

บรรณานุกรม

- กรุงเทพมหานคร, สำนักการระบายน้ำ. (2549). คุณภาพน้ำคลองเป็ พ.ศ. 2545 - 2548 [ออนไลน์]. ได้จาก: http://dds.bma.go.th/News_dds/information/WQMO_service1.htm
- กรมควบคุมมลพิษ และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2546). เล่ม 2 รายละเอียดสนับสนุนเกณฑ์แนะนำการออกแบบระบบรวบรวมน้ำเสียและโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำของชุมชน. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. (2544). การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- American Public Health Association (APHA). (2005). Standard Methods for the examination of water and wastewater. (21th ed.). APHA-AWWA-WEF. Washington D.C.
- Artiga, P., Gonzalez, F., Mosquera-Corral, A., Campos, J. L., Garrido, J. M., Ficara, E., and Mendez, R. (2005). Multiple analysis reprogrammable titration analyser for the kinetic characterization of nitrifying and autotrophic denitrifying biomass. *J. Biochem. Eng.* 26: 176-183.
- Baetens, D. (2001). Enhanced biological phosphorus removal: Modeling and experimental design. Ph.D. Thesis, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Belgium.
- Barends, D. H. J. G., Salem, S., van der Roest, H. F., and van Loosdrecht, M. C. M. (2005). Boosting nitrification with the BABE technology. *Water Sci. Technol.* 52(4): 63-70.
- Cech, J. S., Chudoba, J., and Grau, P. (1984). Determination of kinetic constants of activated sludge microorganisms. *Water Sci. Technol.* 17: 259-272.
- Comas matas, J. (2000). Development, implementation and evaluation of an activated sludge supervisory system for the Granoller WWTP. Ph.D. Thesis, Department of Chemical and Agricultural Engineering and Agrifood Technology, University of Girona, Spain.
- Dosta, J. (2007). Operation and model description of advanced biological nitrogen removal treatments of highly ammonium loaded wastewater. Ph.D. Thesis, Department d'Enginyeria Quimica, Universitat Autònoma de Barcelona, Spain.

- Dricks, K., Pind, P. f., Mosbaek, H., and Henze, M. (1999). Yield determination by respirometry- The possible influence of storage under aerobic conditions in activated sludge. Water SA. 25(1): 69-74.
- Ficara, E., Musumeci, A., and Rozzi, A. (2000). Comparison and combination of titrimetric and respirometric techniques to estimate nitrification kinetics parameters Water SA. 26(2): 217-224.
- Foster, M. H., and Whiteman, R. (2006). Bioaugmentation aids wastewater systems [On-line]. Available: <http://www.winddriven.com/bioaug.html>
- Fux, C., Boehler, M., Huber, P., Brunner, I., and Siegrist, H. (2002). Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant. J. of Biotechnology. 99: 295-306.
- Gapes, D., and Keller, J. (2001). Analysis of biological wastewater treatment processes using multicomponent gas phase mass balancing. Biotechnol. Bioeng. 76: 361-375.
- Gerardi, M. H. (2002). Nitrification and denitrification in the activated sludge process. New York: John Wiley & Sons.
- Grady, C. P. L., Daigger, G. T., and Lim, H. C. (1999). Biological wastewater treatment. (2nd ed.). New York: Marcel Dekker.
- Guisasola A. (2005). Modelling biological organic matter and nutrient removal processes from wastewater using respirometric and titrimetric techniques. Ph.D. Thesis, Department d'Enginyeria Quimica, Universitat Autònoma de Barcelona, Spain.
- Gut, L. (2006). Assessment of a partial nitrification/Anammox system for nitrogen removal. Ph.D. Thesis, Department of Land and Water Resource Engineering, KTH-Royal Institute of Technology, Sweden.
- Head, M. A., and Oleszkiewicz, J. A. (2004). Bioaugmentation for nitrification at cold temperatures. Wat. Res. 38: 523-530.
- Head, M. A., and Oleszkiewicz, J. A. (2005). Bioaugmentation with nitrifying bacteria acclimated to different temperatures. J. Environ. Eng. 131(7): 1046-1051.
- Hellinga, C., Schellen, A. A. J. C., Mulder, J. W., van Loosdrecht, M. C. M., and Heijnen, J. J. (1998). The Sharon process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich wastewater. Wat. Sci. Technol. 37(9): 135-142.

- Henze, M., Grady, C.P.L., Gujer, W., Marais, G.V.R., and Matsuo, T. (2000). Activated sludge models: ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Scientific and Technical Reports No. 9. London: TJ International.
- Henze, M., Harremoes, P., Jansen, J. C., and Arvin, E. (2002). Wastewater treatment: Biological and chemical processes. (3th ed.). Berlin: Springer.
- Jeppsson, U. (1996). Modelling aspects of wastewater treatment process. Ph.D. Thesis, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology, Sweden.
- Janus, H.M., and van der Roest, H.F. (1997). Don't reject the idea of treating reject water. Water Sci. Technol. 35(10): 27-34.
- Jubany, I. (2007). Operation, modelling and automatic control of complete and partial nitrification of highly concentrated ammonium wastewater. Ph.D. Thesis, Department d'Enginyeria Quimica, Universitat Autònoma de Barcelona, Spain.
- Kappeler, J., and Gujer, W. (1992). Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modelling. Water Sci. Technol. 25(6): 125-139.
- Kos, P. (1998). Short SRT (solids retention time) nitrification process/flowsheet. Water Sci. Technol. 38(1): 23-29.
- Manser, R., Gujer, W., and Siegrist, H. (2006). Decay processes of nitrifying bacteria in Biological wastewater treatment system. Wat. Res. 40: 2416-2426.
- Marsili-Libelli, S., and Tabani, F. (2002). Accuracy analysis of a respirometer for activated sludge dynamic modelling. Wat. Res. 36: 1181-1192.
- Metcalf, and Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. (4th ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Muller, A. W., Wentzel, M. C. and Ekama, G. A. (2004). Experimental determination of the heterotroph anoxic yield in anoxic-aerobic activated sludge systems treating municipal wastewater. Water SA. 30(5):7-12.
- Nopens, I., Capalozza, C., and Vanrolleghem, P. (2001). Stability analysis of a synthetic municipal wastewater. Technical report. Faculty of Bioscience Engineering. Ghent University. Belgium [On-line]. Available: <http://www.biomath.ugent.be/~peter/ftp/pvr334.pdf>

- Orhon, D. and Artan, N. (1994). Modelling of activated sludge systems. Pennsylvania: Technomic.
- Penya-Roja, J. M., Seco, A., Ferrer, J., and Serralta, J. (2002). Calibration and validation of activated sludge model no. 2d for Spanish municipal wastewater. Environmental Technology. 23: 849–862.
- Petersen, B. (2000). Calibration, identifiability and optimal experimental design of activated sludge models. Ph.D. Thesis, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Belgium.
- Plaza, E., Trela, J., and Hultman, B. (2001). Impact of seeding with nitrifying bacteria on nitrification process efficiency. Water Sci. Technol. 43(1): 155-164.
- Qasim, S. R. (1999). Wastewater treatment plants: Planning, design and operation. Lancaster: Technomic.
- Rosen, B., and Huijbregsen, C. (2003). The ScanDeNi process could turn an existing under-performing activated sludge plant into an asset. Water Sci. Technol. 47(11): 31-36.
- Salem, S., Berends, D., Heijnen, J. J., and van Loosdrecht, M. C. M. (2002). Model-based evaluation of a new upgrading concept for N-removal. Water Sci. Technol. 45(6): 169-176.
- Salem, S., Berends, D. H. J. G., van Loosdrecht, M. C. M., and Heijnen, J. J. (2003). Bio-augmentation by nitrification with return sludge. Wat. Res. 37: 1794-1804.
- Sin, G. (2004). Systematic calibration of activated sludge models. Ph.D. Thesis, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Belgium.
- Spanjers, H., and Vanrolleghem (1995). Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge. Water Sci. Technol. 31(2): 105-114.
- Spanjers, H., Vanrolleghem, P.A., Olsson, G., and Dold, P.L. (1998). Respirometry in control of the activated sludge process: Principles. IAWQ Scientific and Technical Report No. 7. London: J.W. Arrowsmith.
- Stenstrom, M. K., and Andrews, J. F. (1979). Real-time control of activated sludge process. J. the Environ. Eng. Division. 105(EE2): 245-260.
- Water Environment Federation (WEF), and American Society of Civil Engineers (ASCE)/ Environmental and Water Resource Institute (EWRI). (2006). Biological nutrient removal (BNR) operation in wastewater treatment plants. New York: McGraw-Hill.

