

**EVALUASI PEMANFAATAN TEKNOLOGI  
BAKTERI & PEMODELAN PROSES  
BIODEGRADASI DALAM PEKERJAAN  
RESTORASI SUNGAI XUXI, KOTA WUXI, CHINA**

**Pengembangan Teknologi Bakteri Untuk Restorasi Sungai  
BAPPENAS, Bandung, 24 Mei 2010**

**Doddi Yudianto, Ph.D.**

**Universitas Katolik Parahyangan, Bandung**

**Prof. Xie Yuebo, Ph.D.**

**Hohai University, Nanjing**



# LATAR BELAKANG

- Penurunan kualitas air permukaan
  - Fungsi tampungan berbagai macam limbah
  - Penurunan konsentrasi oksigen terlarut dan parameter kualitas air lainnya
- Kondisi kualitas air yang buruk banyak terjadi di negara berkembang dan kota-kota besar dengan tingkat pertumbuhan penduduk yang tinggi dan perkembangan industri yang kurang terkendali (Jirka and Weitbrecht, 2005)

# LATAR BELAKANG

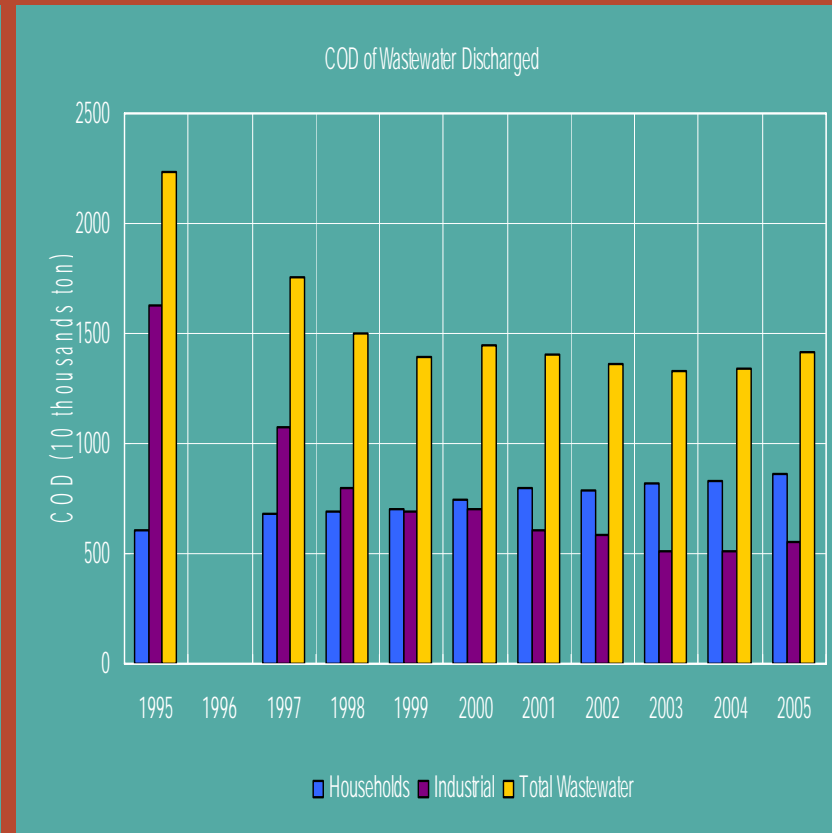
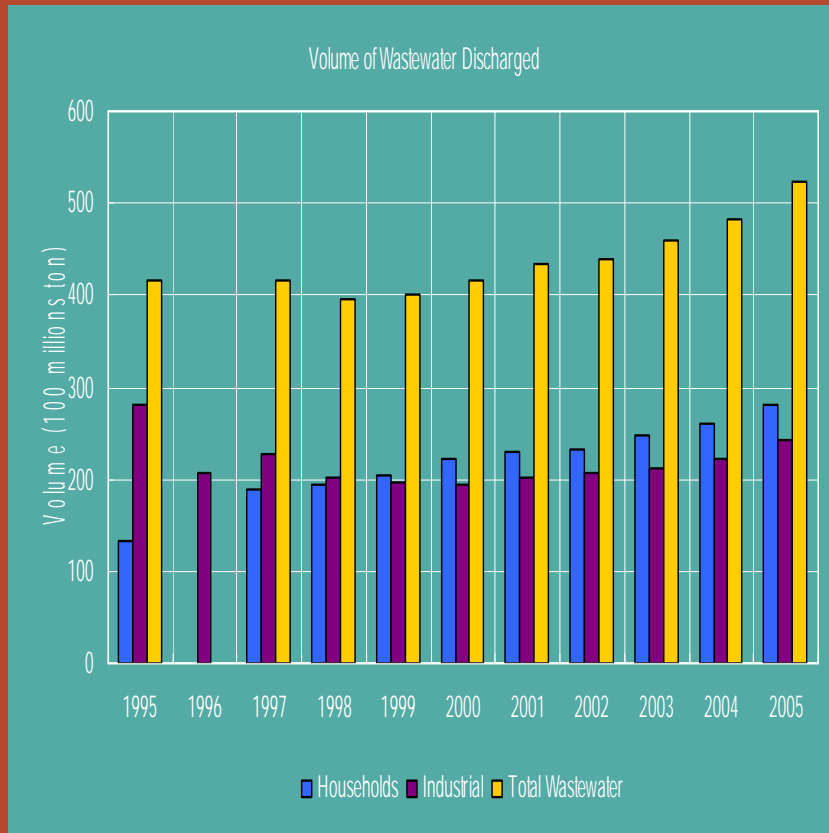
- Lebih dari 80% sungai di negara China teridentifikasi tercemar (Qi, et al., 1999)
- 70% dari 741 penampang sungai yang diamati diketahui tidak aman untuk kontak langsung dengan manusia (SEPA, 2002)
- Being the first developing country to announce implementation of sustainable development strategy (Zhang, 2004)
  - Kebijakan dan perundangan: PRC's Law on Environmental Protection (1979), China's 10 Strategic Policies on Environment and Development (1992), China's Agenda 21 (1994), Ninth Five Year Planning (1996), Decisions on Enhancing Science Development and Environmental Protection (Dec 2005)
  - Kelembagaan dan keterlibatan publik
  - Ilmu pengetahuan dan teknologi

# LATAR BELAKANG

- Implementasi peraturan pengendalian pencemaran di negara China
  - Ninth Five-Year Planning Period (1996 – 2000), lebih dari 80,000 industri dgn 15 parameter pencemar berat berhasil ditutup
  - Akhir thn 2000, lebih dari 90% industri telah memenuhi standar yang diberlakukan
  - Peraturan tsb belum efektif untuk kawasan permukiman secara umum dan industri di daerah perdesaan (Abigail, 1997; Zhang, et al.; 1997; Zhang, et al., 2007)
  - Efektivitas penegakan hukum dapat dicapai bila ada konsistensi dan komitmen dari pihak yang berwenang (Wang, et al., 2006)

# LATAR BELAKANG

## Distribusi pembuangan limbah cair ke sungai (China)



Source: China's Environmental Statistics and China's Statistics Yearbook, multi years

# LATAR BELAKANG

- Perkembangan teknik restorasi alami
  - Pemanfaatan ambang, terjunan, dan oxygenator yang dinilai efektif untuk memelihara konsentrasi DO  $> 4,00 \text{ mgL}^{-1}$  (Campollo, et al., 2002)
  - Pemindahan lokasi pembuangan limbah tidak memberikan kontribusi yang berarti (Gupta, et al., 2004)
  - Meskipun dinilai relatif murah (Zhou, et al., 2007), tetapi CW memiliki *removal efficiency* material organik nutrisi yang rendah (Puslitbang SDA, 2004; Juang dan Chen, 2007)

# LATAR BELAKANG

- Wu, et al., 2008: “Microbial decomposition of organic N in the sediment produced more  $\text{NH}_3$ , which moved into the water and kept a high  $\text{NH}_3$ -concentration. It would be challenging to treat seriously contaminated water through the self-purification process”
- Di negara China, teknologi bakteri dimanfaatkan untuk mengatasi pencemaran danau (Nie, et al., 2008) dan kegagalan IPAL menghasilkan *standard effluent* (Liao, et al., 2008)
- Aplikasi teknologi bakteri di Kota Shenzhen memberikan  $\text{BOD} < 5 \text{ mgL}^{-1}$  &  $\text{COD} < 20 \text{ mgL}^{-1}$
- Hanya 25% limbah domestik di negara berkembang yg difasilitasi instalasi pengolahan

