

**PENGGUNAAN PAYA TIRUAN UNTUK
PENYINGKIRAN PENCELUP REAKTIF,
NITROGEN DAN TUNTUTAN OKSIGEN KIMIA**

oleh

FLORA TAN WEI NI

**Tesis yang diserahkan untuk memenuhi keperluan bagi
Ijazah Sarjana Sains**

2007

PENGHARGAAN

Pertama sekali, saya ingin merakamkan jutaan terima kasih kepada penyelia projek saya iaitu Profesor Lim Poh Eng atas segala kebaikan, bimbingan dan tunjuk-ajar beliau. Beliau seorang yang prihatin dan bertanggungjawab kerana sentiasa mengambil berat tentang perkembangan projek ini serta berusaha sedaya upaya dalam mencari penyelesaian terhadap masalah-masalah yang saya hadapi. Ketekunan dan kegigihan beliau dalam mengkaji sistem paya tiruan hendaklah dipuji dan semangat ini perlu dijadikan teladan oleh seorang pelajar sains.

Setinggi-tinggi terima kasih juga diucapkan kepada Profesor Madya Dr. Md. Sani bin Ibrahim selaku penyelia bersama saya atas segala bimbingan dan tunjuk ajar yang diberikan sepanjang tempoh kajian ini.

Seterusnya, penghargaan dirakamkan kepada ibu bapa serta ahli keluarga yang sentiasa memberikan sokongan moral dan kasih sayang yang tidak terhingga. Terima kasih kerana memberikan saya peluang terus belajar. Kepada nenek yang tersayang, anda tetap berada dalam hatiku walaupun anda telah meninggalkan kita.

Saya juga ingin menyampaikan penghargaan kepada rakan seperjuangan, Tee Heng Chong atas segala budi baik dan pertolongannya. Beliau sentiasa memberi pendapat yang membina demi menjayakan projek ini. Terima kasih kerana selalu sabar dengan sikap buruk saya. Tidak lupa juga saya ingin mengucapkan terima kasih kepada rakan-rakan makmal 102 kerana sama-sama berkongsi saat-saat manis mahupun pahit sepanjang kajian ini.

Sekian, terima kasih.

SUSUNAN KANDUNGAN

	Muka surat
PENGHARGAAN	ii
JADUAL KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	vii
SENARAI RAJAH	viii
SENARAI PLAT	xi
SENARAI SINGKATAN	xii
SENARAI LAMPIRAN	xiii
SENARAI PENERBITAN DAN SEMINAR	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvii
BAB SATU : PENGENALAN	
1.1 Pencemaran Air Buangan Berpencilup	1
1.1.1 Proses Pengolahan	2
1.2 Pengenalan dan Pengelasan Warna	4
1.2.1 Pengelasan Pencelup	5
1.2.1.1 Pencelup Jenis Azo	5
1.2.1.2 Pencelup Jenis Reaktif	5
1.2.2 Pencelup Remazol Black B	6
1.3 Paya Tiruan	7
1.3.1 Jenis Paya Tiruan	8
1.3.1.1 Paya Tiruan Jenis Permukaan Air Bebas (FWS)	8
1.3.1.2 Paya Tiruan Jenis Aliran Sub-Permukaan (SF)	9
1.3.2 Komponen-komponen Paya Tiruan	9
1.3.2.1 Tumbuhan Akuatik	9
(a) Cattail (Rumput Colok Cina)	13
1.3.2.2 Media	15
(a) Batu Kelikir (Gravel)	15
(b) Sekam Padi Mentah (Raw Rice Husks)	16
1.3.2.3 Mikroorganisma	16
(a) Bakteria	16
(b) Alga	17
(c) Protozoa	17

1.4	Penyingkiran Nitrogen dalam Sistem Paya Tiruan	17
1.4.1	Nitrifikasi	18
1.4.2	Denitrifikasi	19
1.4.3	Ammonifikasi (Mineralisasi)	21
1.4.4	Pengewapan Ammonia	21
1.4.5	Pengambilan Nitrogen oleh Tumbuhan	22
1.4.6	Penjerapan Media	22
1.5	Model Rasional untuk Penyingkiran Nitrogen	22
1.6	Evapotranspirasi dan Evaporasi	24
1.7	Kajian Terdahulu terhadap Pengolahan Pencelup	25
1.7.1	Sistem Biologi Lain	25
1.7.2	Sistem Paya Tiruan	29
1.8	Objektif Kajian	30
BAB DUA : BAHAN DAN KAEDAH PENYELIDIKAN		
2.1	Tapak Penyelidikan	31
2.2	Penyediaan Paya Tiruan Eksperimen	31
2.2.1	Pembinaan Rangka Paya Tiruan	31
2.2.2	Penyediaan Titik Pensampelan	31
2.2.3	Penyediaan Media	34
2.2.3.1	Batu Kelikir (Pea Gravel)	34
2.2.3.2	Sekam Padi Mentah (Raw Rice Husks)	34
2.2.4	Penanaman Cattail	36
2.3	Sumber Air Buangan	36
2.4	Tempoh Retensi Hidraulik (HRT)	38
2.5	Penentuan Kepekatan Spesies Nitrogen dalam Sampel	38
2.5.1	Kepekatan Nitrogen Ammonia (AN)[4500-NH ₃ B dan C (APHA 1998)]	39
2.5.2	Kepekatan Nitrogen Organik (ON)[4500-N _{org} B(APHA 1998)]	39
2.6	Penentuan Kepekatan Pencelup	39
2.7	Penentuan Tuntutan Oksigen Kimia (COD)[5220 C (APHA, 1998)]	40
2.8	Kajian Kinetik	41
2.9	Kadar Spesifik Pengambilan Oksigen (SOUR)	43
2.10	Kajian Evapotranspirasi dan Evaporasi	44
2.11	Kawalan Mutu Data	45

BAB TIGA : KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

3.1	Kajian Evapotranspirasi dan Evaporasi	47
3.1.1	Evapotranspirasi	49
3.1.2	Evaporasi	50
3.2	Profil Kepekatan AN, TKN, Pencelup dan COD	51
3.2.1	Penyingkiran Nitrogen	52
3.2.1.1	Nitrogen Ammonia	52
	(a) Sebelum Penambahan Pencelup RB5	52
	(b) Selepas Penambahan Pencelup RB5	60
3.2.1.2	Jumlah Nitrogen Kjeldahl (TKN)	67
	(a) Sebelum Penambahan Pencelup RB5	67
	(b) Selepas Penambahan Pencelup RB5	71
3.3	Penyingkiran Pencelup Remazol Black B	76
3.4	Penyingkiran Tuntutan Oksigen Kimia (COD)	83
3.4.1	Sebelum Penambahan Pencelup RB5	83
3.4.2	Selepas Penambahan Pencelup RB5	88
3.5	Kajian Kinetik Biouraian Pencelup	93
3.5.1	Kajian Kinetik Biouraian Pencelup dalam Keadaan Aerobik	94
3.5.2	Kajian Kinetik Biouraian Pencelup dalam Keadaan Anoksik	97
3.5.3	Kajian Kinetik Biouraian Pencelup dalam Gabungan Keadaan Anoksik-Aerobik	98
3.5.4	Perbandingan antara Kajian Kinetik Biouraian Pencelup dalam Keadaan Aerobik, Anoksik dan Gabungan Anoksik-Aerobik	99
3.6	Kesan Ketoksikan Pencelup dan Sebatian Perantaraan Biouraiannya terhadap Kultur Bercampur dan Kultur Bercampur Penitritan	101
3.6.1	Kesan Ketoksikan Pencelup	102
3.6.2	Kesan Ketoksikan Hasil Biouraiannya dalam Keadaan Aerobik	102
3.6.3	Kesan Ketoksikan Hasil Biouraiannya dalam Keadaan Anoksik	105
3.6.4	Kesan Ketoksikan Hasil Biouraiannya dengan Menggunakan Gabungan Keadaan Anoksik-Aerobik	106