- van Kempen, R., Mulder, J. W., Uijterlinde, C. A., and van Loosdrecht, M. C. M. (2001). Overview: full scale experience of the SHARON-process treatment of rejection water of digested sludge dewatering. Water Sci. Technol. 44(1): 145-152.
- van Loosdrecht, M. C. M., and Salem, S. (2006). Biological treatment of sludge digester liquids. Water Sci. Technol. 53(12): 10-20.
- Viraj de Silva, D. G., and Rittman, B. E. (2000). Interpreting the response to loading changes in a mixed-culture completely stirred tank reactor. Water Environ. Res. 72(5): 566-573.
- Vanrolleghem, P. A., and Spanjers, H. (1998). A hybrid respirometric method for more reliable assessment of activated sludge model parameters. Water Sci. Technol. 37(12): 237-246.
- Volcke, E. I. P. (2006). Modelling, analysis and control of partial nitrification in a SHARON reactor. Ph.D. Thesis, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Belgium.
- Yuan, Z., Bogaert, H., Leten, J., and Verstraete, W. (2000). Reducing the size of a nitrogen removal activated sludge plant by shortening the retention time of inert solids via sludge storage. Wat. Res. 34(2): 539-549.

ภาคผนวก ก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแยกที่เวเต็ดสลัดจ์ที่ 1 (ASM1)

ตารางที่ ก1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแยกที่เวเต็ดสัจที่ 1 (Henze *et al.*, 2000)

Component		$i \rightarrow$	1	2	3	4
j	Process \downarrow		S_1	S_5	X_1	X_5
1	Aerobic growth of heterotrophs			$-\frac{1}{Y_H}$		
2	Anoxic growth of heterotrophs			$-\frac{1}{Y_H}$		
3	Aerobic growth of autotrophs					
4	Decay of heterotrophs					$1-f_p$
5	Decay of autotrophs					$1-f_p$
6	Ammonification of soluble organic nitrogen					
7	Hydrolysis of slowly biodegradable substrate			1		-1
8	Hydrolysis of organic nitrogen					
Observed Conversion rate ($ML^{-3}T^{-1}$)		$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$				
Stoichiometric Parameter: Heterotrophic yield: Y_H Autotrophic yield: Y_A Fraction of biomass yielding particulate products: f_p Mass N/Mass COD in biomass: i_{XB} Mass N/Mass COD in products from biomass: i_{XP}		Soluble inert organic matter ($M(COD)L^{-3}$)	Readily biodegradable substrate ($M(COD)L^{-3}$)	Particulate inert organic matter ($M(COD)L^{-3}$)	Slowly biodegradable substrate ($M(COD)L^{-3}$)	

ตารางที่ ก1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแยกแยะสิ่งแวดล้อมที่ 1 (Henze *et al.*, 2000)
(ต่อ)

Component		$i \rightarrow$	5	6	7	8
j	Process ↓		X_{BH}	X_{BA}	X_P	S_O
1	Aerobic growth of heterotrophs		1			$-\frac{1 - Y_H}{Y_H}$
2	Anoxic growth of heterotrophs		1			
3	Aerobic growth of autotrophs			1		$-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$
4	Decay of heterotrophs		-1		f_p	
5	Decay of autotrophs			-1	f_p	
6	Ammonification of soluble organic nitrogen					
7	Hydrolysis of slowly biodegradable substrate					
8	Hydrolysis of organic nitrogen					
Observed Conversion rate ($ML^{-3}T^{-1}$)		$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$				
Stoichiometric Parameter: Heterotrophic yield: Y_H Autotrophic yield: Y_A Fraction of biomass yielding particulate products: f_p Mass N/Mass COD in biomass: i_{XB} Mass N/Mass COD in products from biomass: i_{XP}		Active heterotrophic biomass ($M(COD)L^{-3}$)	Active autotrophic biomass ($M(COD)L^{-3}$)	Particulate products arising from biomass decay ($M(COD)L^{-3}$)	Oxygen (negative COD) ($M(-COD)L^{-3}$)	

ตารางที่ ก1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแยกทิวเต็ดสลัดจ์ที่ 1 (Henze *et al.*, 2000)

(ต่อ)

Component		$i \rightarrow$	9	10	11	12	13
j	Process ↓		S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}
1	Aerobic growth of heterotrophs			$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$
2	Anoxic growth of heterotrophs		$-\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}$	$-i_{XB}$			$\frac{1 - Y_H}{14 \cdot 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$
3	Aerobic growth of autotrophs		$-\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$
4	Decay of heterotrophs					$i_{XB} f_P i_{XP}$	
5	Decay of autotrophs					$i_{XB} f_P i_{XP}$	
6	Ammonification of soluble organic nitrogen			1	-1		$\frac{1}{14}$
7	Hydrolysis of slowly biodegradable substrate						
8	Hydrolysis of organic nitrogen				1	-1	
Observed Conversion rate ($ML^{-3}T^{-1}$)		$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$					
Stoichiometric Parameter: Heterotrophic yield: Y_H Autotrophic yield: Y_A Fraction of biomass yielding particulate products: f_P Mass N/Mass COD in biomass: i_{XB} Mass N/Mass COD in products from biomass: i_{XP}		Nitrate and nitrite nitrogen ($M(N)L^{-3}$)	$NH_4^+ + NH_3$ nitrogen ($M(N)L^{-3}$)	Soluble biodegradable organic nitrogen ($M(N)L^{-3}$)	Particulate biodegradable organic nitrogen ($M(N)L^{-3}$)	Alkaline-Molar units	

ตารางที่ ก1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแยกที่เวเต็คสลัจจ์ที่ 1 (Henze *et al.*, 2000)
(ต่อ)

Component		$i \rightarrow$	Process rate, ρ_j
j	Process ↓		
1	Aerobic growth of heterotrophs		$\mu_{\max H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_S + S_O} X_{BH}$
2	Anoxic growth of heterotrophs		$\eta_g \mu_{\max H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} X_{BH}$
3	Aerobic growth of autotrophs		$\mu_{\max A} \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \frac{S_O}{K_{OA} + S_O} X_{BA}$
4	Decay of heterotrophs		$b_H X_{BH}$
5	Decay of autotrophs		$b_A X_{BA}$
6	Ammonification of soluble organic nitrogen		$k_a S_{ND} X_{BH}$
7	Hydrolysis of slowly biodegradable substrate		$k_b \frac{(X_S / X_{BH})}{K_X + (X_S / X_{BH})} X_{XB}$ $\left[\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{OH} + S_{NO}} \right]$
8	Hydrolysis of organic nitrogen		$\rho_7 (X_{ND} X_S)$
Observed Conversion rate (ML ⁻³ T ⁻¹)			
Stoichiometric Parameter:		Kinetic parameters:	
Heterotrophic yield: Y_H		Heterotrophic growth and decay: $\mu_{\max H}, K_S, K_{OH}, K_{NO}, b_H$	
Autotrophic yield: Y_A		Autotrophic growth and decay: $\mu_{\max A}, K_{NH}, K_{OA}, b_A$	
Fraction of biomass yielding particulate products: f_p		Correction factor for anoxic growth of heterotrophs: η_g	
Mass N/Mass COD in biomass: i_{XB}		Ammonification: k_a	
Mass N/Mass COD in products from biomass: i_{XP}		Hydrolysis: k_b, K_X	
		Correction factor for anoxic hydrolysis: η_h	

ภาคผนวก ข

องค์ประกอบน้ำเสียชุมชนตั้งคราะห์ความเข้มข้นสูง

ตารางที่ ข1 องค์ประกอบน้ำเลี้ยงชุมชนสังเคราะห์ความเข้มข้นสูง

รายการ	น้ำหนัก (มิลลิกรัม/ลิตร)
โซเดียมอะซิเตท ($C_2H_3NaO_2$)	1,450
กลูโคส ($C_6H_{12}O_6$)	800
แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)	1,250
โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)	350
ยูเรีย ($CO(NH_2)_2$)	450
โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)	2,200
แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)	400
แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)	120
นมผง (Milk powder)	300
แป้งข้าวเจ้า (Rice powder)	2,200
นมสด (Fresh milk)	145
น้ำมันพืช (Soy oil)	22
สารละลายธาตุที่จำเป็น (Trace elements)	2 mL/L
ความเข้มข้นของซีโอดีเฉลี่ย (COD)	4,415
ความเข้มข้นของทีเคเอ็นเฉลี่ย (TKN)	570
ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเฉลี่ย (TP)	76