# COMMUNAL SEPTIC TANK



Casting the local bacterium agent in the septic tanks in the residential area

After treatment, the effluent is not black or odour anymore

Removal efficiency of COD is exceed 70%

# TREATMENT PLANT

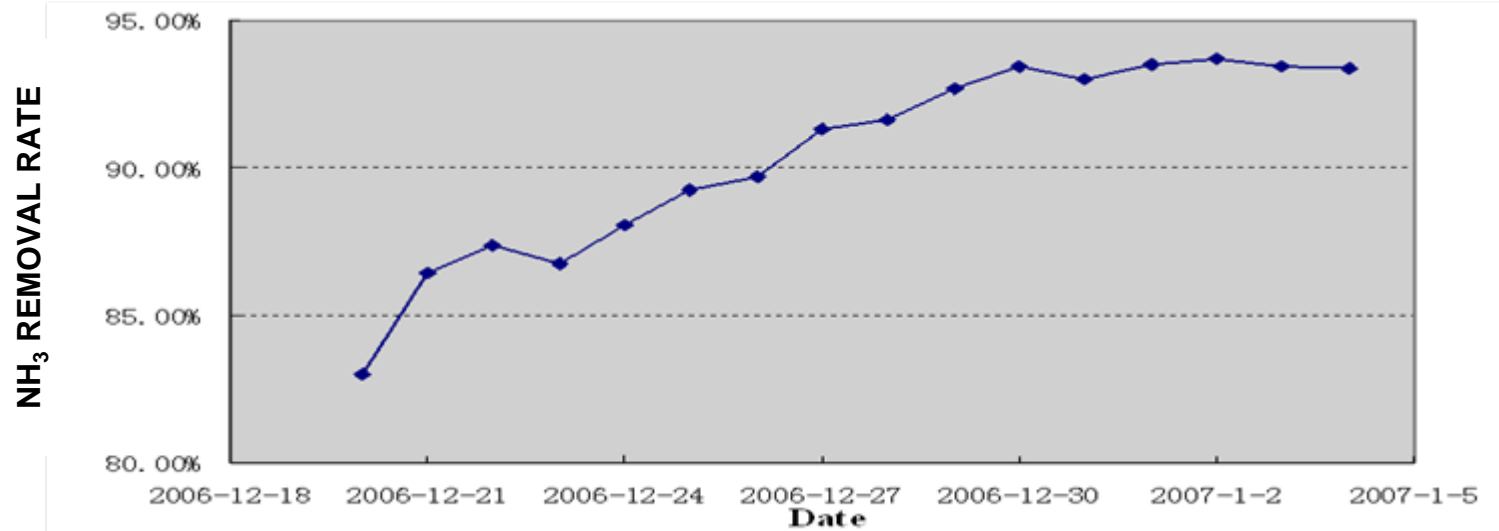
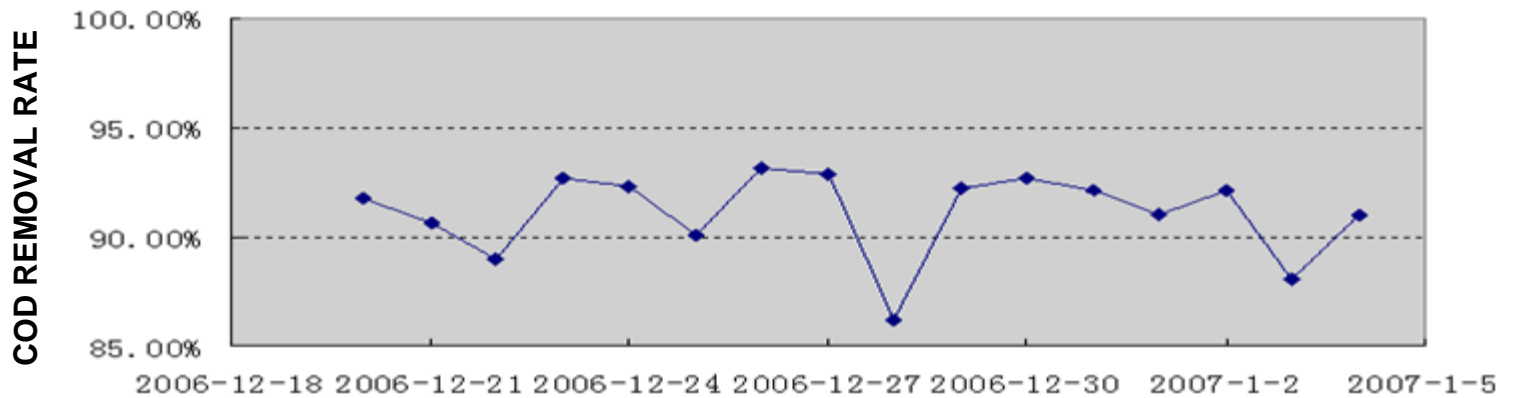


Taixing Industrial Wastewater Treatment Plant: 08/2006 – 01/2007

# TREATMENT PLANT



# TREATMENT PLANT



# GANKENG RIVER



# XINZHOU RIVER



# KULTURISASI BAKTERI



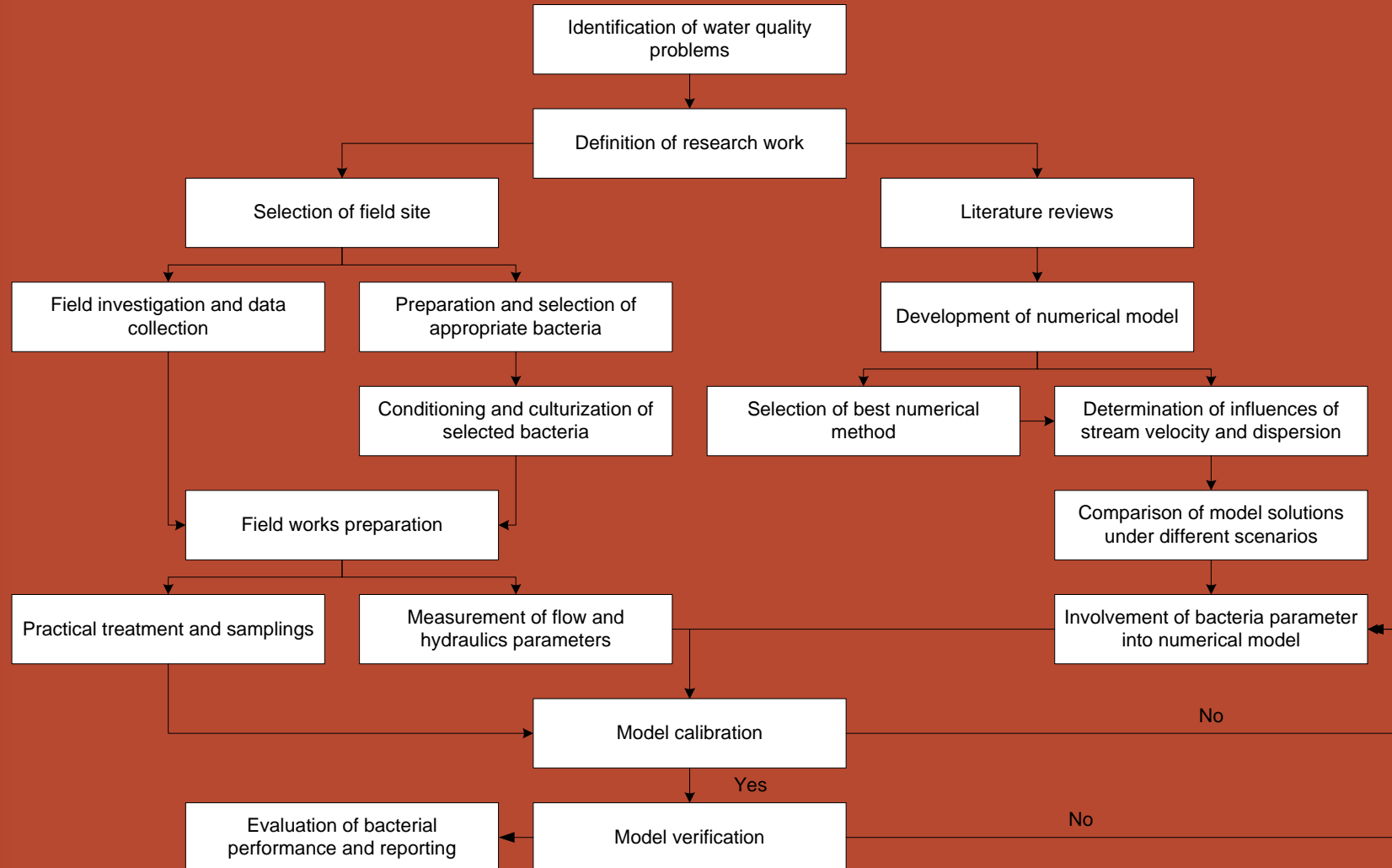
# “URGENCY” PENELITIAN

- Mengisi “GAP” yang terjadi dalam proses perkembangan teknik restorasi:
  - Ketersediaan lahan terbatas,
  - Kegagalan IPAL dan *wetland*,
  - Kurang efektifnya teknologi yang sudah ada
  - Lemahnya implementasi peraturan pengendalian pencemaran SDA
- Adanya sejumlah tantangan yang belum teridentifikasi dari aplikasi teknologi bakteri