3.7	Pemodelan Matematik untuk Penyingkiran AN	108
3.7.1	Sebelum Penambahan Pencelup RB5	108
3.7.2	Selepas Penambahan Pencelup RB5	111
3.8	Pemodelan Matematik untuk Pencelup	114
BAB EMPAT : KESIMPULAN		
4.1	Prestasi Paya Tiruan dalam Pengolahan Air Buangan Berpencelup	118
4.1.1	Evapotranspirasi dan Evaporasi	118
4.1.2	Kesan Pencelup RB5 terhadap Penyingkiran AN, TKN dan COD	118
4.1.3	Penyingkiran Pencelup RB5	119
4.2	Kajian Kinetik Biouraian Pencelup	120
4.3	Kajian SOUR	120
4.4	Cadangan untuk Penyelidikan Lanjutan	121
SENARAI RUJUKAN		122
LAMPIRAN		128

SENARAI JADUAL

		Muka surat
Jadual 3.1	Kepekatan dan peratusan penyingkiran AN bagi paya tiruan GT, G, RT dan R berdasarkan 6 kali pensampelan pada alur masuk dan alur keluar permukaan sebelum penambahan pencelup.	53
Jadual 3.2	Peratusan penyingkiran AN pada alur keluar permukaan bagi paya tiruan GT, G, RT dan R dalam pengolahan air buangan berpencilup.	61
Jadual 3.3	Kepekatan dan peratusan penyingkiran TKN bagi paya tiruan GT, G, RT dan R berdasarkan 6 kali pensampelan pada alur masuk dan alur keluar permukaan sebelum penambahan pencelup.	68
Jadual 3.4	Peratusan penyingkiran TKN pada alur keluar permukaan bagi paya tiruan GT, G, RT dan R dalam pengolahan air buangan berpencilup.	72
Jadual 3.5	Peratusan penyingkiran pencelup pada alur keluar permukaan bagi paya tiruan GT, G, RT dan R dalam pengolahan air buangan berpencilup.	77
Jadual 3.6	Kepekatan dan peratusan penyingkiran COD bagi paya tiruan GT, G, RT dan R berdasarkan 6 kali pensampelan pada alur masuk dan alur keluar permukaan sebelum penambahan pencelup.	84
Jadual 3.7	Peratusan penyingkiran COD pada alur keluar permukaan bagi paya tiruan GT, G, RT dan R dalam pengolahan air buangan berpencilup.	89
Jadual 3.8	Pemalar kadar bagi kajian kinetik biouraian pencelup.	96

SENARAI RAJAH

		Muka surat
Rajah 1.1	Paya tiruan berjenis permukaan air bebas (FWS) (Lim dan Polprasert, 1998).	11
Rajah 1.2	Paya tiruan berjenis aliran sub-permukaan (SF) (Lim dan Polprasert, 1998).	11
Rajah 1.3	Jenis tumbuhan emergen, (a) bulrushes (<i>Scirpus longii</i>) (b) cattail (<i>Typha latifolia</i>) dan (c) reeds (<i>Phragmites communis</i>) (Lim dan Polprasert, 1998).	12
Rajah 1.4	Bunga, bijih benih dan sistem rizom bagi cattail (Otto, 1999).	14
Rajah 2.1	Lukisan skematik bagi paya tiruan dari segi (a) pandangan atas, (b) pandangan sisi dan (c) pandangan depan.	32
Rajah 2.2	Pandangan tiga dimensi paya tiruan GT	33
Rajah 2.3	Lukisan skematik bagi kajian kinetik.	42
Rajah 3.1	Profil kadar aliran influen, aliran efluen dan suhu bagi paya tiruan (a) GT dan G; (b) RT dan R.	48
Rajah 3.2	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran AN terhadap masa (hari) pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm bagi paya tiruan GT dan G sebelum penambahan pencilup.	54
Rajah 3.3	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran AN terhadap masa (hari) pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm bagi paya tiruan RT dan R sebelum penambahan pencilup.	54
Rajah 3.4	Profil kecekapan penyingkiran AN terhadap masa bagi paya tiruan GT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	62
Rajah 3.5	Profil kecekapan penyingkiran AN terhadap masa bagi paya tiruan G pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	62
Rajah 3.6	Profil kecekapan penyingkiran AN terhadap masa bagi paya tiruan RT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	63
Rajah 3.7	Profil kecekapan penyingkiran AN terhadap masa bagi paya tiruan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	63
Rajah 3.8	Profil peratusan kecekapan penyingkiran TKN terhadap masa bagi paya tiruan GT dan G pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm sebelum penambahan pencilup.	69

Rajah 3.9	Profil peratusan kecekapan penyingkiran TKN terhadap masa bagi paya tiruan RT dan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm sebelum penambahan pencilup.	69
Rajah 3.10	Profil kecekapan penyingkiran TKN terhadap masa bagi paya tiruan GT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	73
Rajah 3.11	Profil kecekapan penyingkiran AN terhadap masa bagi paya tiruan G pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	73
Rajah 3.12	Profil kecekapan penyingkiran AN terhadap masa bagi paya tiruan RT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	74
Rajah 3.13	Profil kecekapan penyingkiran AN terhadap masa bagi paya tiruan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	74
Rajah 3.14	Profil peratusan kecekapan penyingkiran pencilup terhadap masa bagi paya tiruan GT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm.	78
Rajah 3.15	Profil peratusan kecekapan penyingkiran pencilup terhadap masa bagi paya tiruan G pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm.	78
Rajah 3.16	Profil peratusan kecekapan penyingkiran pencilup terhadap masa bagi paya tiruan RT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm.	79
Rajah 3.17	Profil peratusan kecekapan penyingkiran pencilup terhadap masa bagi paya tiruan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm.	79
Rajah 3.18	Profil peratusan kecekapan penyingkiran COD terhadap masa bagi paya tiruan GT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm sebelum penambahan pencilup.	85
Rajah 3.19	Profil peratusan kecekapan penyingkiran COD terhadap masa bagi paya tiruan G pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm sebelum penambahan pencilup.	85
Rajah 3.20	Profil peratusan kecekapan penyingkiran COD terhadap masa bagi paya tiruan RT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm sebelum penambahan pencilup.	86
Rajah 3.21	Profil peratusan kecekapan penyingkiran COD terhadap masa bagi paya tiruan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm sebelum penambahan pencilup.	86

Rajah 3.22	Profil peratusan kecekapan penyingkiran COD terhadap masa bagi paya tiruan GT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	90
Rajah 3.23	Profil peratusan kecekapan penyingkiran COD terhadap masa bagi paya tiruan G pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	90
Rajah 3.24	Profil peratusan kecekapan penyingkiran COD terhadap masa bagi paya tiruan RT pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	91
Rajah 3.25	Profil peratusan kecekapan penyingkiran COD terhadap masa bagi paya tiruan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm selepas penambahan pencilup.	91
Rajah 3.26	Perubahan kepekatan pencilup mengikut masa bagi sampel dikutip dari paya tiruan pada titik (a) B dan (b) E di bawah keadaan aerobik, anoksik dan anoksik-aerobik.	95
Rajah 3.27	Struktur pencilup RB5 dan sebatian perantaraannya (Chen, 2002).	100
Rajah 3.28	Nilai SOUR terhadap kepekatan pencilup RB5 dengan menggunakan kultur bercampur penitritan dan kultur bercampur.	103
Rajah 3.29	Perubahan nilai SOUR mengikut masa bagi hasil kajian kinetik biouraian pencilup dalam keadaan aerobik, anoksik dan gabungan anoksik-aerobik dengan menggunakan (a) kultur bercampur penitritan dan (b) kultur bercampur.	103
Rajah 3.30	Nilai pemalar kadar, k_{AN} bagi penyingkiran AN terhadap masa bagi peringkat sebelum penambahan pencilup dalam paya tiruan GT, G, RT dan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm.	110
Rajah 3.31	Nilai pemalar kadar, k_{AN} bagi penyingkiran AN terhadap masa bagi peringkat selepas penambahan pencilup dalam paya tiruan GT, G, RT dan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm.	113
Rajah 3.32	Nilai pemalar kadar, k_{celup} bagi penyingkiran pencilup terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT, G, RT dan R pada kedalaman (a) 15 dan (b) 45 cm.	116