ตารางที่ ข2 องค์ประกอบสารละลายธาตุที่จำเป็น

รายการ	น้ำหนัก (มิลลิกรัม/ลิตร)
เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)	50
กรดบอริก (H_3BO_3)	45
คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$)	10
โปแตสเซียมไอโอไดน์ (KI)	10
แมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$)	30
ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)	30
โคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2$)	90
นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2$)	10

ภาคผนวก ค

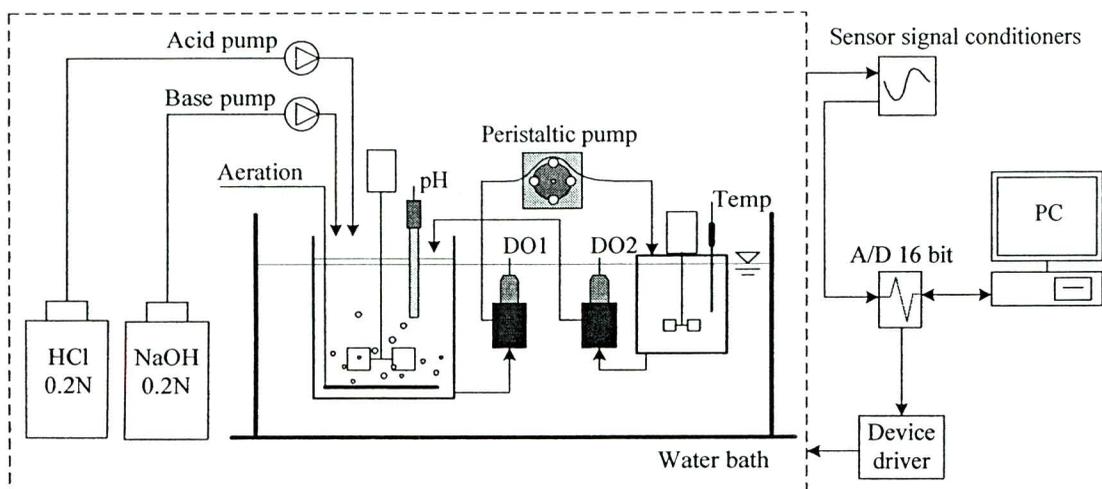
วิธีการทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนโดยเครื่องวัดอัตราการหายใจ

วิธีการทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนโดยเครื่องวัดอัตราการหายใจ

ค1. รูปแบบอุปกรณ์

เครื่องวัดอัตราการใช้ออกซิเจนที่ใช้ในการทดลอง เรียกว่า เครื่องวัดอัตราการหายใจแบบอัลติเมทไฮบริด (Ultimate hybrid respirometer) (รูปที่ ค1) ประกอบด้วยภาชนะเดิมอากาศและภาชนะวัดอัตราการหายใจปริมาตร 1.86 และ 0.84 ลิตร โดยที่ภาชนะวัดอัตราการหายใจจะปิดสนิทเพื่อป้องกันการซึมผ่านของอากาศจากภายนอกเพราะอาจจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดต่อการวัดอัตราการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในสลักจ์ได้

เพื่อให้เกิดการผสมที่เพียงพอและทั่วถึงจึงได้มีการติดตั้งเครื่องกวนที่สามารถปรับค่าความเร็วใบพัดได้ทั้งสองภาชนะ เครื่องสูบลมเวียนสลักจ์ระหว่างภาชนะเดิมอากาศและภาชนะวัดอัตราการหายใจเป็นชนิดเพอริสตาลติก เครื่องเติมกรดและด่างเป็นชนิดไดอะแฟรม ภาชนะเดิมอากาศ ภาชนะวัดการหายใจ และท่อส่งสลักจ์ ติดตั้งอยู่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 28°C เพื่อลดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภาชนะเดิมอากาศและภาชนะวัดอัตราการหายใจ



รูปที่ ค1 รูปแบบเครื่องวัดอัตราการหายใจแบบอัลติเมทไฮบริด

ข้าววัดออกซิเจนจำนวน 2 ข้าววัด เป็นชนิดโพลาริกราฟิก การควบคุมค่า pH ของระบบได้ติดตั้งข้าววัด pH ที่สถานะเดิมอากาศกำหนดค่า pH ในสถานะเดิมอากาศเท่ากับ 7.5 ± 0.03 (ค่า pH สำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียนำร่อง) ค่า pH สำหรับการทดลองสามารถเลือกกำหนดช่วงระหว่าง 7.5 - 8.3 ซึ่งเป็นช่วงของค่า pH ที่ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ดีที่สุดในขณะทำการทดลอง ถ้าค่า pH อยู่นอกช่วงค่าที่กำหนด เครื่องเติมสารเคมีจะเติมสารละลายกรด HCl (0.2N) หรือด่าง NaOH (0.2N) เพื่อรักษาระดับค่า pH ให้คงที่

การทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนเริ่มต้นด้วยการเติมตัวอย่างสลัดจ์ลงในเครื่องวัดอัตราการหายใจ ปริมาตร 2.7 ลิตร และเติมอากาศจนกระทั่งสลัดจ์เข้าสู่สภาวะการหายใจแบบเฮเทอโรจิโนส ในระหว่างนั้นเติมสารอาหารที่ย่อยได้ง่ายให้กับตัวอย่างสลัดจ์ เช่น อะซิเตทหรือแอมโมเนียม พร้อมกับทำการบันทึกค่าออกซิเจน ค่า pH และอัตราการใช้ออกซิเจนทุก 3 วินาที จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง

ก2. การสอบเทียบข้าววัด

ก2.1 การสอบเทียบข้าววัดอุณหภูมิ

ข้าววัดอุณหภูมิเป็นข้าววัดชนิดแรกที่ต้องทำการสอบเทียบ เนื่องจากการสอบเทียบข้าววัด ได้แก่ ข้าววัดออกซิเจน และข้าววัดพีเอช ต้องดำเนินการภายใต้อุณหภูมิของน้ำที่กำหนดไว้สำหรับควบคุมการทดลอง (28°C) หรืออุณหภูมิมาตรฐานที่อ้างอิงตามข้อกำหนดไว้ในสารละลายมาตรฐานที่ใช้สำหรับการสอบเทียบข้าววัด ดังนั้นการสอบเทียบข้าววัดอุณหภูมิจึงถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญอย่างยิ่งและเป็นการสอบเทียบอันดับแรกที่จะส่งผลต่อค่าความถูกต้องของข้าววัดอื่นที่เหลือที่ต้องใช้อุณหภูมิเป็นค่าอ้างอิงหรือเป็นตัวแปรในการคำนวณ ข้าววัดอุณหภูมิที่ใช้ในชุดเครื่องมือดังกล่าวมีทั้งหมด 2 ข้าววัด ได้แก่ ข้าววัดอุณหภูมิน้ำซึ่งเป็นข้าววัดชนิดแพลตตินัม 100 โอห์ม (Pt-100) และข้าววัดอุณหภูมิอากาศซึ่งเป็นชนิดเซมิคอนดักเตอร์และใช้ข้อมูลอ้างอิงอุณหภูมิจากโรงงานผู้ผลิตข้าววัดชนิดดังกล่าว

การดำเนินการสอบเทียบข้าววัดอุณหภูมิของน้ำได้กำหนดตำแหน่งอุณหภูมิอ้างอิง 3 ตำแหน่ง ช่วงระหว่าง $0 - 50^{\circ}\text{C}$ การกำหนดช่วงการสอบเทียบแคบเพื่อลดความผิดพลาดจากการวัดได้มากขึ้น เช่น อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดลอง 28°C ได้กำหนดตำแหน่งสำหรับการสอบเทียบทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 20, 30 และ 40°C โดยเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำมาใช้อ้างอิงในการสอบเทียบเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิที่ได้มาตรฐานจากห้องปฏิบัติการ

