396	.002640	.134	-.00915	.00123
	1kHz	.02509(*)	.002640	.000	.01990	.03027
	5kHz	-.00357	.002640	.177	-.00875	.00162
	10kHz					

Based on observed means. *The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบความแตกต่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) ของ
 แบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* ระหว่างชุดการทดลอง ด้วย
 ลักษณะเสียงดังแบบเป็นจังหวะ ณ เวลาการบ่มที่ 4 ชั่วโมง

Univariate Analysis of Variance: Between-Subjects Factors

		Value Label	N
VOLUME	1	60dB	200
	2	80dB	200
	3	100dB	200
FREQUENCY	1	500Hz	150
	2	1kHz	150
	3	5kHz	150
	4	10kHz	150

Descriptive Statistics, Dependent Variable: Optical Density

VOLUME	FREQUENCY	Mean	Std. Deviation	N
60dB	500Hz	.00366	.029503	50
	1kHz	-.01028	.022523	50
	5kHz	.00340	.027430	50
	10kHz	-.07958	.029022	50
	Total	-.02070	.043878	200
80dB	500Hz	.39926	.061978	50
	1kHz	-.00562	.031015	50
	5kHz	.03014	.023808	50
	10kHz	-.05142	.018537	50
	Total	.09309	.183441	200
100dB	500Hz	.45582	.062171	50
	1kHz	.05642	.046972	50
	5kHz	.04972	.048799	50
	10kHz	-.02524	.026098	50

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Descriptive Statistics, Dependent Variable: Optical Density

VOLUME	FREQUENCY	Mean	Std. Deviation	N
100dB	Total	.13418	.194780	200
	500Hz	.28625	.208693	150
	1kHz	.01351	.046253	150
Total	5kHz	.02775	.039747	150
	10kHz	-.05208	.033311	150
	Total	.06886	.169476	600

Tests of Between-Subjects Effects, Dependent Variable: Optical Density

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	16.331(a)	11	1.485	999.765	.000
Intercept	2.845	1	2.845	1915.640	.000
VOLUME	2.575	2	1.287	866.983	.000
FREQUENCY	9.996	3	3.332	2243.662	.000
VOLUME * FREQUENCY	3.761	6	.627	422.078	.000
Error	.873	588	.001		
Total	20.049	600			
Corrected Total	17.204	599			

a R Squared = .477 (Adjusted R Squared = .468)

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Post Hoc Tests: VOLUME

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I)	(J)	Mean	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
VOLUME	VOLUME	Difference (I-J)			Lower Bound	Upper Bound
60dB	60dB					
	80dB	-.11379(*)	.003854	.000	-.12136	-.10622
	100dB	-.15488(*)	.003854	.000	-.16245	-.14731
80dB	60dB	.11379(*)	.003854	.000	.10622	.12136
	80dB					
	100dB	-.04109(*)	.003854	.000	-.04866	-.03352
100dB	60dB	.15488(*)	.003854	.000	.14731	.16245
	80dB	.04109(*)	.003854	.000	.03352	.04866
	100dB					

Based on observed means. *The mean difference is significant at the .05 level.

Post Hoc Tests: FREQUENCY

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence Interval	
FREQUENCY	FREQUENCY	Difference (I-J)	Error		Lower Bound	Upper Bound
500Hz	500Hz	.15488(*)	.003854	.000	.14731	.16245
	1kHz	.04109(*)	.003854	.000	.03352	.04866
	5kHz					
	10kHz	.15488(*)	.003854	.000	.14731	.16245

ตารางผนวกที่ ๗5 (ต่อ)

Post Hoc Tests: FREQUENCY

Multiple Comparisons. Dependent Variable: Optical Density

LSD

(I) FREQUENCY	(J) FREQUENCY	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1kHz	500Hz	.04109(*)	.003854	.000	.03352	.04866
	1kHz					
	5kHz	-.01425(*)	.004450	.001	-.02299	-.00551
	10kHz	.06559(*)	.004450	.000	.05685	.07433
5kHz	500Hz	-.25849(*)	.004450	.000	-.26723	-.24975
	1kHz	.01425(*)	.004450	.001	.00551	.02299
	5kHz					
	10kHz	.07983(*)	.004450	.000	.07109	.08857
10kHz	500Hz	-.33833(*)	.004450	.000	-.34707	-.32959
	1kHz	-.06559(*)	.004450	.000	-.07433	-.05685
	5kHz	-.07983(*)	.004450	.000	-.08857	-.07109
	10kHz					

Based on observed means. *The mean difference is significant at the .05 level.