# TUJUAN PENELITIAN

- Membagikan pengetahuan dasar terkait aplikasi teknologi bakteri dalam pekerjaan restorasi sungai khususnya sungai perkotaan
- Mengidentifikasi adanya produk akhir dari aplikasi teknologi bakteri
- Memberikan masukan untuk optimasi pemanfaatan teknologi bakteri dalam pekerjaan restorasi sungai

# METODOLOGI PENELITIAN



# “SELF PURIFICATION”

- Berawal dari pengembangan hubungan antara BOD dan DO oleh Streeter dan Phelps pada tahun 1925
- Studi pemodelan dimana diketahui bahwa PFR dengan tingkat *mixing* yang bervariasi memiliki efisiensi yang lebih besar dibandingkan CSTR (Lawrence and McCarty, 1970 and Benefield and Randall, 1980)
- Bakteri berperan sebagai pengurai dalam proses penguraian limbah secara alami dan dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan *Monod kinetics*

# “SELF PURIFICATION”

- CSTR

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V}(S_0 - S) - \frac{\mu_{\max H}}{Y_{x/s}^o} \frac{S}{K_s + S} X$$

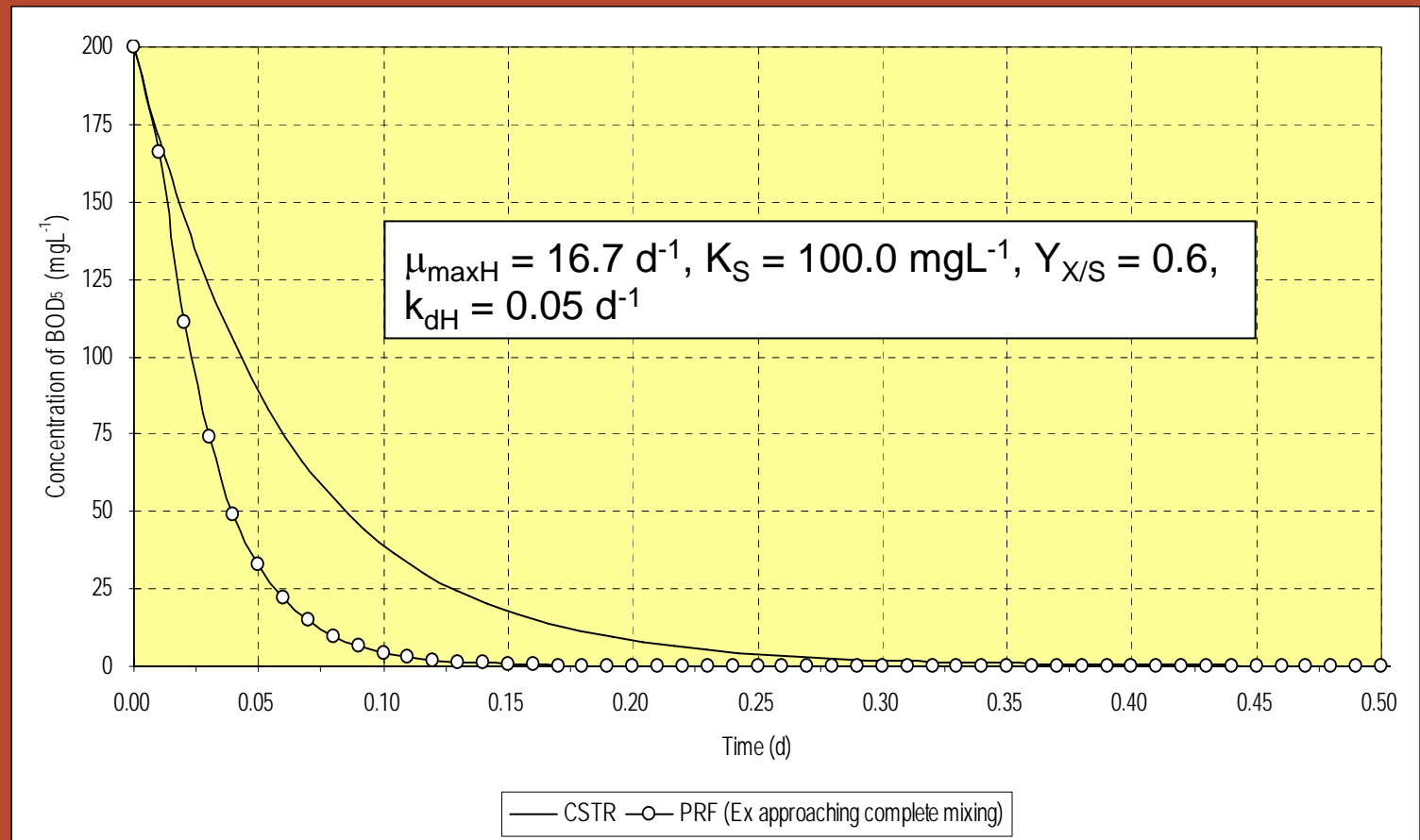
$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q}{V}(X_0 - X) + \mu_{\max H} \frac{S}{K_s + S} X - k_{dH} X^n$$

- PFR with dispersion

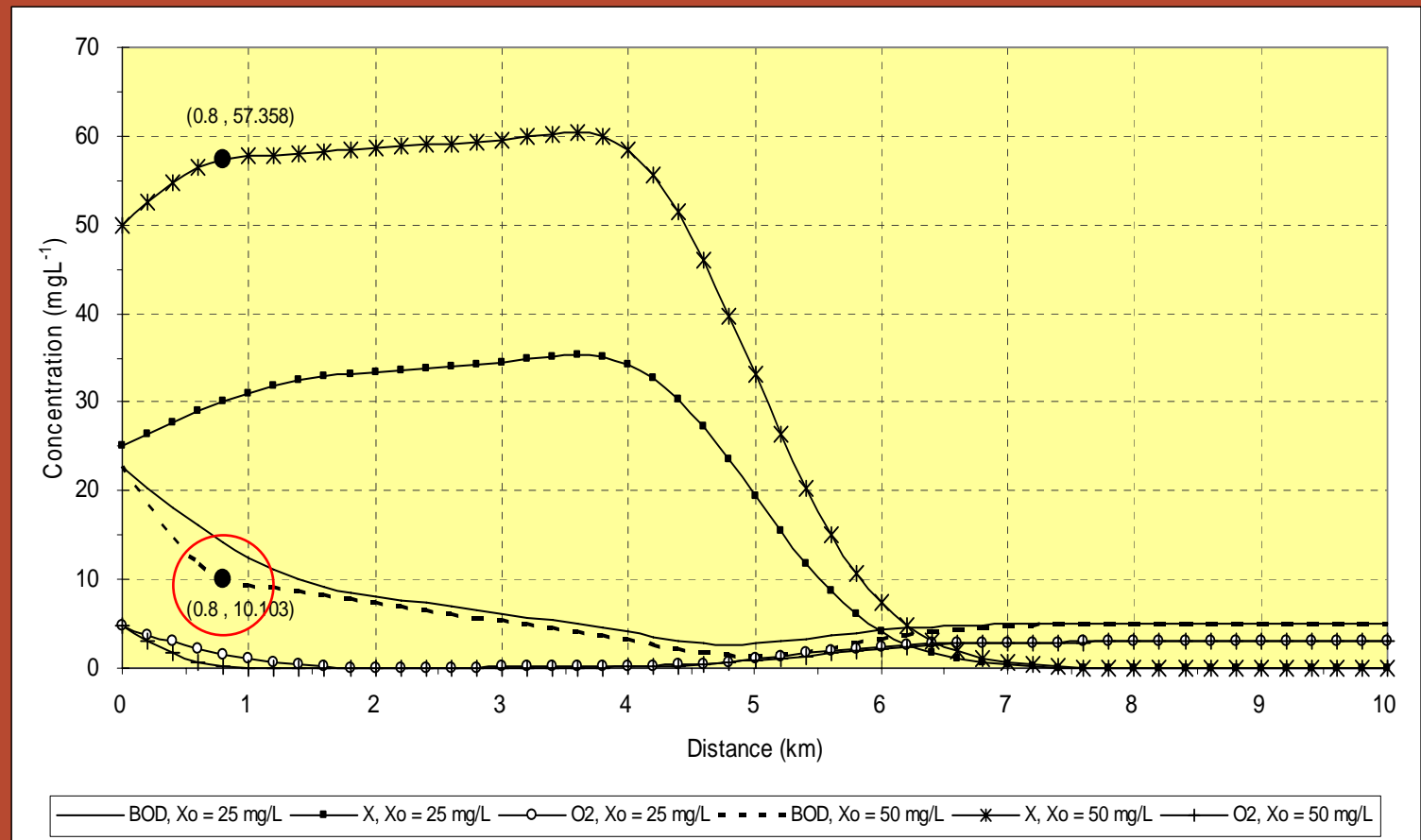
$$\frac{dS}{dt} = -u_x \frac{dS}{dx} + E_x \frac{d^2 S}{dx^2} - \frac{\mu_{\max H}}{Y_{x/s}^o} \frac{S}{K_s + S} X$$

$$\frac{dX}{dt} = -u_x \frac{dX}{dx} + E_x \frac{d^2 X}{dx^2} + \mu_{\max H} \frac{S}{K_s + S} X - k_{dH} X^n$$