ค2.2 การสอบเทียบขั้ววัดออกซิเจน

ขั้ววัดออกซิเจนที่ใช้ในเครื่องวัดอัตราการหายใจมีทั้งหมด 2 ขั้ววัด ติดตั้งในตำแหน่งก่อนเข้าและออกจากภาชนะวัดอัตราการหายใจขั้ววัดออกซิเจนเป็นชนิดโพลาโรกราฟิก การสอบเทียบขั้ววัดออกซิเจนต้องอาศัยข้อมูลสภาพแวดล้อมอื่น ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิของน้ำที่ทำการสอบเทียบ ความดันบรรยากาศ ซึ่งในระบบเครื่องวัดการหายใจมีขั้ววัดดังกล่าวติดตั้งไว้แล้ว การสอบเทียบขั้ววัดออกซิเจนได้กำหนดตำแหน่งขั้ววัดออกซิเจนอ้างอิง 2 ตำแหน่ง คือ ที่ตำแหน่งจุดอิมมัลของออกซิเจนสูงสุด ณ อุณหภูมิน้ำ 28°C และที่ตำแหน่งระดับออกซิเจนเท่ากับศูนย์ (0.0)

ค2.3 การสอบเทียบขั้ววัดพีเอช

ขั้ววัดพีเอช เป็นอีกขั้ววัดหนึ่งที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าขั้ววัดอุณหภูมิและขั้ววัดออกซิเจน ขั้ววัดพีเอชได้ถูกออกแบบให้มีการชดเชยค่าพีเอชจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเอาไว้ด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลจากอุณหภูมิของน้ำสำหรับการแปลผล ทั้งนี้การสอบเทียบขั้ววัดพีเอชได้กำหนดตำแหน่งพีเอชอ้างอิงไว้ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ 4.0, 7.0 และ 10.0 โดยใช้สารละลายมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 25°C การสอบเทียบที่อุณหภูมิมาตรฐานทำให้ผลการวัดมีความถูกต้องสูงกว่า แต่การทดลองได้กำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 28°C หลังจากทำการสอบเทียบขั้ววัดแล้วเสร็จระบบจะทำการชดเชยอุณหภูมิให้โดยอัตโนมัติ

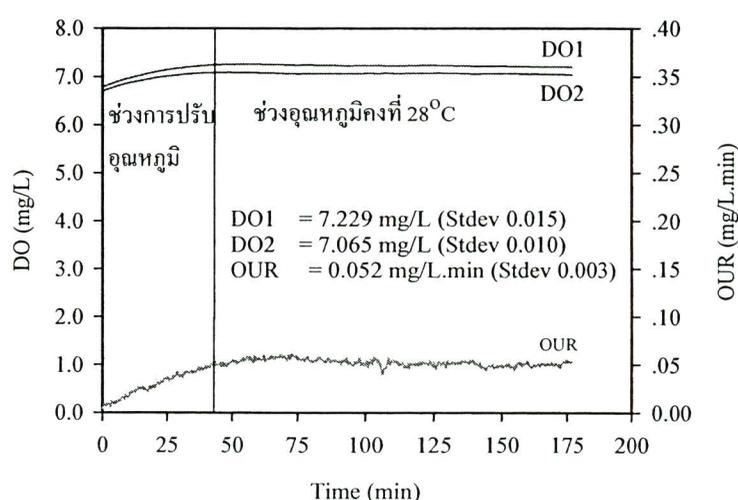
ค3. การสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการหายใจ

ก่อนการทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนในแต่ละครั้งได้ทำการสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการหายใจด้วยน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 28°C และทำการสอบเทียบขั้ววัดออกซิเจนก่อนทำการทดลองทุกครั้ง เมื่อพบว่ามี การเลื่อนของสัญญาณเกิดขึ้นต้องทำการสอบเทียบขั้ววัดออกซิเจนใหม่ใน 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ที่ระดับออกซิเจนอิมมัลในน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งมีค่าประมาณ 7.4 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 400 เมตร และอุณหภูมิของน้ำ 28°C โดยการเดินระบบเครื่องวัดอัตราการหายใจด้วยน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 28°C และเติมอากาศจนถึงจุดอิมมัล บันทึกราค่าออกซิเจนที่อ่านได้จากทั้งสองขั้ววัด และหลังจากนั้นทำการสอบเทียบขั้ววัดที่ระดับออกซิเจนเท่ากับศูนย์โดยหยุดเติมอากาศให้กับระบบและเติมด้วยสารละลาย Na_2SO_3 (ความเข้มข้นร้อยละ 10) และ CoCl_2 (ความเข้มข้นร้อยละ 1) จนกระทั่งระดับออกซิเจนลดลงเท่ากับศูนย์เท่ากันทั้งสองขั้ววัดแล้วบันทึกค่าออกซิเจนที่อ่านได้ และหลังจากนั้นถ่ายน้ำที่ใช้ในการสอบเทียบทิ้งออกและทำความสะอาดภาชนะด้วยน้ำสะอาด

การทดสอบผลการสอบเทียบขั้ววัดออกซิเจนทำได้โดยการเติมน้ำสะอาดปริมาตร 2.7 ลิตร เดินระบบเครื่องวัดอัตราการหายใจและเติมอากาศจนกระทั่งระดับออกซิเจนถึงค่าจุดอิมมัลและเมื่ออุณหภูมิได้ตามที่กำหนด 28°C ระดับค่าออกซิเจนจะคงที่ทั้ง 2 ขั้ววัด และขั้ววัดออกซิเจน

ที่ 1 จะต้องอ่านค่าได้สูงกว่าหรือเท่ากับขั้ววัดออกซิเจนที่ 2 เท่านั้นจึงจะยอมรับได้ว่าการสอบเทียบเครื่องมือมีความถูกต้อง และถ้าขั้ววัดออกซิเจนที่ 1 อ่านค่าได้น้อยกว่าขั้ววัดออกซิเจนที่ 2 ต้องดำเนินการสอบเทียบใหม่อีกครั้ง

ผลการสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการหายใจโดยใช้น้ำสะอาดแทนตัวอย่างสลัดจ์มีค่าอัตราการใช้ออกซิเจนเท่ากับ 0.052 ± 0.003 มิลลิกรัม/ลิตร.นาทึ (รูปที่ ก2) จากข้อมูลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อาจกล่าวได้ว่าการคำนวณอัตราการใช้ออกซิเจนมีความเที่ยงตรงสูงมากพอและสามารถยอมรับได้ และนำค่าอัตราการใช้ออกซิเจนนี้ไปลบออกจากค่าอัตราการใช้ออกซิเจนการทดลองในตัวอย่างสลัดจ์จริง



รูปที่ ก2 ผลการสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการหายใจด้วยน้ำสะอาด

ก4. การเตรียมการทดลอง

ตัวอย่างสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียก่อนนำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดอัตราการหายใจต้องเตรียมตัวอย่างสลัดจ์ให้อยู่ในสภาวะการหายใจแบบเอ็น โคจีนัส ทั้งนี้ตัวอย่างสลัดจ์ที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียจริงจำเป็นต้องกรองแยกสลัดจ์ด้วยผ้าหรือตะแกรงร่อนที่มีรูขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน เนื่องจากสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียจริงมีปริมาณของแข็งที่มีขนาดใหญ่เจือปนเป็นจำนวนมาก การเติมสลัดจ์เข้าเครื่องวัดอัตราการหายใจโดยตรงอาจส่งผลให้ระบบเครื่องมือวัดเกิดการอุดตันได้ นอกจากนี้ยังจะทำให้การวิเคราะห์ปริมาณ MLSS และ MLVSS สูงกว่าค่าความเป็นจริง ขั้นตอนการเตรียมการทดลองถือว่าเป็นขั้นตอนแรกที่จะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและระดับความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการวัดในแต่ละการทดลอง ซึ่งจะต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสลัดจ์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ค4.1 เติมอากาศให้กับสลัดจ์ที่ผ่านการกรองทิ้งไว้ประมาณ 12 – 24 ชม. ในกรณีที่นำสลัดจ์มาจากระบบบำบัดน้ำเสียจริง ควรเติมอากาศนานขึ้นหรือมากกว่า 24 ชม. เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่ามีการใช้สารอาหารที่ตกค้างในน้ำสลัดจ์ไปจนหมด ทั้งนี้เพื่อให้ร่นระยะเวลาการเติมอากาศให้สั้นลงควรล้างสลัดจ์ด้วยน้ำกลั่น (หรือน้ำสะอาดที่ไม่มีคลอรีน) 3 – 4 ครั้ง แล้วเติมอากาศจนกระทั่งสลัดจ์เข้าสู่ภาวะเอ็นโดจีนัสซึ่งอาจใช้ระยะเวลาประมาณ 2 ชม. ก่อนเริ่มทำการทดลองในขั้นต่อไปได้