ตัวอย่าง การคำนวณกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* ที่ได้รับความถี่เสียงลักษณะดังแบบต่อเนื่อง 500 Hz, 60 dB(C)

กลุ่มควบคุม

$$\begin{aligned} \text{Growth Yield (mg cells/mg TOC removed)} &= \frac{X_4 - X_0}{S_{0(\text{TOC})} - S_{4(\text{TOC})}} \\ &= \frac{230.933 - 44.920}{723.890 - 845.711} \\ &= 0.3750 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Growth Yield (mg cells/mg COD removed)} &= \frac{X_4 - X_0}{S_{0(\text{COD})} - S_{4(\text{COD})}} \\ &= \frac{230.933 - 44.920}{1643.200 - 750.320} \\ &= 0.2083 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการโตจำเพาะ (hr}^{-1}\text{)} &= \frac{\frac{X_4 - X_0}{t}}{X} \\ &= \frac{\frac{230.933 - 44.920}{4}}{137.925} \\ &= 0.3372 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (mg TOC removed/mg cells-hr)} &= \frac{\frac{S_{0(\text{TOC})} - S_{4(\text{TOC})}}{t}}{X} \end{aligned}$$

$$= \frac{723.890 - 227.845}{4} = 137.925$$

$$= 0.8991$$

$$\text{อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (mg COD removed/mg cells-hr)} = \frac{S_{0(COD)} - S_{4(COD)}}{\frac{t}{X}}$$

$$= \frac{1643.200 - 750.320}{4} = 137.925$$

$$= 1.6184$$

กลุ่มทดลอง

$$\text{Growth Yield (mg cells/mg TOC removed)} = \frac{X_4 - X_0}{S_{0(TOC)} - S_{4(TOC)}}$$

$$= \frac{222.733 - 44.920}{723.890 - 249.711}$$

$$= 0.3750$$

$$\text{Growth Yield (mg cells/mg COD removed)} = \frac{X_4 - X_0}{S_{0(COD)} - S_{4(COD)}}$$

$$= \frac{222.733 - 44.920}{1643.200 - 789.680}$$

$$= 0.2083$$

อัตราการโตจำเพาะ (hr^{-1})

$$= \frac{\frac{X_4 - X_0}{t}}{X}$$

$$= \frac{\frac{222.733 - 44.920}{4}}{133.825}$$

$$= 0.3322$$

อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (mg TOC removed/mg cells-hr)

$$= \frac{\frac{S_{0(\text{TOC})} - S_{4(\text{TOC})}}{t}}{X}$$

$$= \frac{\frac{723.890 - 249.711}{4}}{133.825}$$

$$= 0.8858$$

อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (mg COD removed/mg cells-hr)

$$= \frac{\frac{S_{0(\text{COD})} - S_{4(\text{COD})}}{t}}{X}$$

$$= \frac{\frac{1643.200 - 789.680}{4}}{133.825}$$

$$= 1.5945$$

ตัวอย่าง การคำนวณค่าความแตกต่างของค่าจุลศาสตร์ต่างๆ ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง
ของแบคทีเรียแกรมบวกสายพันธุ์ *Bacillus thuringiensis* ที่ได้รับความถี่เสียงลักษณะดัง
แบบต่อเนื่อง 500 Hz, 60 dB(C)

$$\begin{aligned} \text{ค่าความแตกต่าง (\%)} &= \frac{\text{กลุ่มทดลอง} - \text{กลุ่มควบคุม}}{\text{กลุ่มควบคุม}} \times 100 \\ \\ \text{ค่าความแตกต่าง Growth Yield (\%TOC)} &= \frac{0.3750 - 0.3750}{0.3750} \times 100 \\ &= 0.000\% \\ \\ \text{ค่าความแตกต่าง Growth Yield (\%COD)} &= \frac{0.2083 - 0.2083}{0.2083} \times 100 \\ &= 0.000\% \\ \\ \text{ค่าความแตกต่างอัตราการโตจำเพาะ (\%)} &= \frac{0.3322 - 0.3372}{0.3372} \times 100 \\ &= -1.480\% \\ \\ \text{ค่าความแตกต่างอัตราการใช้อาหารจำเพาะ (\%COD)} &= \frac{1.5945 - 1.6184}{1.6184} \times 100 \\ &= -1.480\% \\ \\ \text{ค่าความแตกต่างอัตราการใช้อาหารจำเพาะ (\%TOC)} &= \frac{0.8858 - 0.8991}{0.8991} \times 100 \\ &= -1.480\% \end{aligned}$$

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุภาภรณ์ พันวิลัย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	09 พฤศจิกายน พ.ศ.2526
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	งานวิจัยเรื่อง การคัดเลือกตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับการ ยิดเกาะของสาหร่าย <i>Phormidium</i> sp. นำเสนอและตีพิมพ์ ผลงานในการประชุมวิชาการคณะวิทยาศาสตร์ ครั้งที่ 4 ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนมูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์พระบาทสมเด็จพระ ปกเกล้าเจ้าอยู่หัว และสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ทุนผู้ช่วยสอน บัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีภาคปลายปี การศึกษา 2553 ทุนวิจัยระดับบัณฑิต เพื่อการตีพิมพ์ผลงานใน วารสารวิชาการระดับนานาชาติประจำปี 2553