SENARAI PLAT

		Muka surat
Plat 2.1	Tapak penyelidikan	35
Plat 2.2	Paya tiruan RT yang diselaputi satu lapisan batu kelikir bersaiz 2.4-4.8 mm.	35
Plat 3.1	Pertumbuhan cattail yang lebih subur di bahagian alur masuk paya tiruan.	58
Plat 3.2	Pertumbuhan cattail terbantut selepas 147 hari penambahan pencilup.	58

SENARAI SINGKATAN

AN	Nitrogen Ammonia
DO	Oksigen Terlarut
Efluen	Alur Keluar
FWS	Paya Tiruan Permukaan Air Bebas
G	Paya Tiruan Tanpa Tumbuhan dan Bermedia Batu Kelikir
GT	Paya Tiruan Ditanam dengan Tumbuhan dan Bermedia Batu Kelikir
k	Pemalar Tertib Pertama bagi Kajian Kinetik Biouraian Pencelup
k_{AN}	Pemalar Tertib Pertama bagi Nitrogen Ammonia
k_{celup}	Pemalar Tertib Pertama bagi Pencelup
HRT	Tempoh Retensi Hidraulik Nominal
Influen	Alur Masuk
MLSS	Kepekatan Pepejal Terampai Campuran Reaktor
ON	Nitrogen Organik
ORP	Nilai Keupayaan Redoks
R	Paya Tiruan Tanpa Tumbuhan dan Bermedia Sekam Padi
RB5	Pencelup Remazol Black B
RT	Paya Tiruan Ditanam dengan tumbuhan dan Bermedia Sekam Padi
SBR	Reaktor Kelompok Berturutan
SF	Paya Tiruan Aliran Sub-permukaan
SOUR	Kadar Spesifik Pengambilan Oksigen
SP-1	Asid 2-(4-aminofenilsulfonil)etanasulfonik
SP-2	Asid 3,5-diamino-4-hidroksi-6-[[4-(2-sulfoetilsulfonil)fenil]diazanil]naftalena-2,7-disulfonik
SP-3	Asid 3,4,6-triamino-5-hidroksinaftalena-2,7-disulfonik
TKN	Jumlah Nitrogen Kjeldahl

SENARAI LAMPIRAN

- Lampiran 1: Penentuan Nitrogen Ammonia (AN) [4500-NH₃ B dan C (APHA, 1998)]
- Lampiran 2: Penentuan Organik Nitrogen (N-Org) [4500-Norg B (APHA, 1998)]
- Lampiran 3: Penentuan Tuntutan Oksigen Kimia (COD) [5220 C, APHA (1998)]
- Lampiran 4: Kajian evapotranspirasi dan evaporasi bagi paya tiruan RT, R, GT dan G.
- Lampiran 5: Kepekatan AN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 15 dan 45 cm dari permukaan media sebelum penambahan pencilup.
- Lampiran 6: Kepekatan AN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 15 dan 45 cm dari permukaan media selepas penambahan pencilup.
- Lampiran 7: Kepekatan TKN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 15 dan 45 cm dari permukaan media sebelum penambahan pencilup.
- Lampiran 8: Kepekatan TKN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 15 dan 45 cm dari permukaan media selepas penambahan pencilup.
- Lampiran 9: Kepekatan pencilup (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 15 dan 45 cm dari permukaan media.
- Lampiran 10: Kepekatan COD (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 15 dan 45 cm dari permukaan media sebelum penambahan pencilup.
- Lampiran 11: Kepekatan COD (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 15 dan 45 cm dari permukaan media selepas penambahan pencilup.
- Lampiran 12: Kajian kinetik biouraian pencilup dalam keadaan aerobik, anoksik dan gabungan anoksik-aerobik dengan menggunakan biojisim daripada paya tiruan pada titik pensampelan B dan E.
- Lampiran 13: Nilai SOUR bagi (a) pencilup dan (b) sebatian perantaraan biouraiannya pada kepekatan yang berlainan dengan menggunakan kultur bercampur penitritan dan kultur bercampur pada keadaan aerobik, anoksik dan gabungan anoksik-aerobik.
- Lampiran 14: Analisis regresi bagi penyingkiran AN pada kedalaman 15 dan 45 cm bagi paya tiruan RT, R, GT dan G pada peringkat sebelum penambahan pencilup.
- Lampiran 15: Analisis regresi bagi penyingkiran AN pada kedalaman 15 dan 45 cm bagi paya tiruan RT, R, GT dan G pada peringkat selepas penambahan pencilup.
- Lampiran 16: Analisis regresi bagi penyingkiran pencilup pada kedalaman 15 dan 45 cm bagi paya tiruan RT, R, GT dan G.

SENARAI PENERBITAN & SEMINAR

- 1.1 Tan, F.W.N., Sani, M.I. dan Lim, P.E. (2004). Constructed Wetlands for reactive dye and nitrogen removal. Dalam The Second International Symposium on Southeast Asian Water Environment, Hanoi, Vietnam. Disember 1-3, 2004. pp.111-118.
- 1.2 Tan, F.W.N., Sani, M.I. dan Lim, P.E. (2004). Oleh pengarang H Furumai, F Kurisu, H Katayama, H Satoh, S Ohgaki, NC Thanh. Dalam Southeast Asian Water Environment 2. IWA Publishing. Januari 2007.

PENGGUNAAN PAYA TIRUAN UNTUK PENYINGKIRAN PENCELUP REAKTIF, NITROGEN DAN TUNTUTAN OKSIGEN KIMIA

ABSTRAK

Kajian ini dilakukan untuk menilai: (1) kemampuan sistem paya tiruan untuk menyingkirkan pencelup diazo jenis reaktif Remazol Black B (RB5), nitrogen dan tuntutan oksigen kimia (COD) secara serentak, (2) kesan pencelup ke atas penyingkiran nitrogen dan COD, dan (3) kemampuan sekam padi mentah sebagai media alternatif. Peranan tumbuhan paya dinilai dengan membuat perbandingan prestasi penyingkiran di antara paya tiruan yang mengandungi tumbuhan dan tanpa tumbuhan. Sebanyak empat unit paya tiruan jenis aliran sub-permukaan mendatar (SFCWs) yang berskala eksperimen telah dibina dan dioperasi di lapangan dengan tempoh retensi hidraulik nominal sebanyak 7 hari. Dua unit diisi dengan batu kelikir dengan salah satu ditanam dengan tumbuhan cattail (*Typha latifolia*) (GT) dan yang lain itu tanpa tumbuhan (G). Dua unit lagi diisi dengan sekam padi mentah dengan salah satu unit ditanam dengan tumbuhan cattail (RT) dan yang lain itu tanpa tumbuhan (R). Pada mulanya, semua unit paya tiruan disalurkan air buangan domestik. Apabila tumbuhan cattail mencapai kematangan, kepekatan nitrogen ammonia (AN), jumlah nitrogen Kjeldahl (TKN) dan COD ditentukan di alur masuk, alur keluar dan enam titik perantaraan pada kedalaman 15 dan 45 cm. Untuk peringkat kedua, 9.9 kg ha⁻¹ hari⁻¹ RB5 ditambah ke dalam keempat-empat paya tiruan. Sebelum penambahan pencelup, GT, G, RT dan R masing-masing dapat menyingkirkan 91, 63, 100 dan 44 % AN dan 91, 59, 95 dan 45 % TKN. Ini menunjukkan bahawa tumbuhan memainkan peranan yang penting dalam penyingkiran nitrogen. Dengan kehadiran pencelup, hanya GT dan RT dapat menyingkirkan kira-kira 50 % AN dan TKN. Kemerosotan penyingkiran nitrogen pada paya tiruan tanpa tumbuhan didapati lebih ketara. Ini menunjukkan bahawa tumbuhan memainkan peranan dalam mengurangkan sebahagian kesan ketoksikan pencelup. Keputusan ini menunjukkan bahawa paya tiruan yang ditanam