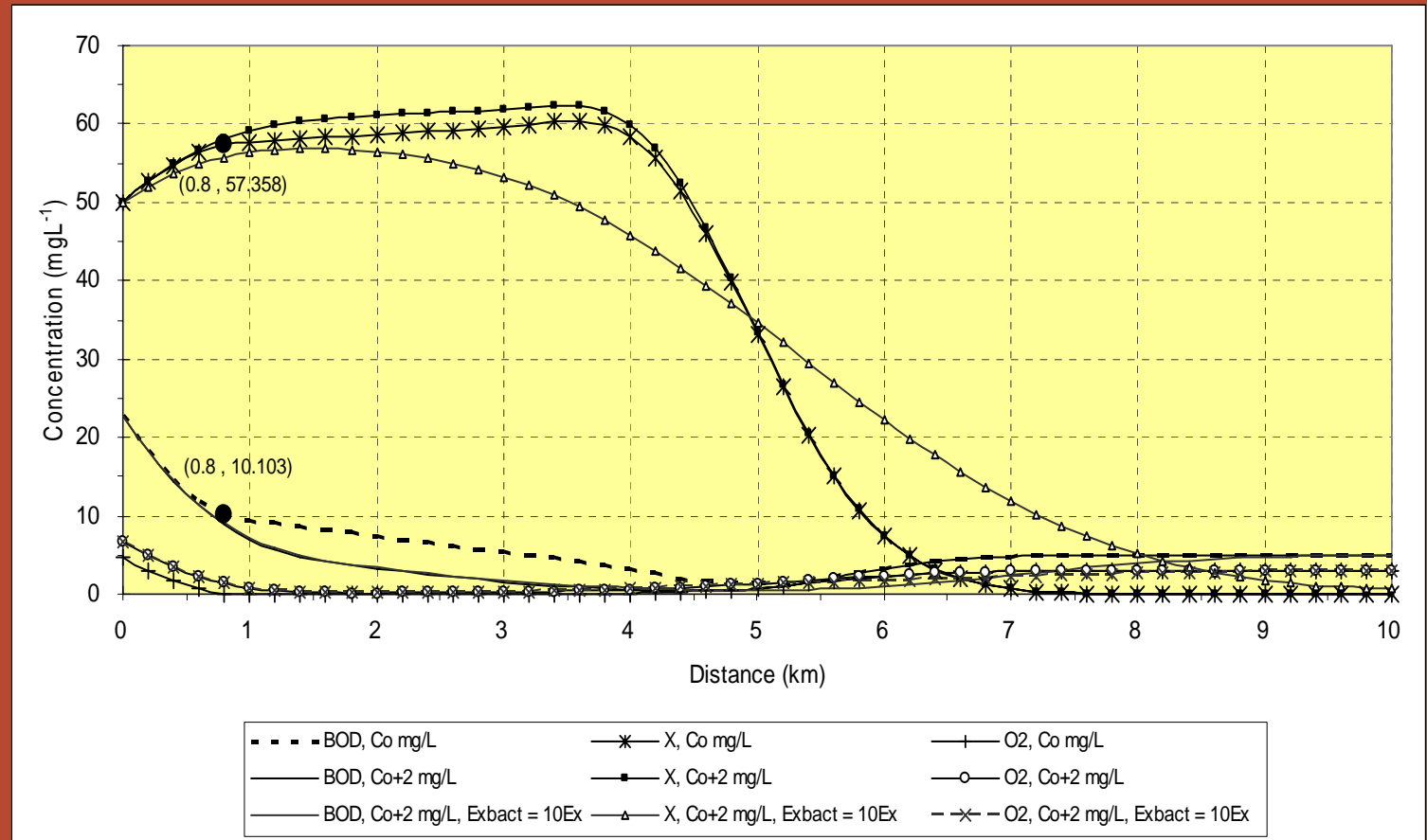
# “SELF PURIFICATION”



# “SELF PURIFICATION”



# “SELF PURIFICATION”



# ASUMSI PEMODELAN

- $u_x$  is average steady flow velocity
- All parameters including bacteria are assumed to migrate with flow
- Heterotrophs is homogeneous
- Single step nitrification process
- Limited by substrates and oxygen
- Biodegradation based on COD and all processes occur at neutral pH
- Combination of Streeter Phelps and ASM-1

# PERSAMAAN KINETIK

- Readily biodegradable COD ( $S_S$ )

$$\frac{dS_S}{dt} = -u_x \frac{dS_S}{dx} + E_x \frac{d^2 S_S}{dx^2} - \frac{\mu_{\max H}}{Y_{XH/SS}} \frac{S_S}{K_S + S_S} \left[ \frac{C}{K_{OH} + C} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} + \eta_g \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H$$

$$+ k_h \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} \left[ \frac{C}{K_{O_2} + C} + \eta_h \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H$$

- Active heterotrophic bacteria ( $X_H$ )

$$\frac{dX_H}{dt} = -u_x \frac{dX_H}{dx} + E_x \frac{d^2 X_H}{dx^2} + \mu_{\max H} \frac{S_S}{K_S + S_S}$$

$$\left[ \frac{C}{K_{OH} + C} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} + \eta_g \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H - k_{dH} X_H^{nH}$$

# PERSAMAAN KINETIK

- Active autotrophic bacteria ( $X_A$ )

$$\frac{dX_A}{dt} = -u_x \frac{dX_A}{dx} + E_x \frac{d^2 X_A}{dx^2} + \mu_{\max A} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{C}{K_{OA} + C} X_A - k_{dA} X_A^{nA}$$

- Nitrate nitrogen ( $S_{NO_3}$ )

$$\begin{aligned} \frac{dS_{NO_3}}{dt} = & -u_x \frac{dS_{NO_3}}{dx} + E_x \frac{d^2 S_{NO_3}}{dx^2} - \mu_{\max H} \eta_g \frac{1 - Y_{XH/SS}}{2.86 Y_{XH/SS}} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} X_H \\ & + \frac{\mu_{\max A}}{Y_{NO_3/XA}} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{C}{K_{OA} + C} X_A \end{aligned}$$

# PERSAMAAN KINETIK

- Ammonium nitrogen ( $S_{NH_4}$ )

$$\frac{dS_{NH_4}}{dt} = -u_x \frac{dS_{NH_4}}{dx} + E_x \frac{d^2 S_{NH_4}}{dx^2} - iX_B \mu_{maxH} \frac{S_S}{K_S + S_S} \left[ \frac{C}{K_{OH} + C} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} + \eta_g \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H$$

$$+ k_{aN} S_{ND} X_H - \mu_{maxA} \left[ iX_B + \frac{1}{Y_{NO_3/XA}} \right] \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{C}{K_{OA} + C} X_A$$

- Slowly biodegradable COD ( $X_S$ )

$$\frac{dX_S}{dt} = -u_x \frac{dX_S}{dx} + E_x \frac{d^2 X_S}{dx^2} + (1 - f_p) k_{dH} X_H + (1 - f_p) k_{dA} X_A$$

$$- k_h \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} \left[ \frac{C}{K_{OH} + C} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H$$

# PERSAMAAN KINETIK

- Particulate products from COD decay ( $X_P$ )

$$\frac{dX_P}{dt} = -u_x \frac{dX_P}{dx} + E_x \frac{d^2 X_P}{dx^2} + f_p k_{dH} X_H + f_p k_{dA} X_A$$

- Soluble degradable organic nitrogen ( $S_{ND}$ )

$$\begin{aligned} \frac{dS_{ND}}{dt} = & -u_x \frac{dS_{ND}}{dx} + E_x \frac{d^2 S_{ND}}{dx^2} - k_{aN} S_{ND} X_H \\ & + k_h \frac{X_{ND} / X_H}{K_X + X_S / X_H} \left[ \frac{C}{K_{OH} + C} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H \end{aligned}$$