ค4.2 นำสลัดจ์ที่เติมอากาศจนกระทั่งสลัดจ์เข้าสู่ภาวะเอ็นโดจีนัสลงไปในภาชนะเครื่องวัดอัตราการหายใจปริมาตรรวมทั้งหมด 2.7 ลิตร โดยระดับความเข้มข้นของตัวอย่างสลัดจ์ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ค4.3 เปิดสวิทช์ของอุปกรณ์เครื่องวัดอัตราการหายใจต่อไปนี้ให้ทำงานไปพร้อมกัน ได้แก่ เครื่องกวนที่ภาชนะเติมอากาศและภาชนะวัดอัตราการหายใจ ปัมพ์หมุนเวียนสลัดจ์โดยอุปกรณ์ดังกล่าวต้องทำงานที่สภาวะเดียวกันกับสภาวะที่ทำการสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการหายใจในขั้นตอนก่อนการทดลอง

ค4.4 ควบคุมการเติมอากาศให้ระดับออกซิเจนที่ภาชนะเติมอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 6 – 7 มิลลิกรัม/ลิตร ควรปรับค่าออกซิเจนให้ต่ำกว่าค่าอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำประมาณ 7.4 มิลลิกรัม/ลิตร กล่าวคือ การเติมออกซิเจนควรน้อยกว่าอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุดของตัวอย่างสลัดจ์ในเครื่องวัดอัตราการหายใจจึงจะทำให้ค่าออกซิเจนลดต่ำลงและสามารถคำนวณอัตราการใช้ออกซิเจนได้ แต่ตรงกันข้ามถ้ามีการเติมออกซิเจนมากกว่าอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุดของตัวอย่างสลัดจ์ในเครื่องวัดอัตราการหายใจ ออกซิเจนที่เติมเข้าไปจะไปทดแทนออกซิเจนที่ถูกใช้ไปได้หมด ดังนั้นระดับออกซิเจนในเครื่องวัดอัตราการหายใจจึงคงที่และเป็นผลให้ไม่สามารถคำนวณอัตราการใช้ออกซิเจนได้ (การปรับระดับการเติมกาขึ้นอยู่กับการทดลองต้องปรับเปลี่ยนไปตามพารามิเตอร์การทดลอง เช่น ความเข้มข้นของสลัดจ์ ความเข้มข้นของสารอาหาร และสัดส่วนของอาหารต่อสลัดจ์ เป็นต้น)

ค4.5 กำหนดค่าพารามิเตอร์ควบคุมการทดลองที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังต่อไปนี้

ค4.5.1 อุณหภูมิ 28°C และช่วงค่าความผิดพลาด 0.2°C

ค4.5.2 ปริมาตรของภาชนะวัดการหายใจ 0.84 ลิตร

ค4.5.3 อัตราการหมุนเวียนสลัดจ์ภายใน 0.245 ลิตร/นาที

ค4.5.4 พีเอช 7.5 และช่วงค่าความผิดพลาด 0.05

ค4.5.5 ช่วงระยะเวลาสำหรับการตรวจสอบค่า pH 5 – 10 วินาที สำหรับการควบคุมการเติมกรดหรือด่าง (ควรทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อให้แน่ใจว่าช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมอยู่ในช่วงใด)

ค4.6 หลังจากเริ่มเดินระบบเครื่องวัดอัตราการหายใจแล้ว ระบบควบคุมจะปรับอุณหภูมิและพีเอช ตัวอย่างสลัดจ์ในระบบเครื่องวัดอัตราการหายใจให้เท่ากับค่าที่กำหนดไว้ในข้อ ค4.4.1 และ ค4.4.4 จนกว่าพีเอชของตัวอย่างจะมีค่าเท่ากับหรืออยู่ในช่วงค่าที่กำหนด ขณะเดียวกันที่หน้าจอแสดงผลค่าพีเอชจะสว่างขึ้นเพื่อแจ้งให้ทราบว่าระบบพร้อมสำหรับการบันทึกข้อมูลของพีเอช แต่ทั้งนี้ต้องตรวจสอบว่าอุณหภูมิของตัวอย่างสลัดจ์ได้ตามที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งต้องรอให้พารามิเตอร์ควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิ และ พีเอช ได้ตามที่กำหนดจึงจะสามารถเริ่มทำการทดลองในขั้นต่อไปได้

ค4.7 ทำการปรับอุณหภูมิของสารละลายสารอาหารที่จะเติมให้กับตัวอย่างสลัดจ์ (สารละลายโซเดียมอะซิเตทและสารละลายแอมโมเนียมครอไรด์) ให้เท่ากับ 28°C เพื่อลดผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลันในตัวอย่างสลัดจ์ซึ่งจะส่งผลให้ขั้ววัดออกซิเจนอ่านค่าคลาดเคลื่อนได้ สภาพปัญหานี้จะเกิดขึ้นในสถานะที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่างจากอุณหภูมิที่กำหนดสำหรับการทดลองมาก เช่น การทดลองในช่วงฤดูหนาวที่อุณหภูมิน้ำโดยทั่วไปประมาณ $16 - 18^{\circ}\text{C}$

ค5. ขั้นตอนการทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนสำหรับประมาณค่าyield (Y_H) และค่าคงที่อิ่มตัวสำหรับสารอาหาร (K_S) ของเฮเทอโรทรอฟิกแบคทีเรีย

ค5.1 นำสลัดจ์ที่เดิมอากาศจนกระทั่งสลัดจ์เข้าสู่สถานะเอนโดจีนัสมาเจือจางสลัดจ์ให้มีความเข้มข้นประมาณ 1,000 - 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร เติมนลงในเครื่องวัดอัตราการหายใจและดำเนินการตามขั้นตอนการเตรียมการทดลองในข้อที่ ค4.2 – ค4.5

ค5.2 เมื่อระดับอุณหภูมิและพีเอชอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้ว ให้กดปุ่มบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์การทดลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค5.3 เติมสารละลายโซเดียมอะซิเตท 5 มิลลิลิตร (สารอาหารมีค่าเท่ากับ 13 มิลลิกรัม COD/มิลลิลิตร) ลงในภาชนะเติมอากาศ (Aeration chamber) ของเครื่องวัดอัตราการหายใจ หลังจากนั้นค่าอัตราการใช้ออกซิเจนจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดและจะคงที่ไประยะหนึ่งและจะลดลงเมื่อสารอาหารถูกใช้ไปจนหมด ค่าอัตราการใช้ออกซิเจนที่แสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์จะลดลงมาอยู่ในระดับเดิมหรือใกล้เคียงกับอัตราการใช้ออกซิเจนก่อนทำการเติมสารอาหาร (ถ้าต้องการทำการทดลองซ้ำต้องรอประมาณ 10 – 20 นาที ก่อนเริ่มทำการทดลองใหม่)

ค5.4 ทดลองซ้ำในลักษณะเดียวกับการทดลองในข้อ ค5.3 โดยเพิ่มปริมาตรของสารอาหาร (สารละลายโซเดียมอะซิเตท) เป็น 10, 25, 50 และ 75 มิลลิลิตร ตามลำดับ

ค5.5 นำตัวอย่างสลัดจ์ไปวิเคราะห์ MLSS และ MLVSS

ก6. ขั้นตอนการทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนสำหรับประมาณค่าyield (Y_{AOB}) และค่าคงที่อิ่มตัวสำหรับสารอาหาร (K_{NH}) ของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย

ก6.1 นำสลักซ์ที่เติมอากาศจนกระทั่งสลักซ์เข้าสู่สถานะเอนโดจีนสม่ำเสมอจนสลักซ์มีความเข้มข้นประมาณ 1,000 - 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร เติมนลงในเครื่องวัดอัตราการหายใจและดำเนินการตามขั้นตอนการเตรียมการทดลองในข้อที่ ก4.2 – ก4.5