dengan tumbuhan lebih berkesan dalam penyingkiran nitrogen jika dibandingkan dengan paya tiruan tanpa tumbuhan sebelum dan selepas penambahan pencelup. Oleh kerana sebahagian nilai COD adalah akibat sumbangan daripada pencelup dan metabolitnya, maka kesan pencelup ke atas COD tidak dapat dinilai dengan pasti. Perbandingan kecekapan penyingkiran COD di antara GT dan RT dengan G dan R menunjukkan bahawa penurunan lanjutan atau mineralisasi RB5 telah berlaku di dalam GT dan RT. Keempat-empat paya tiruan dapat mencapai prestasi > 70 % dalam penyingkiran RB5. Daripada kajian kinetik, kadar penguraian pencelup di bawah keadaan anoksik didapati berlaku dengan lebih cepat jika dibandingkan dengan keadaan aerobik. Kajian SOUR menunjukkan bahawa RB5 dan metabolitnya yang dihasilkan di bawah keadaan anoksik adalah lebih toksik dan ketoksikan ini dapat diredakan di bawah keadaan aerobik. Ini menunjukkan bahawa RB5 dan sebatian biouraiannya dapat dimineralisasikan di bawah keadaan anoksik diikuti dengan keadaan aerobik. Jadi, paya tiruan ditanam dengan tumbuhan adalah lebih sesuai untuk pengolahan pencelup RB5 kerana ketoksikan pencelup dan metabolit dapat diredakan. Keputusan kajian ini juga menunjukkan bahawa sekam padi mentah dapat digunakan sebagai media alternatif dalam paya tiruan untuk penyingkiran pencelup reaktif, nitrogen dan tuntutan oksigen kimia.

APPLICATION OF CONSTRUCTED WETLANDS FOR REACTIVE DYE, NITROGEN AND CHEMICAL OXYGEN DEMAND REMOVAL

ABSTRACT

This study was carried out to investigate: (1) the potential of constructed wetland systems in removing the reactive diazo dye Remazol Black B (RB5), nitrogen and chemical oxygen demand (COD) simultaneously, (2) the effect of the dye on nitrogen and COD removal, and (3) the potential of raw rice husks as an alternative media. The role of wetland plants was assessed by comparing the treatment performance between the vegetated and unvegetated constructed wetlands. Four experimental-scale horizontal subsurface-flow constructed wetland (SFCWs) units were built and were operated outdoors at a nominal hydraulic retention time of 7 days. Two units were filled with pea gravel, with one of them planted with cattails (*Typha latifolia*) (GT) and the other unplanted (G). The other two units were filled with raw rice husks, one of them planted with cattails (RT) and the other unplanted (R). Initially, all the wetland units were fed with domestic wastewater. When the cattail plants had matured, ammonical nitrogen (AN), total Kjeldahl nitrogen (TKN) and COD concentrations were monitored at the inlet, outlet and six intermediate points at the depths of 15 and 45 cm. For the second stage of this study, a mass loading rate of $9.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ RB5 was spiked into each wetland unit, respectively. Wetland units GT, G, RT and R managed to remove 91, 63, 100 and 44 % AN as well as 91, 59, 95 and 45 % TKN, respectively, before the addition of dye. This indicated that wetland vegetations play an important role in nitrogen removal. In the presence of dye, only GT and RT managed to remove around 50 % AN and TKN. The reductions of nitrogen removal efficiencies were greater in the unplanted units. This indicated that wetland vegetations play some role in reducing the inhibitory effect of dye. The results showed that planted wetland units were more efficient than unplanted units in nitrogen removal before and after the addition of dye indicating that wetland plants play an important role in nitrogen removal.

As some of the COD values were contributed by the dye and its intermediates, the effect of dye on COD removal cannot be ascertained. Comparison of the COD removal efficiencies between GT and RT, and G and R units showed that further reduction or mineralization of RB5 had occurred in GT and RT. It has been demonstrated that the SFCWs have the potential in treating dye with all the wetland units managed to reduce > 70 % RB5. From the kinetic study, the rate of degradation for dye under anoxic condition was found to be faster than that under aerobic condition. The SOUR study indicated that RB5 and the intermediate products generated under anoxic conditions were more toxic but the toxicity could be reduced under aerobic condition. This indicated that RB5 and the intermediate products could be mineralized under the anoxic followed by the aerobic conditions. Thus, planted constructed wetlands are more suited for RB5 dye treatment as the toxicity of the dye and the degradation products could be reduced. The results also showed that the raw rice husks can be used as an alternative media in constructed wetland for the removal of reactive dye, nitrogen and chemical oxygen demand.

BAB SATU Pengenalan

1.1 Pencemaran Air Buangan Berpencelup

Setiap tahun, pelbagai pencelup dihasil dan dipasarkan dalam kuantiti yang besar atas permintaan pengguna dari pelbagai bidang termasuk industri tekstil, alat solek, kertas, kulit binatang, farmasi dan makanan. Di kalangan industri-industri ini, industri tekstil merupakan pengguna bahan pencelup yang terbesar iaitu 2/3 daripada seluruh pasaran bahan pencelup. Pencelup jenis reaktif paling digemari oleh industri tekstil kerana ia dapat memenuhi permintaan pasaran dengan menawarkan pelbagai warna yang terang pada kain kapas (Lourenço *et al.*, 2001). Pencelup reaktif terikat kepada gentian kapas melalui mekanisme penambahan ataupun secara penggantian di bawah keadaan kealkalian dan suhu yang tinggi. Melalui proses pencucian, sebahagian bahan pencelup ini akan dibebaskan dan ia akan sampai ke persekitaran akuatik, terutamanya terlarut atau termendap dalam air. Walaupun kilang tekstil dan kilang pembuatan pencelup telah menjalankan proses pengolahan terhadap air buangan, namun, kebanyakan pencelup masih terkandung dalam air buangan dan tidak dapat disingkirkan dengan berkesan. Pengaliran keluar air buangan yang mengandungi pencelup adalah merbahaya kepada manusia mahupun hidupan akuatik kerana ia boleh mengakibatkan barah atau kanser dan menyebabkan ketoksikan (Tan *et al.*, 1999; Suzuki *et al.*, 2001).

Pencelup mempunyai spektrum yang lebar kerana terdiri daripada struktur kimia yang berlainan, bergantung kepada kumpulan penggantian aromatik dan heterosiklik seperti amina aromatik ($C_6H_5-NH_2$), fenil ($C_6H_5-CH_2$) dan naftil (NO_2-OH). Pencelup azo ($N=N$) dicipta dengan struktur kimia yang kompleks supaya ia tidak mudah diuraikan biarpun terdedah kepada cahaya matahari, suhu yang tinggi dan pelarut kimia seperti detergen. Oleh itu, pencelup jenis azo mempunyai jangka hayat yang panjang dan sukar diolahkan dalam air buangan.

Air buangan yang mengandungi pencelup telah mencemari sumber air dengan pelbagai warna yang jelas kelihatan (Ganesh *et al.*, 1994; Talarposhti *et al.*, 2001). Masalah ini dipandang serius oleh masyarakat. Pihak kerajaan telah mengenakan peraturan mandatori di mana air buangan antaranya yang mengandungi pencelup mesti diolah dan dilunturkan warna sebelum dialirkan ke dalam saluran air.

1.1.1 Proses Pengolahan

Kini, banyak kaedah telah digunakan dalam proses pengolahan air buangan yang mengandungi pencelup. Industri-industri tekstil biasanya mengolah air buangannya menerusi proses kimia ataupun fizik-kimia. Antaranya adalah seperti penjerapan, pemendapan secara kimia, pengumpulan, pengoksidaan, pengozonan, elektrolisis, elektrokimia, penurunan, pembekuan secara kimia, penapisan, penukaran ion (Arslan dan Balcioglu, 1999; Gouvêa *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2003). Kebanyakan teknik ini memang berkesan dalam pengolahan air buangan yang mengandungi pencelup, tetapi masing-masing mempunyai kelemahan sendiri seperti penggunaan bahan kimia secara berlebihan, penghasilan lumpur tebal lalu menyebabkan pencemaran sekunder, kos pengendalian yang tinggi, keperluan teknik pengoperasian yang mahir dan kurang berkesan dalam mengolah air buangan dalam kuantiti yang besar. Misalnya, penjerapan dengan menggunakan karbon teraktif mampu mengolah pencelup yang tidak terbiodegradasikan. Karbon teraktif merupakan agen penjerapan yang paling popular kerana mempunyai keupayaan tinggi dalam melunturkan warna. Akan tetapi, ia hanya dapat mengolah efluen dalam kuantiti yang kecil dan kos yang diperlukan amat tinggi.