# PERSAMAAN KINETIK

- Particulate degradable org nitrogen ( $X_{ND}$ )

$$\frac{dX_{ND}}{dt} = -u_x \frac{dX_{ND}}{dx} + E_x \frac{d^2 X_{ND}}{dx^2} + (iX_B - f_p iX_P)(k_{dH} X_H + k_{dA} X_A)$$

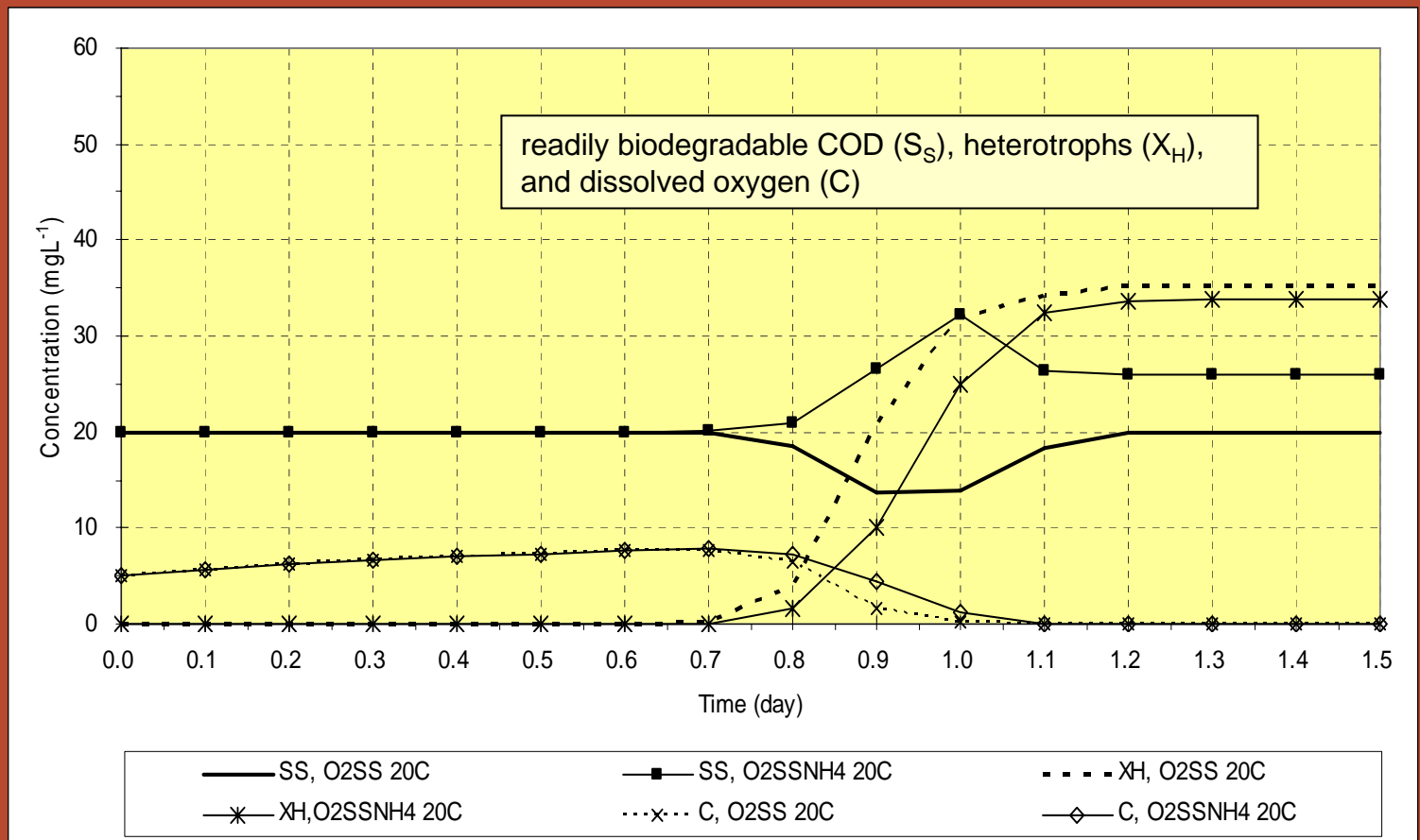
$$- k_h \frac{X_{ND}/X_H}{K_X + X_S/X_H} \left[ \frac{C}{K_{OH} + C} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H$$

- Dissolved oxygen (C)

$$\frac{dC}{dt} = -u_x \frac{dC}{dx} + E_x \frac{d^2 C}{dx^2} + k_a (C_s - C) - \mu_{\max H} \frac{1 - Y_{XH/SS}}{Y_{XH/SS}} \frac{S_S}{K_S + S_S}$$

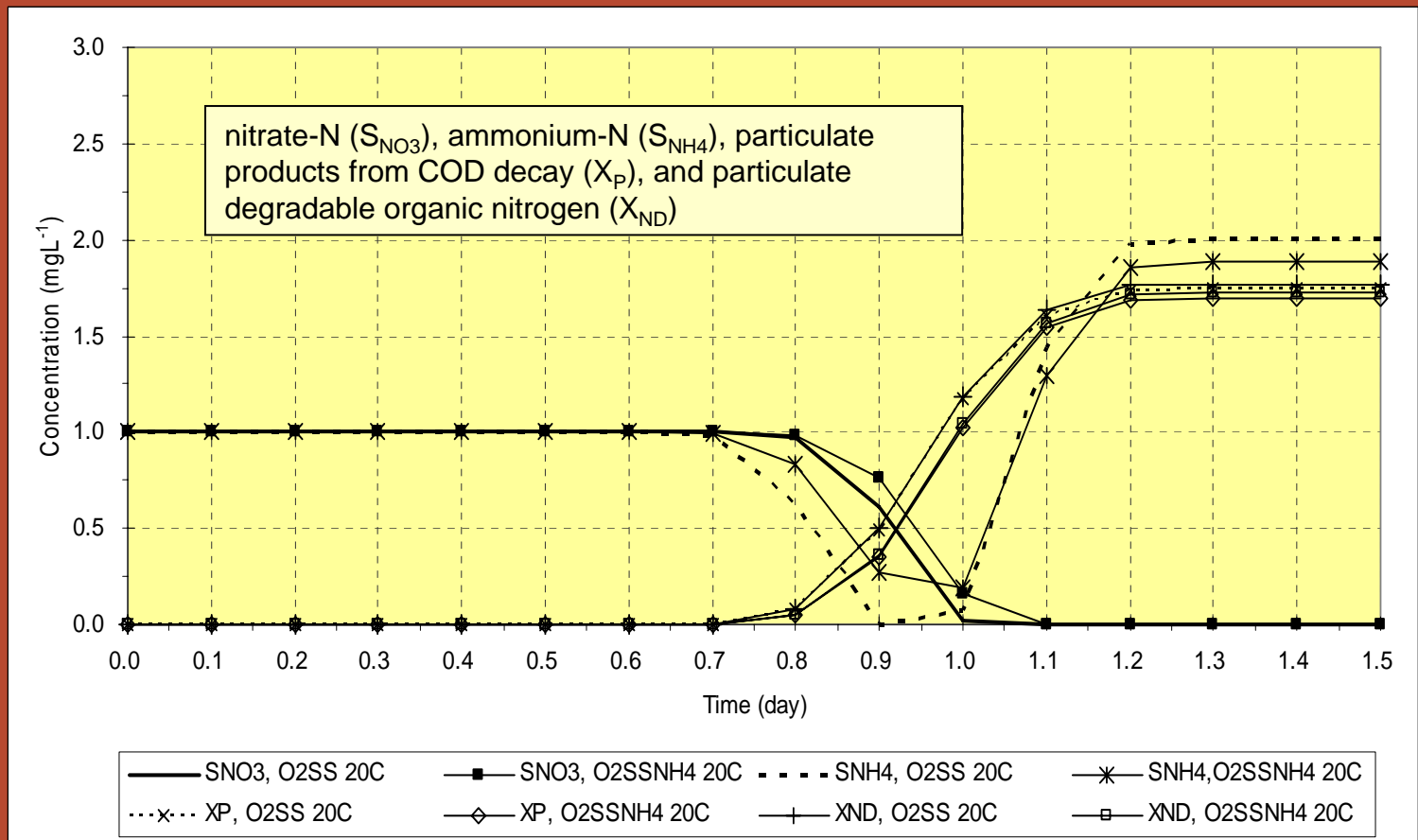
$$\left( \frac{C}{K_{OH} + C} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \right) X_H - \mu_{\max A} \frac{4.57 - Y_{NO_3/XA}}{Y_{NO_3/XA}} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{C}{K_{OA} + C} X_A$$