ก6.2 เมื่อระดับอุณหภูมิและพีเอชอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้ว ให้กดปุ่มบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์การทดลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ก6.3 เติมน้ำละลายแอมโมเนียครอไรด์ 2.5 มิลลิลิตร (สารอาหารมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัม NH_4^+ /มิลลิลิตร) ลงในภาชนะเติมอากาศ (Aeration chamber) ของเครื่องวัดอัตราการหายใจ หลังจากนั้นค่าอัตราการใช้ออกซิเจนจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดและจะคงที่ไประยะหนึ่งและจะลดลงเมื่อสารอาหารถูกใช้ไปจนหมด ค่าอัตราการใช้ออกซิเจนที่แสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์จะลดลงมาอยู่ในระดับเดิมหรือใกล้เคียงกับอัตราการใช้ออกซิเจนก่อนทำการเติมน้ำสารอาหาร (ถ้าต้องการทำการทดลองซ้ำ ต้องรอประมาณ 10 – 20 นาที ก่อนเริ่มทำการทดลองใหม่)

ก6.4 ทดลองซ้ำในลักษณะเดียวกับการทดลองในข้อ ก6.3 โดยเพิ่มปริมาตรของสารอาหาร (สารละลายแอมโมเนียครอไรด์) เป็น 5, 10, 25 และ 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ

ก6.5 นำตัวอย่างสลักซ์ไปวิเคราะห์ MLSS และ MLVSS

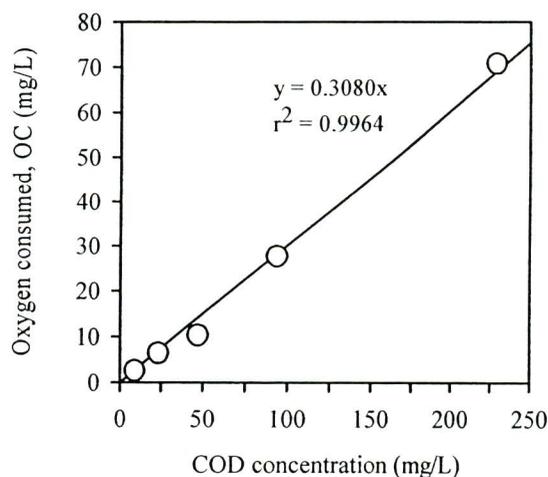
ก7. ขั้นตอนการการแปลผลข้อมูลและประมาณค่าyield (Y) และค่าคงที่อิ่มตัวสำหรับสารอาหาร (K) ของเฮเทอโรทรอฟิกแบคทีเรียและแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย

ก7.1 ปริมาตรของตัวอย่างสลักซ์เริ่มต้น 2.7 ลิตร เมื่อเติมน้ำสารครั้งแรก 10 มิลลิลิตร ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 2.71 ลิตร ดังนั้นการคำนวณความเข้มข้นจริงของแต่ละการทดลองจึงต้องรวมปริมาตรสะสมทุกครั้ง เช่น เมื่อเติมน้ำสารอาหาร 10 มิลลิลิตร (13 มิลลิกรัม COD/มิลลิลิตร) ความเข้มข้นของค่า COD การทดลองนี้จะเท่ากับ $(10 \times 13)/2.71 = 130/2.71 = 47.97$ มิลลิกรัม/ลิตร

ก7.2 ข้อมูลอัตราการใช้ออกซิเจนที่ได้จากการทดลองจะต้องนำไปคำนวณพื้นที่ใต้กราฟโดยนับเริ่มต้น (t_0) ที่ตำแหน่งเวลาเติมน้ำสารอาหารลงไปและสิ้นสุด (t_p) ที่เวลาอัตราการใช้ออกซิเจนลดลงต่ำสุดโดยพิจารณาเฉพาะช่วงมีสารอาหาร (Feast) เท่านั้น (รูปที่ 2.7) กรณีที่ทำการทดลองต่อเนื่องต้องแยกข้อมูลเพื่อการประมวลผลในแต่ละการทดลอง การหาปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไป (Oxygen consumed, OC_x) จะนำข้อมูลไปคำนวณพื้นที่ใต้กราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel หรือ Origin Pro ซึ่งมีฟังก์ชันการใช้งานที่ง่ายและสะดวก (ฟังก์ชัน Integration)

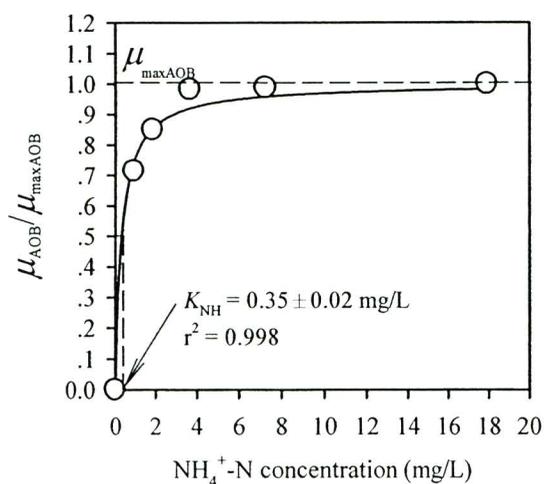
แต่เนื่องจากกราฟอัตราการใช้ออกซิเจนได้รวมปริมาณออกซิเจนที่ใช้สำหรับการหายใจแบบแอโรบิกได้อีกด้วย ดังนั้นจะต้องลบพื้นที่ตรงนี้ออกไปซึ่งคำนวณโดยใช้สมการหาพื้นที่สี่เหลี่ยมพื้นฐาน ค่าที่เหลือจึงเป็นปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไปสำหรับการย่อยสลายสารอาหารที่เติมลงไปหรือที่เรียกว่า การหายใจแบบแอโรบิก

ก7.3 นำข้อมูลความเข้มข้นสารอาหารที่เติมในแต่ละครั้ง (ข้อ ก5.3) และข้อมูลค่า OC_{∞} ไปสร้างกราฟจะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ($y = ax + b$) ซึ่งค่าความชัน (Slope) หรือค่า a มีค่าเท่ากับ $(1 - Y_H)$ ในกรณีการแปลผลการทดลองของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรียหรือ a มีค่าเท่ากับ $(3.43 - Y_{AOB})$ ในกรณีการแปลผลการทดลองของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย ตัวอย่างเช่น จากรูปที่ ค3. ความชันจากกราฟมีค่าเท่ากับ 0.31 ซึ่งเท่ากับ $(1 - Y_H)$ ดังนั้นค่า $Y_H = (1 - 0.31) = 0.69$ มิลลิกรัมเซลล์ (COD)/มิลลิกรัมชีโอดี และในกรณีการแปลผลข้อมูลของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรียก็สามารถแปลผลได้ในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ ค3 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง OC_{∞} และความเข้มข้นของค่าชีโอดี

ก7.4 ให้นำค่าอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุดของแต่ละการทดลองมาเรียงลำดับตามความเข้มข้นของสารอาหารที่เติม จากนั้นเอาค่าอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุดใน 5 การทดลองหารค่าอัตราการใช้ออกซิเจนทั้งหมด (รวมค่าตัวของมันเองด้วย) ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 หลังจากนั้นให้นำข้อมูลไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารอาหารที่เติม (แกน x) และค่าผลหารที่ได้ (แกน y) ดังตัวอย่างในรูปที่ ค4 (สร้างกราฟโดยใช้โปรแกรม SigmaPlot)



รูปที่ 4 กราฟแสดงผลการจำลองสถานการณ์การประมาณค่า K_{NH}

ค7.5 หลังจากได้กราฟตามรูปที่ 4 แล้วให้ใช้ฟังก์ชัน Dynamic Fit ในโปรแกรม SigmaPlot (เลือกฟังก์ชันย่อย Ligand binding และ One site saturation ตามลำดับ) โดยกำหนดค่า $\mu_{max} = 1$ ซึ่งการแปลผลการทดลองของเฮเทอโรโทรฟิกและแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรียสามารถแปลผลได้ในลักษณะเดียวกัน

ค8. ขั้นตอนการทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนสำหรับประมาณค่าอัตราการ นำเป็ของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย (b_H) และแอมโมเนีย

ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (b_A)

ค8.1 นำสลักจ์ที่เตรียมไว้เติมลงในเครื่องวัดอัตราการหายใจโดยไม่ต้องทำการเจือจางและดำเนินการตามขั้นตอนการเตรียมการทดลองในข้อที่ ค4.2 – ค4.5

ค8.2 เมื่อระดับอุณหภูมิและพีเอชอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้ว ให้กดปุ่มบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์การทดลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค8.3 เติมน้ำละลายโซเดียมอะซิเตท 10 มิลลิลิตร และหลังจากค่าอัตราการใช้ออกซิเจนที่แสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ลดลงมาอยู่ในระดับเดิมให้เว้นระยะเวลาประมาณ 10 – 15 นาที