Penapisan bermembran, pengozonan, pembekuan secara kimia, pemendapan dan pengumpulan dapat melunturkan warna dalam kuantiti besar dengan sangat berkesan. Penapisan bermembran bertindak dengan cepat manakala pengozonan pula beroperasi dengan kadar yang sederhana. Akan tetapi, kos pengendalian adalah

tinggi dan ia akan menghasilkan lumpur tebal. Ia dikatakan tidak mesra alam kerana memerlukan bahan kimia secara berlebihan dalam pengoperasian.

Sistem pengolahan secara elektrokimia dan elektrolisis biasanya melibatkan prosedur yang agak rumit. Jadi, tenaga profesional dan tenaga mahir diperlukan untuk mengendalikan mesin-mesin. Kos pengendaliannya adalah tinggi.

Bagi mengatasi kelemahan-kelemahan ini, proses secara biologi dititikberatkan kerana ia lebih murah, mesra alam dan tidak menghasilkan lumpur tebal. Malahan, proses biologi mungkin berpotensi dalam penyingkiran ketoksikan pencelup dengan membiouraikan atau menguraikan molekul-molekul kompleks pencelup kepada CO₂ dan H₂O (Azmi *et al.*, 1998). Banyak kajian telah dijalankan dengan menggunakan kaedah biologi yang melibatkan pelbagai jenis bakteria, alga dan fungi (Takeo *et al.*, 1997; Chang *et al.*, 2001; Chen, 2002; López *et al.*, 2004; Aksu dan Tezer, 2005). Antaranya ialah reaktor kelompok berturutan (SBR) yang paling digemari di kalangan saintis (Lim dan Er, 2000) dengan mengkultur pelbagai spesies bakteria untuk tujuan pengolahan bahan pencelup pada peringkat aerobik (Kumar *et al.*, 2005), anaerobik (Plum *et al.*, 2003; Georgiou *et al.*, 2004; Işık dan Sponza, 2004) ataupun gabungan peringkat anaerobik-aerobik (Ganesh *et al.*, 1994 ; Lourenço *et al.*, 2001 ; Libra *et al.*, 2004 ; Supaka *et al.*, 2004 ; Plum dan Rehorek, 2005).

Selain itu, paya tiruan merupakan suatu sistem pengolahan ekoteknologi yang berkesan dalam pengoperasian air tercemar (Hammer, 1990; Kao dan Wu, 2001). Paya tiruan merupakan sistem pengolahan gabungan kaedah fizik, biologi dan kimia. Ia merupakan teknologi yang mesra alam. Paya tiruan terbukti berkesan dalam pengolahan air buangan dengan menyingkirkan nitrogen, fosforus, tuntutan oksigen, bahan pencemaran bertoksik seperti logam berat dan sebatian organik seperti fenol serta bertindak sebagai penapis, penyingkir pepejal yang tersangkut dan penyerap

nutrien (Polprasert dan Dan, 1994; Lim *et al.*, 2001; Werker *et al.*, 2002; Lim, 2002; Lim *et al.*, 2003a; Lim *et al.*, 2003b; Kadlec *et al.*, 2005; Tee *et al.*, 2005; Headley *et al.*, 2005; Keffala dan Ghrabi, 2005; Ciria *et al.*, 2005). Projek paya tiruan yang dijalankan di Putrajaya dan Paya Indah, Selangor untuk mengolah air banjir dan memulihkan kualiti air telah menunjukkan kesedaran Malaysia terhadap kebaikan sistem paya tiruan. Namun begitu, kajian pengolahan pencelup menerusi paya tiruan (Hammer *et al.*, 1993; Davies dan Cottingham, 1994; Mbuligwe, 2005; Davies *et al.*, 2006) masih merupakan bidang baru kerana tidak banyak kajian berkaitan dilaporkan.

1.2 Pengenalan dan Pengelasan Warna

Warna boleh dikelaskan kepada dua jenis iaitu, pigmen dan pencelup. Pigmen tidak larut dalam media sama ada air/pelarut manakala kebanyakan pencelup boleh larut dalam kedua-duanya melainkan pencelup jenis pelarut dan vat yang tidak larut dalam air. Satu perbezaan ketara antara pigmen dengan pencelup ialah pigmen digunakan sebagai warna dalam bentuk fizikal ketika ia dihasilkan. Manakala pencelup akan dilarutkan dalam air untuk membentuk kolam warna dan terbaur sebagai molekul untuk mewarnakan gentian fiber.

Warna yang diberikan oleh pencelup bergantung kepada kumpulan kromofor dan ausokrom. Kromofor bertindak sebagai pemberi warna tetapi warna yang diberinya adalah lemah. Oleh itu, kromofor memerlukan ausokrom kerana ausokrom dapat membaiki kelemahan kromofor dan memberikan keamatan warna yang lebih terang. Ausokrom dapat menggerakkan jalur penyerapan kromofor kepada jarak gelombang yang lebih panjang dan menstabilkan resonan di dalam strukturnya.

Contoh-contoh kumpulan kromofor:

N=N	kumpulan azo	NO ₂	kumpulan nitro
C=O	kumpulan karbonil	NO	kumpulan nitroso

Contoh-contoh kumpulan aukrosom:

NH_2 , NHCH_3 , $\text{N}(\text{CH}_3)_2$	sebagai kation
SO_3H , OH , COOH	sebagai anion

1.2.1 Pengelasan Pencelup

Warna sama ada pigmen atau pencelup organik dikelaskan dalam Colour Index (C.I.) berdasarkan struktur kimia. Terdapat 19 kumpulan C.I. iaitu, asid, 'direct', reaktif, pelarut, pigmen, vat, 'mordant', sulfur, 'disperse', 'basic', kulit, makanan, 'azoic', 'developers', bes pengoksidaan, 'ingrain', agen penerang pendarfluor dan agen penurunan.

Pencelup boleh dikelaskan kepada tiga kelas utama iaitu:

- Anionik : pencelup jenis 'direct', asid dan reaktif
- Kationik : pencelup jenis 'basic'
- Bukan Ionik : pencelup jenis 'disperse'

Kumpulan kromofor dalam pencelup anionik dan bukan ionik kebanyakannya ialah kumpulan azo dan antrakuinon.

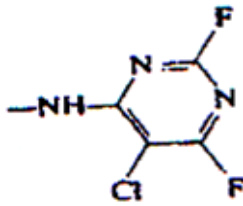
1.2.1.1 Pencelup Jenis Azo

Menurut C.I., pencelup jenis azo merupakan kelas utama diikuti oleh pencelup jenis antrakuinon, triarilmetana dan ftalosianin. Kewujudan satu atau lebih kumpulan azo ($-\text{N}=\text{N}-$) yang disertakan dengan kumpulan ausokrom ($-\text{OH}$ atau $-\text{NH}-$) merupakan ciri pencelup ini. Pencelup yang mempunyai satu kumpulan azo dikenali sebagai pencelup azo manakala dua kumpulan azo dipanggil pencelup diazo.

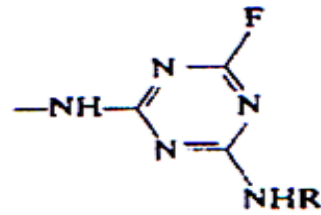
1.2.1.2 Pencelup Jenis Reaktif

Pencelup reaktif bertindak dengan substrat secara kimia membentuk ikatan kovalen pencelup-substrat. Ia boleh mempunyai satu atau lebih kumpulan reaktif.