# KETERBATASAN AMMONIUM



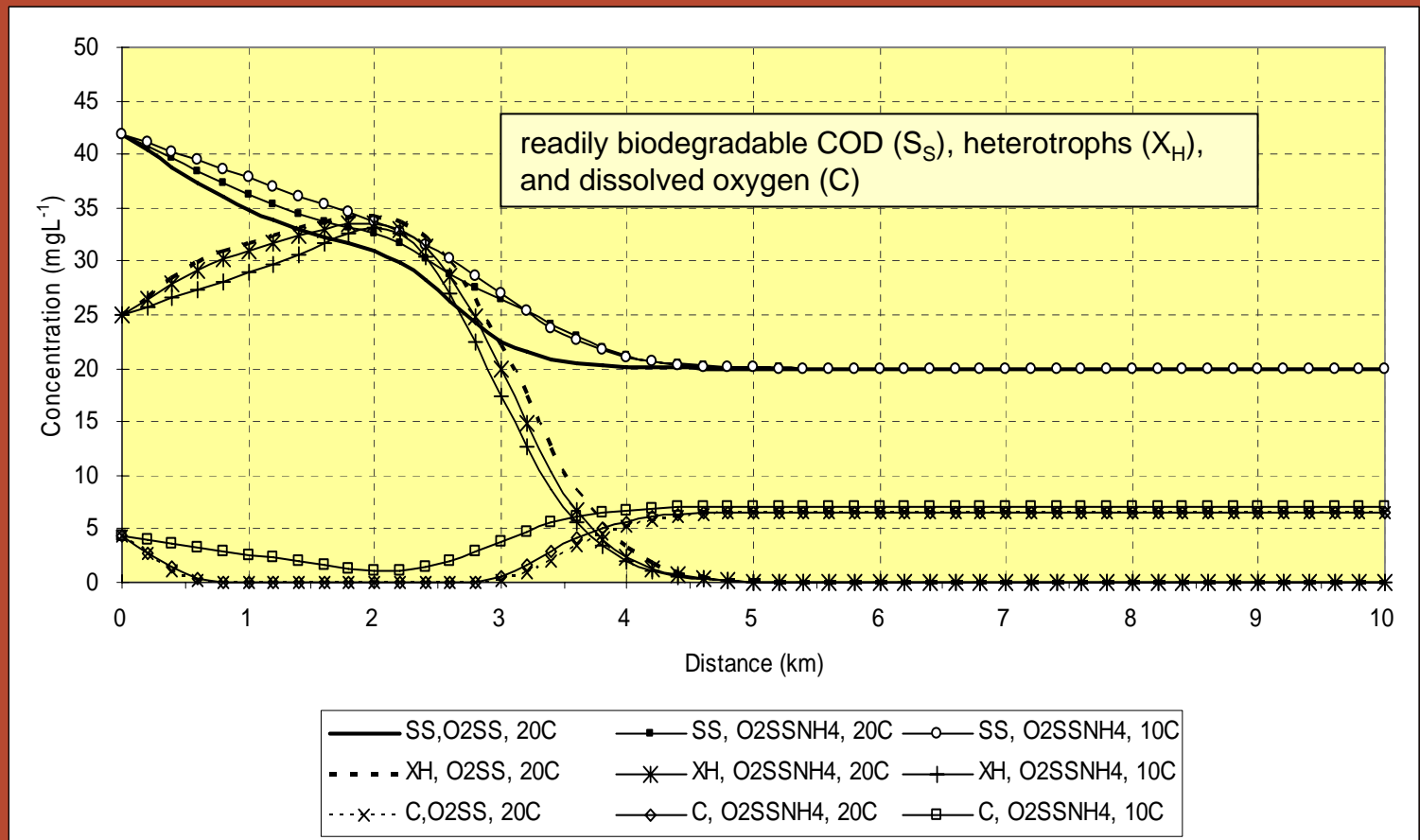
Increase of COD

# KETERBATASAN AMMONIUM



$S_{NH_4}$  increases slower but remains higher at the beginning of declining line

# PENGARUH TEMPERATUR



Higher COD and lower XH growth for lower temperature



# KONDISI AWAL



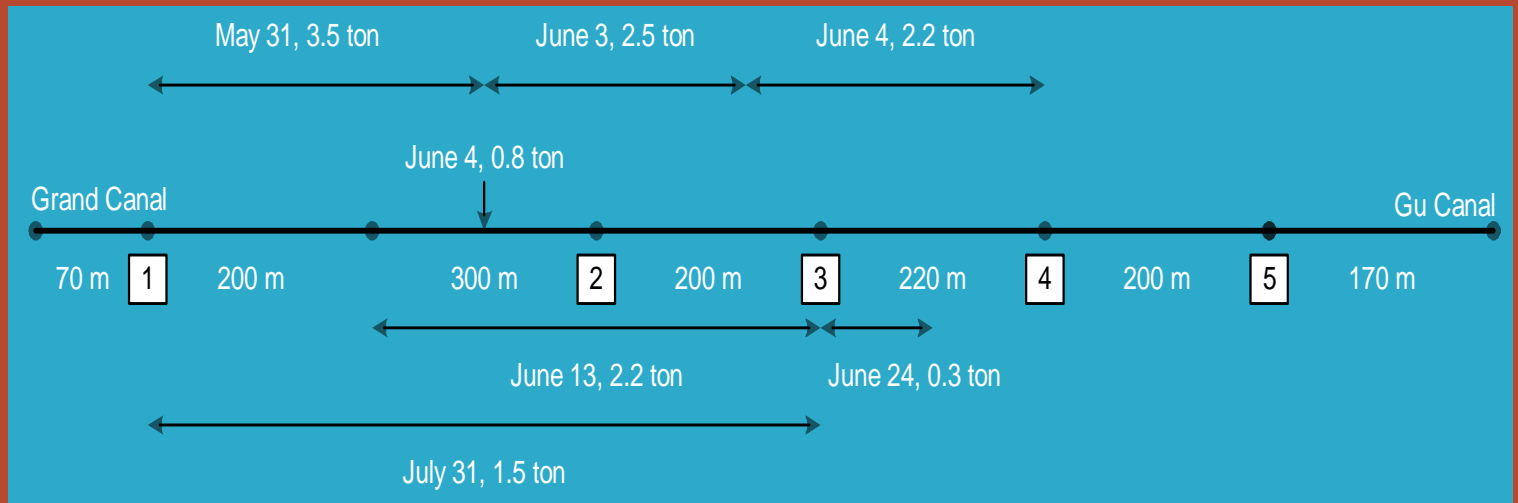
# KONDISI AWAL



# KLASIFIKASI BAKTERI

- Terdapat 110 jenis bakteri yang telah dipatenkan
- CNM bacterium agent
  - COD >  $20 \times 10^4$  mg/L and salinity >  $10^4$  mg/L
  - Toxic and harmful wastewater from dyes, pesticides, antibiotic industries, etc
  - Has been applied for some cases of eutrophication.
- XINSHENG bacterium agent
  - Has been applied to treat sanitary landfill, leachate, and polluted rivers in Shenzhen
- LOCAL bacterium agent
  - Has been applied for communal septic tank, medium scale experiment on complex chemicals industrial wastewater of Taixing, and polluted rivers in Shenzhen