ค8.4 เติมน้ำละลายแอมโมเนียครอไรด์ 10 มิลลิลิตร และหลังจากค่าอัตราการใช้ออกซิเจนที่แสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ลดลงมาอยู่ในระดับเดิมให้เว้นระยะเวลาประมาณ 10 – 15 นาที จึงหยุดการทดลอง

ค8.5 นำตัวอย่างสลักจ์ไปวิเคราะห์ MLSS และ MLVSS

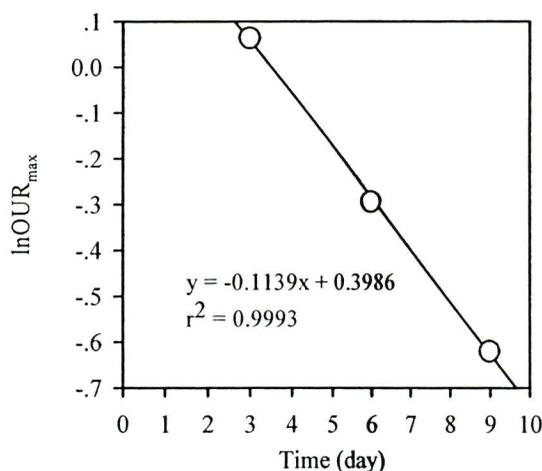
ค8.6 ทดลองซ้ำในข้อ ค8.3 – ค8.5 จำนวนอย่างน้อย 3 ครั้ง อาจดำเนินการทดลองทุกวัน หรือเว้นช่วงเวลา 1 – 2 วัน ก็ได้

ค8.7 การทดลองอาจรวมข้อ ค8.3 และ ค8.4 ก็ได้โดยรวมสารอาหารที่ต้องเติมเข้าด้วยกัน กราฟแสดงอัตราการหายใจจะแสดงค่าสูงสุดอยู่ 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งแรกเป็นข้อมูลของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรียและตำแหน่งที่ 2 เป็นข้อมูลของแอมโมเนียมออกซิไดซิงแบคทีเรีย

ค9. ขั้นตอนการแปลผลข้อมูลและประมาณค่าอัตราการนำเปื้อยของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรียและแอมโมเนียมออกซิไดซิงแบคทีเรีย

ค9.1 การแปลผลข้อมูลสามารถใช้ข้อมูลอัตราการใช้ออกซิเจนได้ 2 ชนิด โดยเลือกใช้ค่าอัตราการใช้ออกซิเจนในสภาวะการหายใจแบบเอ็นโคจีนัส (OUR_{end}) หรือค่าอัตราการใช้ออกซิเจนในสภาวะการหายใจแบบเอ็กโซจีนัส (OUR_{ex}) กรณีใช้ค่าอัตราการหายใจแบบเอ็กโซจีนัสจะใช้ค่าอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด (OUR_{max})

ค9.2 ให้นำค่าสูงสุดของข้อมูลอัตราการใช้ออกซิเจนที่ได้ในแต่ละวันมาหาค่า $\ln OUR_{\text{max}}$ และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (วัน) ในแกน x และ $\ln OUR_{\text{max}}$ ในแกน y จากนั้นให้หาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ($y = ax + b$) โดยค่าความชันของกราฟหรือ a คือค่าอัตราการนำเปื้อยแบบเชิงเส้นตรง ($b_H^{\text{lineal death}}$) ดังตัวอย่างในรูป ค5



รูปที่ ค5 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง $\ln OUR_{\text{max}}$ และเวลาของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย

ค9.3 จากตัวอย่างในกราฟให้นำค่า $a = 0.11$ ที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ (2.15) โดยแทนค่า $Y_H = 0.69$ (ผลการทดลองที่ผ่านมา) และค่า $f_p = 0.08$ (ค่าคงที่) จะได้ค่าอัตราการเน่าเปื่อย (b_H) ในแบบจำลอง ASM1 = 0.31 วัน^{-1}

ค9.4 ส่วนการแปลผลการทดลองของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรียจะทำเฉพาะตามขั้นตอนในข้อ ค9.2 เท่านั้น

ค10. ขั้นตอนการทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนสำหรับประมาณค่าอัตราการ

เจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย ($\mu_{\max H}$)

และแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย ($\mu_{\max A}$)

ค10.1 นำสลัดจ์ที่เดิมอากาศจนกระทั่งสลัดจ์เข้าสู่สภาวะเอนโดจีนัสมาเจือจางให้มีความเข้มข้นประมาณ 200 - 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร เติมนลงในเครื่องวัดอัตราการหายใจและดำเนินการตามขั้นตอนการเตรียมการทดลองในข้อที่ ค4.2 – ค4.5

ค10.2 เมื่อระดับอุณหภูมิและพีเอชอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้ว ให้กดปุ่มบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์การทดลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค10.3 เติมน้ำละลายโซเดียมอะซิเตท 300 มิลลิลิตร (สารอาหารมีค่าเท่ากับ 13 มิลลิกรัม COD/มิลลิลิตร) และรอนจนกระทั่งจุลินทรีย์ใช้อาหารที่เติมนลงไปจนหมดซึ่งอาจใช้เวลาประมาณ 8 – 12 ชม. (ระยะเวลาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสลัดจ์และสารอาหารที่เติม)

ค10.4 นำตัวอย่างสลัดจ์ไปวิเคราะห์ MLSS และ MLVSS

ค10.5 เติมน้ำละลายแอมโมเนียมครอไรด์ 20 มิลลิลิตร (การทดลองนี้เพื่อวัดอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย ก่อนทำการทดลองต้องปรับปริมาตรของตัวอย่างสลัดจ์ให้เท่ากับ 2.7 ลิตร กรณีใช้ตัวอย่างสลัดจ์เดิม หรืออาจเปลี่ยนตัวอย่างสลัดจ์ใหม่ก็ได้) การทดลองนี้ใช้เวลานานเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ ค10.3

ค10.6 นำตัวอย่างสลัดจ์ไปวิเคราะห์ MLSS และ MLVSS

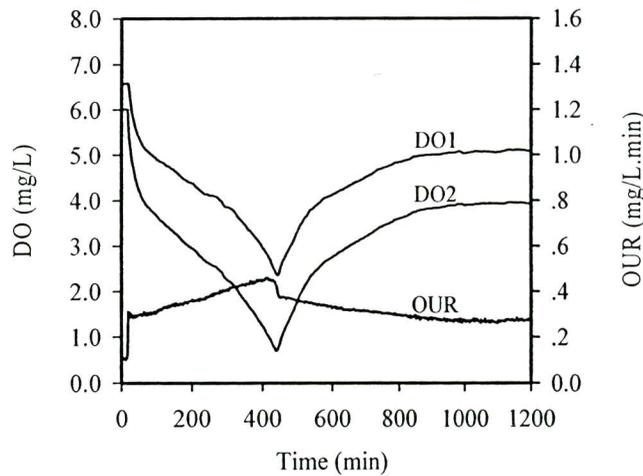
ค10.7 การทดลองนี้ค่อนข้างจะมีความยุ่งยากและมีโอกาสผิดพลาดสูงเนื่องจากการเติมอาหารที่มีความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้เกิดการยับยั้งของปฏิกิริยาขึ้น การทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรียมีโอกาสผิดพลาดหรือล้มเหลวมากกว่าการทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนของเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย)

**ค11. ขั้นตอนการแปลผลข้อมูลและประมาณค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของ
เฮเทอโรทรอฟิกแบคทีเรียและแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย**

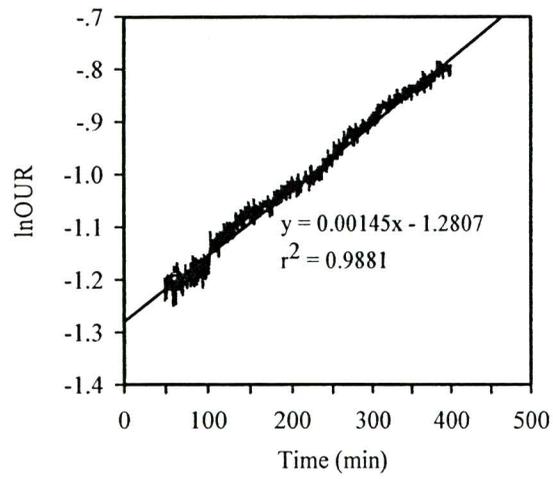
ค11.1 นำข้อมูลอัตราการใช้ออกซิเจนเฉพาะส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นเชิงเส้นตรงไปหาค่า $\ln OUR$ ตัวอย่างในรูปที่ ค6 ช่วงที่อัตราการเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงเริ่มตั้งแต่วันที่ 50 จนถึงประมาณวันที่ 400