Contoh-contoh kumpulan reaktif :



Diflorokloropirimidin



Monohalogenotriazin

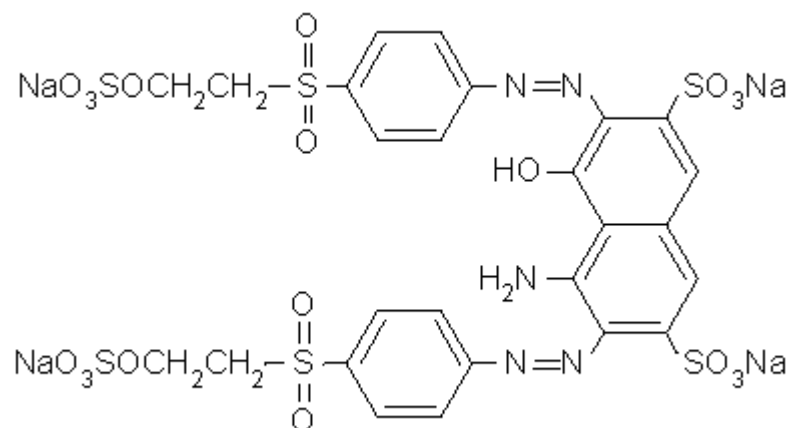


Vinilsulfonil

1.2.2 Pencelup Remazol Black B

Remazol Black B juga dikenali sebagai C.I. Reactive Black 5 (RB5). Ia telah dicipta dan digunakan sejak dulu lagi, dan kini masih digunakan dalam industri tekstil, sarung tangan dan beg tangan. RB5 sangat larut dalam air (> 100 g/L pada 25 °C) dan tidak berbau. RB5 merupakan pencelup jenis reaktif dari kelas anionik. Ia dikategorikan sebagai pencelup diazo kerana mempunyai dua kumpulan azo (-N=N-) yang merupakan kumpulan kromofor (kumpulan pemberi warna). RB5 mempunyai dua kumpulan reaktif vinilsulfonil (-SO₂-CH₂-CH₂-O- SO₃Na).

Struktur molekul bagi Remazol Black B adalah seperti di bawah:



Formula molekul : C₂₆H₂₁N₅O₁₉S₆Na₄

Jisim molekul relatif : 991.8 g/mol

λ_{mak} : 602 nm

1.3 Paya Tiruan

Paya tiruan merupakan paya kejuruteraan yang direkabentuk oleh manusia bagi kegunaan dan faedah manusia. Ia adalah cara alternatif yang murah dalam rawatan air buangan kerana sistem ini hanya bergantung kepada sumber tenaga seperti tenaga solar dan tenaga kinetik, dan tumbuhan paya serta mikroorganisma yang aktif.

Secara amnya, paya tiruan dibina untuk tujuan berikut:

- menggantikan peranan paya semula jadi sebagai habitat kepada hidupan liar akibat penerokaan dan pembangunan ke atas paya semula jadi,
- memperbaiki kualiti air,
- bertindak sebagai benteng/pengawal banjir,
- membekalkan makanan dan serambut.

Komponen-komponen asas yang membentuk sesebuah paya tiruan ialah media yang tepu, tumbuhan emergent atau submergen, hidupan liar dan air. Paya tiruan bukan sahaja mempunyai ciri-ciri positif sesebuah paya semula jadi, malah ia boleh dicipta dan dikawal bagi tujuan memperbaiki kelemahan yang wujud pada paya semula jadi. Reed dan Brown (1995) telah membuktikan bahawa dengan luas permukaan yang sama, paya tiruan mempunyai kecekapan pengolahan yang lebih baik jika dibandingkan dengan paya semula jadi.

Menurut USEPA (2000), ciri-ciri penting seperti jenis dan saiz media, jenis tumbuhan, tempoh masa retensi hidraulik, kadar muatan influen dan kadar muatan bahan pencemar perlu diubahsuai supaya matlamat pengolahan air buangan dapat tercapai pada tahap maksimum.

1.3.1 Jenis Paya Tiruan

Paya tiruan boleh dikategorikan kepada dua jenis yang menggunakan aliran yang berbeza iaitu, paya tiruan jenis aliran menegak (VFS) dan paya tiruan jenis aliran mendatar (HFS). Dalam paya jenis VFS, air buangan disalurkan ke dalam sistem secara bersela dan mengalir keluar secara menegak menerusi sambungan paip dalam sistem. Manakala paya jenis HFS pula, air buangan disalurkan melalui alur masuk (inlet) dan mengalir secara mendatar menerusi sistem dan mengalir ke alur keluar (outlet). Paya tiruan HFS boleh dibahagikan kepada dua jenis lagi iaitu, sub-permukaan (SF) dan permukaan air bebas (FWS).

1.3.1.1 Paya Tiruan Jenis Permukaan Air Bebas (FWS)

Sistem paya tiruan FWS ditunjukkan dalam Rajah 1.1. Paya tiruan FWS biasanya mempunyai bentuk yang panjang dan sempit dengan nisbah 5:1 hingga 10:1 (panjang:lebar) bagi mengelakkan litar pintas. Bahagian terbawah sekali terdiri daripada lapisan tanah liat yang bersifat kalis air bagi tujuan mencegah penyerapan. Media seperti pasir yang dapat memberikan sokongan fizikal kepada tumbuhan ditabur di atas bahagian kalis air. Media ditenggelami air dengan kedalaman yang cetek sepanjang masa. Air buangan akan dibersihkan apabila mengalir menerusi media. Kedalaman air merupakan faktor yang penting kerana tumbuhan mempunyai daya toleransi yang berlainan, misalnya, cattail dapat tumbuh dan hidup pada kedalaman air 1.5 m dan ke atas manakala had toleransi bagi bulrushes ialah 0.05-0.25 m.

Paya tiruan FWS mempunyai beberapa kebaikan seperti kos pengoperasian yang rendah dan kurang berlakunya masalah penyumbatan jika dibandingkan dengan sistem SF. Namun, FWS menimbulkan masalah nyamuk serta bau yang tidak diingini.

1.3.1.2 Paya Tiruan Jenis Aliran Sub-Permukaan (SF)

Sistem paya tiruan SF ditunjukkan dalam Rajah 1.2. Sistem ini biasanya menggunakan batu, pasir atau tanah sebagai media kerana dapat membekalkan luas permukaan yang besar kepada mikroorganisma. Lapisan dasarnya tidak telap kepada air dan biasanya direka mencondong sedikit (1-3%) antara alur masuk dan keluar. Kedalaman media biasanya ialah 0.6 m. Lapisan air berada separas atau di bawah paras media. Air buangan boleh disalurkan secara melintang atau menegak ke dalam sistem melalui alur masuk. Ketika air buangan mengalir menerusi media, air buangan diolah dengan proses penurasan, penjerapan dan pemendakan oleh media dan sistem akar serta pendegradasian mikrobiologi. Efluen dikutip pada saluran keluar atau paip.

1.3.2 Komponen-komponen Paya Tiruan

Komponen-komponen utama dalam sistem paya tiruan seperti tumbuhan akuatik, media dan mikroorganisma dapat mempengaruhi prestasi dalam proses pengolahan. Pemilihan dan penentuan jenis komponen-komponen yang sesuai dapat mengoptimumkan lagi prestasi pengolahan sesebuah sistem paya tiruan.

1.3.2.1 Tumbuhan Akuatik

Dalam sistem paya, air buangan diolah terutamanya menerusi metabolisme bakteria dan pemendapan fizikal. Akan tetapi, tumbuhan akuatik juga memberikan sumbangannya dalam mengolah air buangan kerana ia berfungsi sebagai agen pembersihan air yang unik. Secara amnya, fungsi tumbuhan akuatik adalah untuk memberikan sokongan kepada persekitaran akuatik. Oksigen dapat diangkut terus ke bahagian akar dan sekeliling tanah yang lebih mendalam dengan adanya tumbuhan selain bergantung kepada proses pembauran.