# POLA PENDISTRIBUSIAN



# TAHAP AWAL RESTORASI



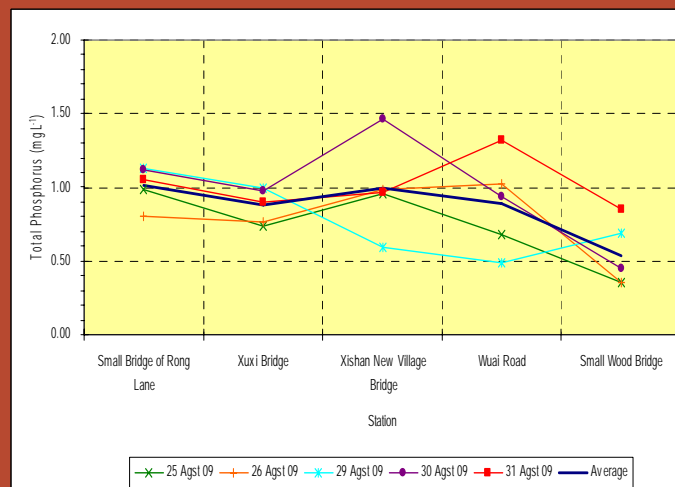
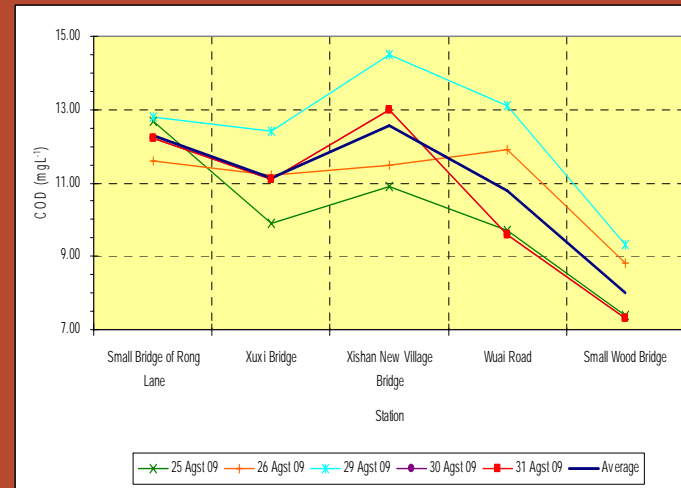
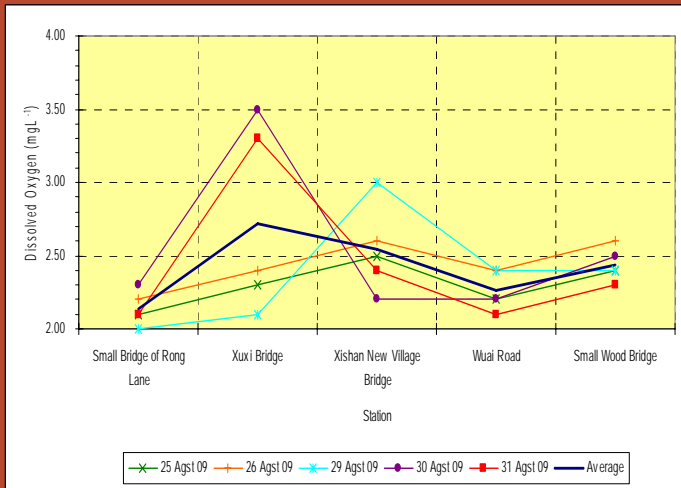
# SELAMA RESTORASI



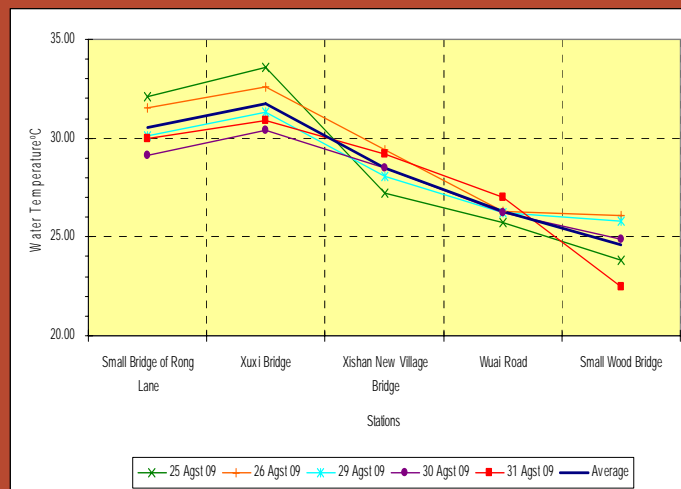
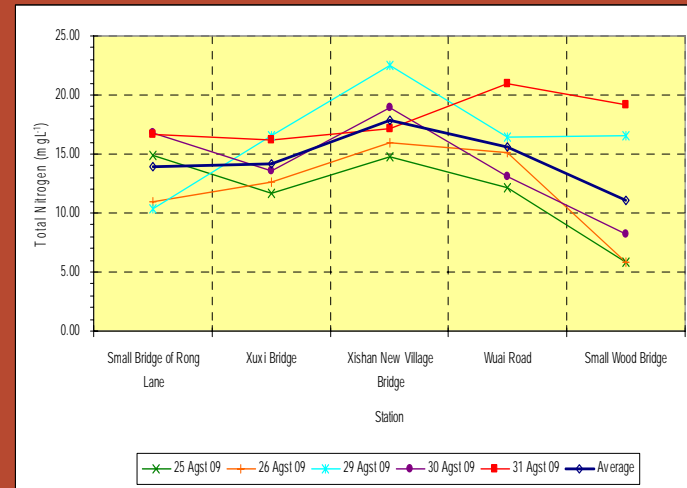
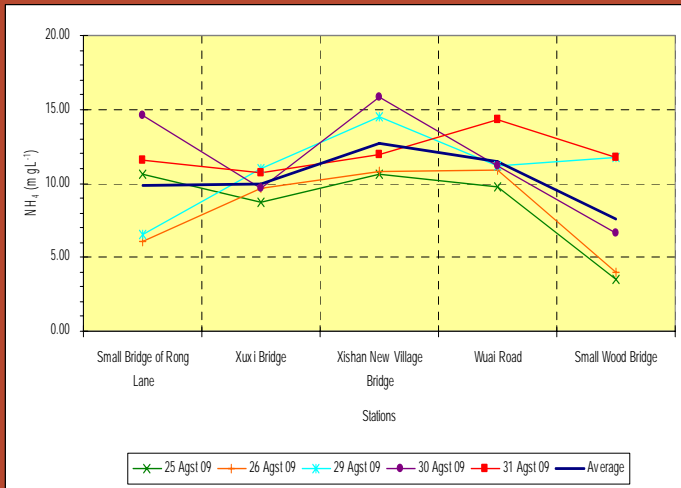
# SETELAH RESTORASI



# HASIL UJI CONTOH AIR



# HASIL UJI CONTOH AIR

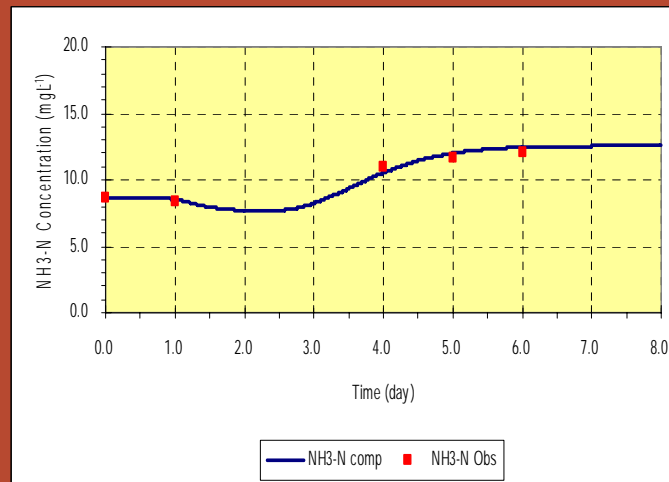
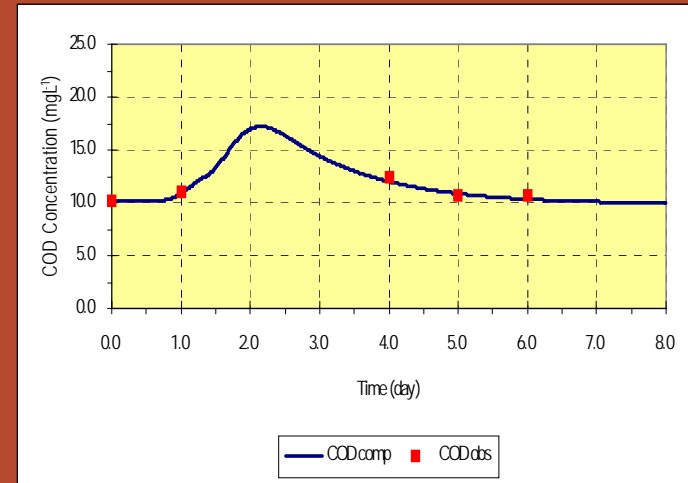
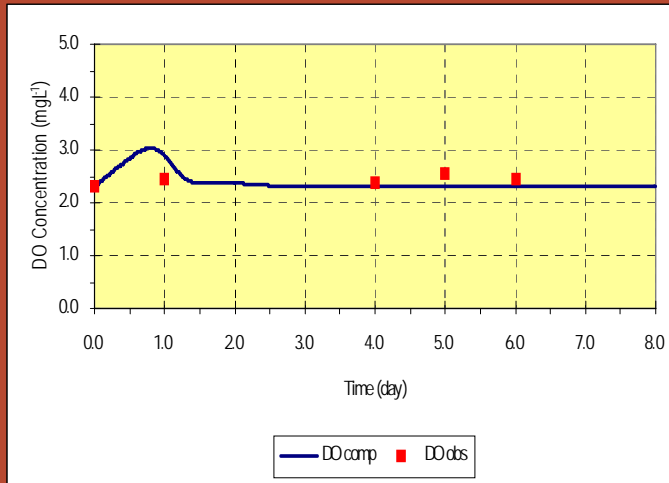