ค11.2 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln OUR$ กับ เวลาจะให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ($y = ax + b$) โดยค่าความชันของกราฟหรือค่า a คือค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลินทรีย์ที่ทำการทดลอง ตัวอย่างในรูปที่ ค7 ค่า $a = 0.00145$ นาที⁻¹ ต้องปรับค่าให้มีหน่วยเป็นต่อวัน $= 0.00145 \times 1440 = 2.1$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(\mu_{\max H} - b_H)$ เมื่อแทนค่า $b_H = 0.11$ วัน⁻¹ (ค่าที่ได้จากการทดลอง) จะได้ $(\mu_{\max H} - 0.11) = 2.1$ ดังนั้นค่า $\mu_{\max H}$ จะเท่ากับ $2.1 + 0.11 = 2.2$ วัน⁻¹

ค11.3 การแปลผลการทดลองของเฮเทอโรทรอฟิกแบคทีเรียจะมีขั้นตอนในลักษณะเดียวกับการแปลผลการทดลองของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย



รูปที่ ค6 แนวโน้มอัตราการใช้ออกซิเจนการทดลอง
สำหรับประมาณค่า $\mu_{\max H}$



รูปที่ ค7 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง lnOUR และเวลา
สำหรับประมาณค่า ($\mu_{\max H}$)

ภาคผนวก ง

ผลการเปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติโดยใช้ t-test

ตารางที่ 31 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติน้ำทิ้งออกโดยใช้สถิติ t-test (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95)

เปรียบเทียบผลการทดลอง	ผลการทดสอบทางสถิติ (t-test)		
	ค่า COD	ค่า TKN	ค่า TP
7d-SRT-ss และ 5d-SRT-ss	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.001$	$P = 0.013$
7d-SRT-dyn และ 5d-SRT-dyn	$P = 0.004$	$P \leq 0.001$	$P = 0.027$
5d-SRT-dyn และ 5d-SRT-ss	$P = 0.761^*$	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.001$
5d-SRT-ss และ 5d-SRT-Ana-ss	$P = 0.138^*$	$P \leq 0.001$	-
5d-SRT-dyn และ 5d-SRT-Ana-dyn	$P = 0.014$	$P = 0.728^*$	-
Bio0.2:1-ss และ Bio0.2:1-dyn	$P = 0.245^*$	$P \leq 0.001$	-
Bio3:1-ss และ Bio3:1-dyn	$P = 0.038$	$P \leq 0.001$	-
Bio3:1-ss และ Bio3:1-2TKN-dyn	$P = 0.035$	$P = 0.147^*$	-
Bio3:1-ss และ Bio3:1-syn-dyn	$P = 0.740^*$	$P = 0.413$	-
Bio5:1-ss และ Bio5:1-dyn	$P = 0.350^*$	$P \leq 0.001$	-
Bio3:1-dyn และ Bio5:1-dyn	$P \leq 0.001$	$P = 0.447^*$	-
Bio3:1-ss และ Bio0.2:1-dyn	$P = 0.653^*$	$P \leq 0.001$	-
Bio3:1-dyn และ Bio0.2:1-dyn	$P = 0.005$	$P \leq 0.001$	-
Bio3:1-ss และ Bio1:1-ss	$P = 0.859^*$	$P = 0.403^*$	-
Bio0.2:1-ss และ Bio1:1-ss	$P = 0.398^*$	$P = 0.430^*$	-
Bio0.2:1-ss และ Bio3:1-ss	$P = 0.568^*$	$P = 0.853^*$	-
Bio0.2:1-ss และ Bio5:1-ss	$P = 0.039$	$P = 0.020$	-
Bio3:1-dyn และ Bio3:1-2TKN-dyn	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.001$	-
Bio3:1-dyn และ Bio3:1-syn-dyn	$P = 0.006$	$P \leq 0.001$	-
Bio3:1-2TKN-dyn และ Bio3:1-syn-dyn	$P = 0.047$	$P = 0.277^*$	-

หมายเหตุ : * P value มากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 หมายถึงข้อมูลไม่มีความแตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร กาญจนทวี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนน มหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 044-224745 โทรสาร 044-224750 (E-mail: sunthorn@sut.ac.th)

ประวัติการศึกษา จบปริญญาตรีสาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา ปี พ.ศ. 2525 ปริญญาโทสาขาวิชา Agricultural Engineering (Food Process Engineering) จากสถาบัน AIT (Asian Institute of Technology) จังหวัดปทุมธานี ปี พ.ศ. 2528 และปริญญาเอก (Ph.D.) สาขาวิชา Biotechnology (Bioprocessing) จากมหาวิทยาลัย Massey University ประเทศ New Zealand ปี พ.ศ. 2533

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย “การคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียกรดซัคซินิก และการแยก และการทำให้บริสุทธิ์กรดซัคซินิก”และหัวหน้าโครงการวิจัย “การผลิตกรดแลคติกจากแป้งมันสำปะหลังโดยเชื้อ *Lactococcus lactis* เสริมด้วยสารสกัดยีสต์เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเบียร์” และ “การผลิตอะซิโตนบิวทานอลและเอทานอลจากกากน้ำตาลอ้อยโดยเชื้อ *Clostridium acetobutylicum* P262” และ “Evaluation of the performance of the microbial pellet under aerobic condition: investigation into the effect of growth enhances used in microbial pellet. (ทำเสร็จแล้ว ตีพิมพ์ใน Annual Reports of IC Biotech Vol. 20 ปี 1997)” และ “An Establishment method for viability test of blue-green algae (*Microcystis viridis*) treated by ultrasonic sound. (ทำเสร็จแล้ว ตีพิมพ์ใน Annual Reports of IC Biotech Vol. 21 ปี 1998)”

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้วเรื่อง “Characteristic of hydrogen sulfide removal in a carrier-packed biological decolorization system. ตีพิมพ์ปี ค.ศ. 2000 ใน Biochemical Engineering Journal Vol. 5 หน้า 209-217.” และ “การผลิตกรดแลคติกจากแป้งมันสำปะหลังโดยเชื้อ *Lactococcus lactis* เสริมด้วยสารสกัดยีสต์เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเบียร์ ตีพิมพ์ปี ค.ศ. 2011 ใน Biochemical Engineering Journal (Article accepted)”



ประวัติผู้ช่วยนักวิจัย

นายปฏิกรณ์ แสนสิ่ง ที่อยู่ปัจจุบันเลขที่ 115/8 หมู่ 4 ตำบล สูงเนิน อำเภอสูงเนิน จังหวัด นครราชสีมา 30170 โทรศัพท์ 044-216605, 086-6525024 (E-mail: h_patikorn@hotmail.com) สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีที่คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นจังหวัดขอนแก่น เมื่อ ปี พ.ศ. 2537 และหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานกับ บริษัท เค. เอส. พี. เอ็นวายเทค จำกัด จังหวัดขอนแก่น จนกระทั่งปี พ.ศ.2543 เป็นระยะเวลา 5 ปี เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใน ปี พ.ศ. 2543 และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2546 วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพการผสม สำหรับการสร้างฟล็อกโดยใช้ตาข่ายร่วมกับไบพรัชทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น

ปี พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก (Ph.D. Environmental Engineering) สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิทยานิพนธ์เรื่อง การเพิ่มพูนจุลินทรีย์ในกระบวนการแยกทิวเต็ดสตัดจ์เพื่อเพิ่มศักยภาพการกำจัด ไนโตรเจนภายใต้สภาวะผันแปรของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในรอบวัน

ปัจจุบันทำธุรกิจส่วนตัว บริษัท ออริจิน อินสทรูमेंท์ จำกัด เลขที่ 115/8 หมู่ 4 ตำบลสูงเนิน อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา 30170 โทร. 044-216605, 086-3551960 (E-mail: origin.model@gmail.com) บริษัทที่ปรึกษาด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสีย ผลิตเครื่องมือ วิทยาศาสตร์และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม