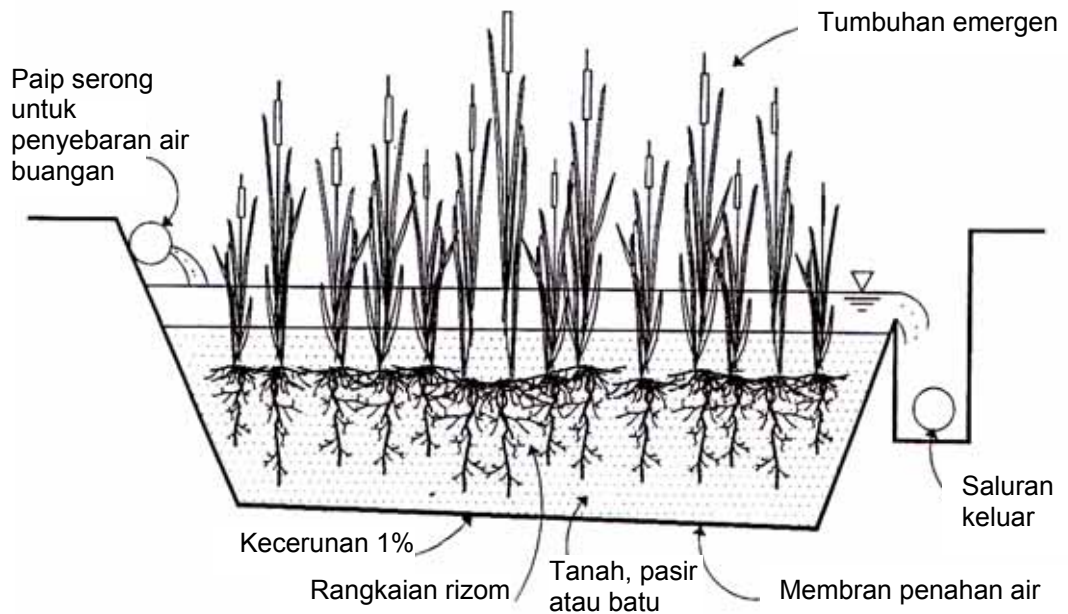
Bahagian akar dan tangkai tumbuhan pada ruangan air menyediakan luas permukaan yang besar kepada mikroorganisma seperti bakteria bagi tujuan pelekatan dan tumbesaran. Akar tumbuhan mampu menjerap dan menuras pepejal.

Bahagian tangkai dan daun pada ruangan di atas permukaan air dapat melemahkan pancaran matahari daripada menyinari permukaan media lalu mengelakkan pertumbuhan alga. Ia dapat mengurangkan kesan angin pada permukaan air supaya pemindahan gas seperti N_2 antara atmosfera dan air tidak terganggu. Selain itu, ia membolehkan pemindahan gas N_2 kepada/daripada bahagian tumbuhan yang tenggelam dan media/air.

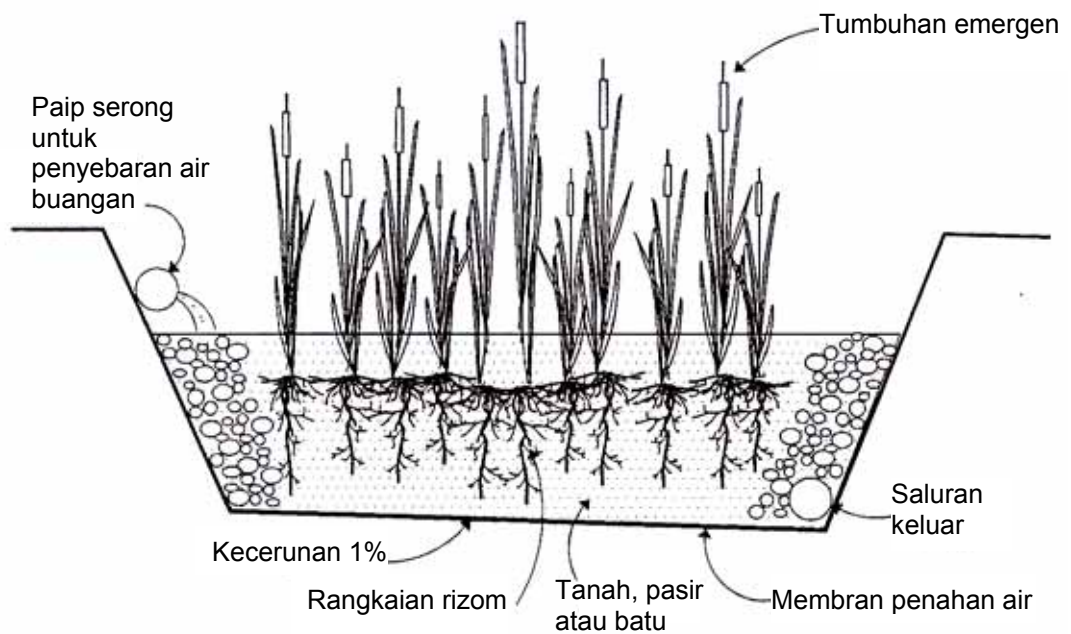
Terdapat tiga jenis tumbuhan yang mendominasi sistem paya tiruan iaitu, tumbuhan yang terapung di permukaan air, tumbuhan yang tenggelam di dalam air dan tumbuhan emergent yang timbul di atas air. Tumbuhan yang digunakan dalam kajian ini adalah tumbuhan emergent yang timbul di atas air.

Cattail (*Typha*), bulrushes (*Scirpus*) dan reeds (*Phragmites*) merupakan tumbuhan emergent yang paling popular di sesebuah paya tiruan (Rajah 1.3). Komuniti tumbuhan emergent ini mempunyai kemampuan hidup yang tinggi kerana sesuai dengan pelbagai situasi sama ada dari segi faktor substrat mahupun jenis air buangan.

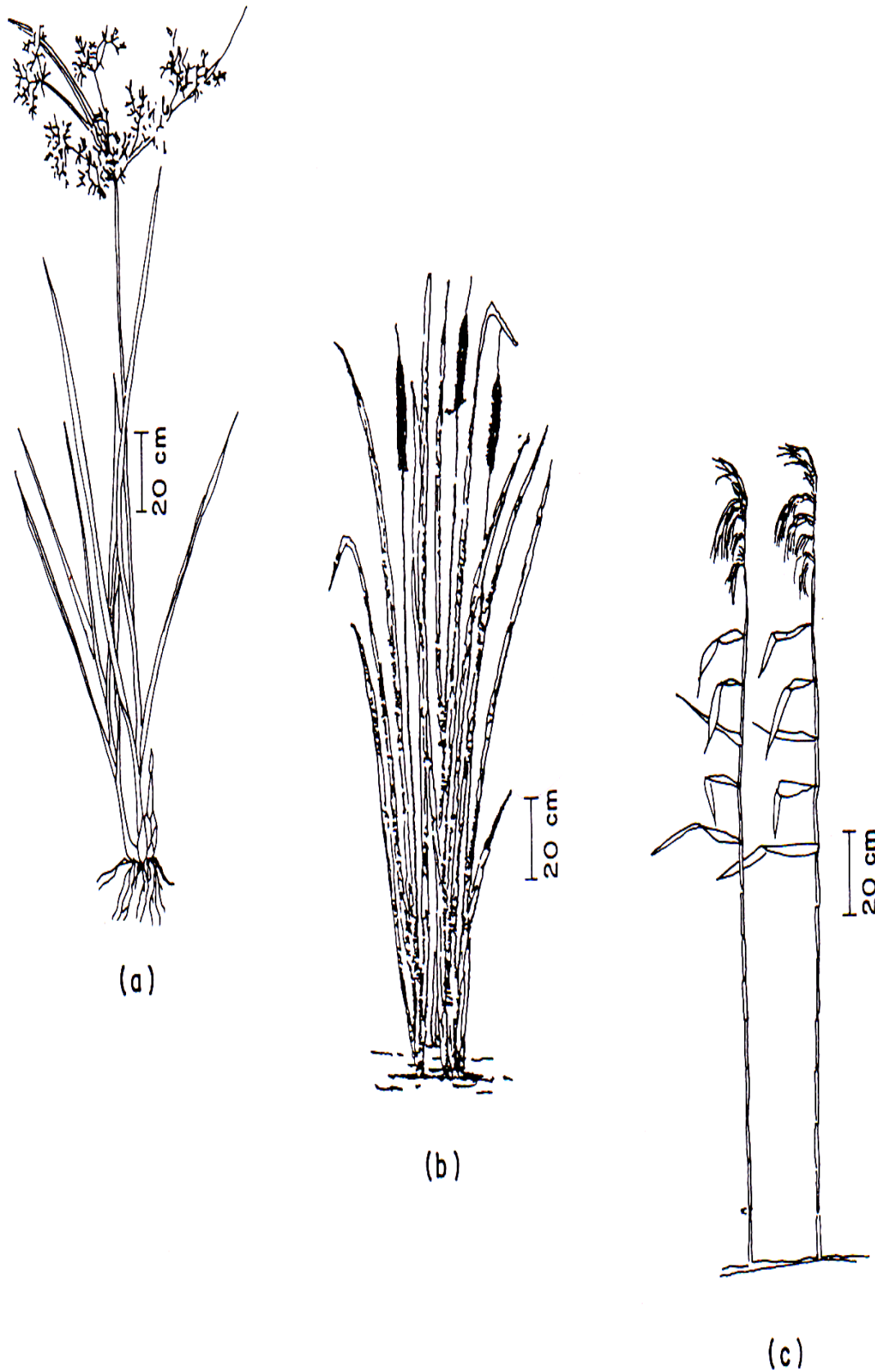
Bahagian daun tumbuhan emergent tumbuh menembusi permukaan air manakala bahagian akar terlekat pada dasar tanah. Tumbuhan ini mempunyai potensi yang lebih tinggi dalam pengolahan air buangan kerana ia menyediakan habitat yang sesuai kepada bakteria dan bertindak sebagai media penapisan. Tambahan pula, tumbuhan ini berupaya mengangkut O_2 dari atmosfera ke akar dan rizom lalu