# REVITALISASI



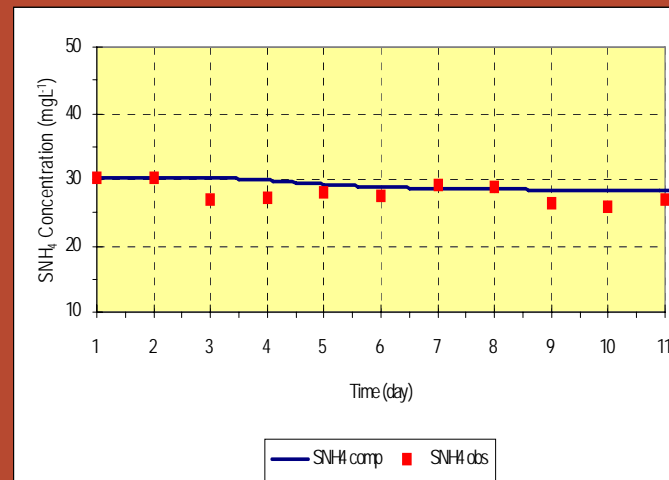
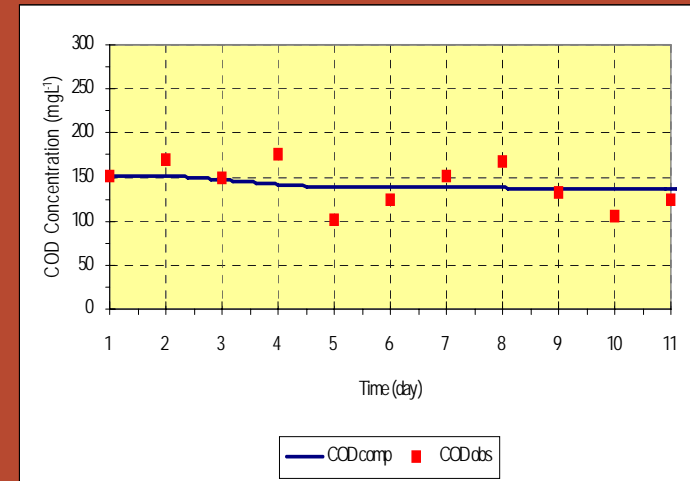
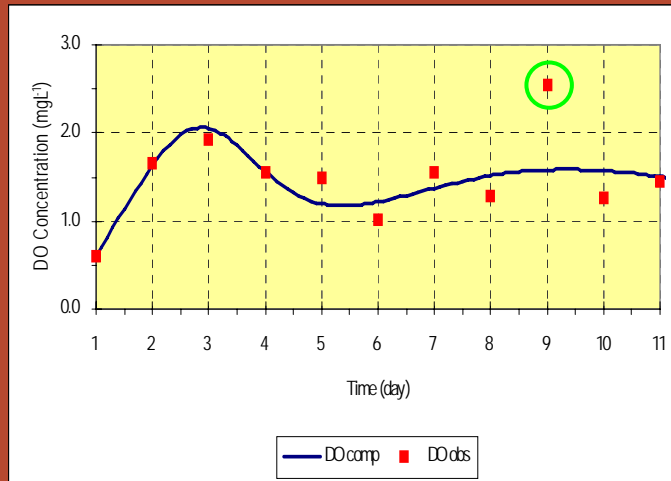
# KALIBRASI MODEL

Hasil kalibrasi model numerik Sungai Xuxi, Wuxi



# VERIFIKASI MODEL

Hasil kalibrasi model numerik Sungai Gankeng, Shenzhen



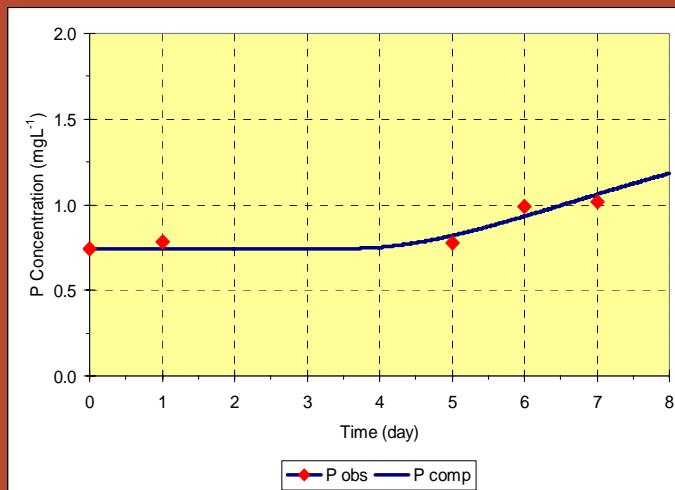
# PENGEMBANGAN MODEL

Penambahan Phosphorus sebagai *limiting factor*

$$\frac{dS_{PO_4}}{dt} = -u_x \frac{dS_{PO_4}}{dx} + E_x \frac{d^2 S_{PO_4}}{dx^2} - 0.01 \mu_{\max H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_{PO_4}}{K_{PO_4} + S_{PO_4}}$$

$$\left[ \frac{C}{K_{OH} + C} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} + \eta_g \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H - 0.019 \mu_{\max A}$$

$$\frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{C}{K_{OA} + C} \frac{S_{PO_4}}{K_{PO_4} + S_{PO_4}} X_A + k_h \frac{X_{PO_4}/X_H}{K_X + X_S/X_H} \left[ \frac{C}{K_{OH} + C} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + C} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \right] X_H$$



Song, Y.J., Xie, Y.B., Yudianto, D.

# HASIL PENELITIAN

- Setelah 3 bulan, kini Sungai Xuxi memiliki air yang jernih, pada sejumlah lokasi terindikasi adanya kehidupan grup ikan kecil
- Pada saluran bagian tengah terjadi peningkatan konsentrasi total phosphorus, total nitrogen, dan ammonium nitrogen akibat dominasi bakteri yang dituangkan
- Akibat peningkatan unsur nutrisi P dan N selama proses restorasi terbentuk alga di permukaan air sungai

# HASIL PENELITIAN

- Tidak adanya pengendalian atas sejumlah *point source of pollution* di sepanjang alur Sungai Xuxi selama pelaksanaan restorasi dan pola pendistribusian bakteri yang hanya didasarkan kepada pengalaman lapangan ahli terkait menyebabkan ketidakefisienan proses restorasi
- Selain tidak tersedianya informasi kualitas air sebelum pekerjaan restorasi dilaksanakan, data akhir yang digunakan oleh EPA sebagai dasar penilaian atas kinerja teknologi bakteri ini sangatlah minim sehingga hasil akhir yang diperoleh kurang memiliki nilai keilmuan yang berarti

# KESIMPULAN

- Aplikasi teknologi bakteri memberikan pandangan baru sekaligus menawarkan solusi yang inovatif dalam proses restorasi sungai
- Meskipun secara visual hasil yang diberikan oleh teknologi bakteri ini cukup menjanjikan, kurangnya data pengamatan yang dimiliki melemahkan dukungan ilmiah terhadap aplikasi dari teknologi bakteri ini
- Model yang digunakan memberikan hasil yang cukup akurat, namun tetap perlu pengembangan lebih lanjut

# REKOMENDASI

- Untuk menjamin bahwa teknologi ini aman untuk diaplikasikan perlu dilakukan studi mikrobiologi lebih lanjut dan studi terkait lainnya yang memberikan indikasi terbentuknya sejumlah produk akhir baru yang tentunya tidak dikehendaki selama dan pada akhir pengelolaan sungai tercemar
- Mengingat kompleksitas unsur pencemar yang terkandung di dalam limbah buangan masyarakat, untuk menghindari terjadinya kegagalan restorasi akibat kematian bakteri secara massal, perlu dilakukan uji sensitivitas bakteri yang digunakan terhadap sejumlah unsur pencemar khususnya yang lebih banyak ditemukan dalam limbah industri

# REKOMENDASI

- Pengujian aplikasi teknologi bakteri terkait dalam skala laboratorium dan pengembangan model matematik lebih lanjut mutlak diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dari aplikasi teknologi bakteri
- Karena keberhasilan pengendalian pencemaran badan air tidak terlepas dari peran aktif berbagai pihak/pemangku kepentingan, diperlukan tindakan nyata khususnya dari pihak pengelola sungai dan masyarakat setempat untuk secara konsisten mendukung keberlanjutan dari sungai yang telah direstorasi.

**CONFUCIUS:**

**“I have seen many rivers but never noticed that water has so many great virtues, which could be called neglecting while watching, having eyes yet not seeing, and for this, I truly feel ashamed”**

**“We had water in the past, let’s save it till the last”**

**TERIMA KASIH**