Rajah 1.1: Paya tiruan berjenis permukaan air bebas (FWS) (Lim dan Polprasert, 1998).



Rajah 1.2: Paya tiruan berjenis aliran sub-permukaan (SF) (Lim dan Polprasert, 1998).



Rajah 1.3: Jenis tumbuhan emergent, (a) bulrushes (*Scirpus longii*) (b) cattail (*Typha latifolia*) dan (c) reeds (*Phragmites communis*) (Lim dan Polprasert, 1998).

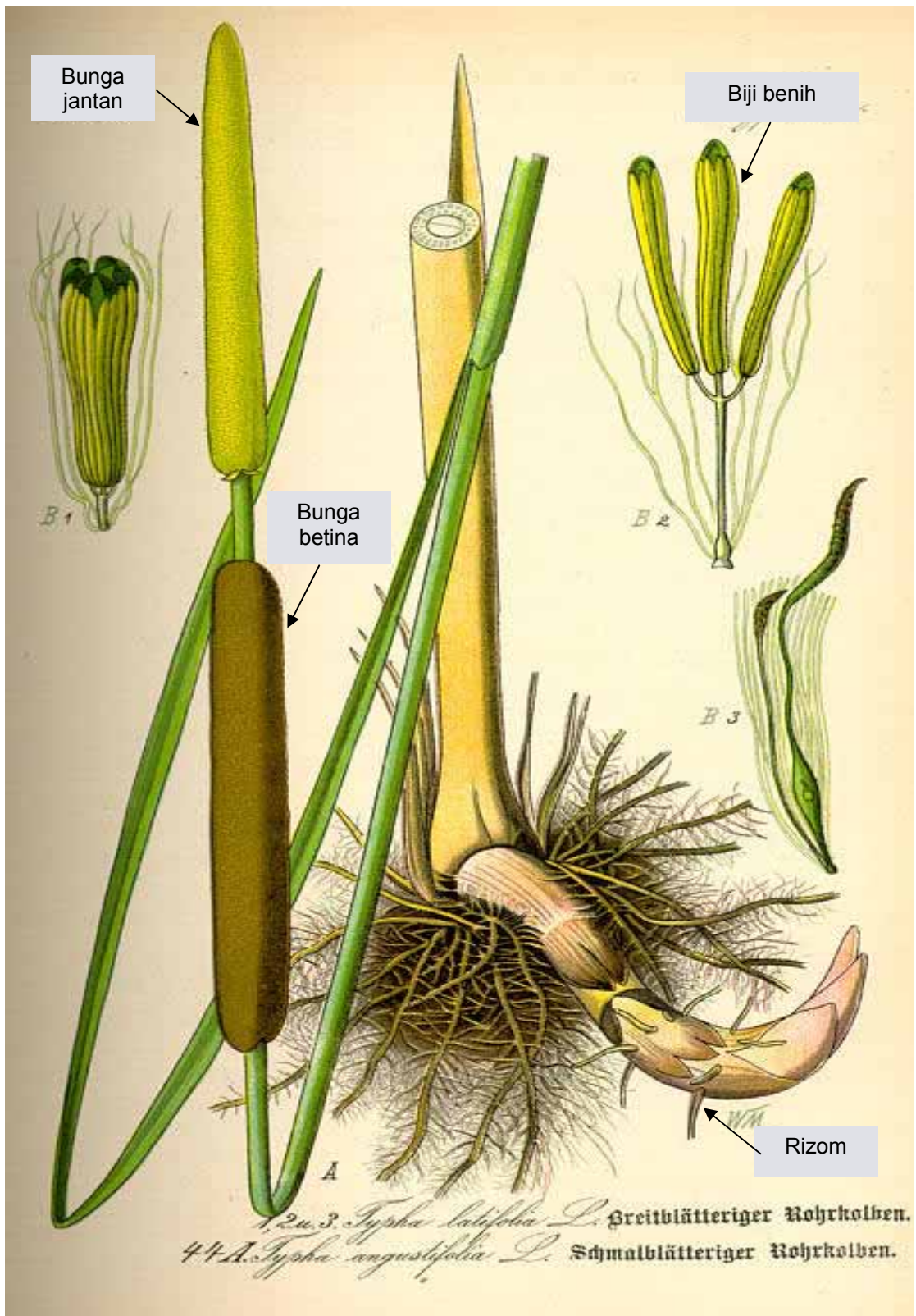
membentuk zon aerobik di dalam rizosfera. Sebagai contoh, Reed *et al.* (1988) dan Brix (1990) masing-masing mendapati bahawa kadar pengangkutan O₂ oleh sistem akar tumbuhan reeds ialah 5–45 dan 5.86 g/m².d bergantung kepada kepekatan dan tahap ketegangan O₂ dalam tanah. Keupayaan pengambilan nitrogen dan fosforus melalui rizom dari sumber keladak (sediment source) adalah lebih tinggi berbanding dari air.

(a) Cattail (Rumput Colok Cina)

Cattail boleh dibahagikan kepada dua jenis iaitu, *Typha latifolia* dan *Typha augustifolia*. Ia mempunyai populasi yang meluas dan ia mudah dijumpai di kawasan paya, parit dan tali air.

Cattail mempunyai kemampuan hidup yang kuat di mana ia dapat hidup bertahun-tahun. Ia mempunyai sifat fizikal seperti wujud dalam bentuk jambak, tegap dan berdiri tegak. Daunnya sempit dan lurus dengan hujung yang tajam. Ia boleh mencapai ketinggian sehingga 3.5 m dari dasar tangkalnya. Akar cattail mampu menembusi ke dalam media sehingga 0.3 m. Ia mempunyai tangkal yang bulat dan pendek, menjalar di dalam media. Anak cattail baru akan tumbuh di sini (Rajah 1.4).

Cattail mengambil masa selama tiga bulan untuk mencapai kematangan dan mula berbunga. Tangkal yang berbunga adalah lebih tinggi dan bunganya yang seakan-akan batang cerut tumbuh di hujung tangkal. Bunga cattail bersifat uniseks di mana bahagian betina berada di bawah bahagian jantan dan ia berbentuk silinder setebal 2.5-4 cm dan padat. Bunganya berwarna coklat kemerahan dan diselaputi dengan bijih benih yang berbulu putih dan halus apabila sudah matang. Bijih benih yang ringan dapat disebarkan ke merata tempat akibat tiupan angin sebagai agen pembiakan. Ruang kosong pada tisu cattail membolehkan pengangkutan O₂ dari daun



Rajah 1.4: Bunga, biji benih dan sistem rizom bagi cattail (Otto, 1999).

ke akar dan sekeliling media. Ini membolehkan proses penguraian dan pengambilan bahan pencemar dari air dilakukan oleh bakteria aerobik.

1.3.2.2 Media

Media merupakan matriks yang penting dalam sesuatu sistem paya tiruan kerana ia merupakan komponen yang memberikan sokongan kepada tumbuhan emergen di mana sistem akar dapat menembusnya. Ia juga membekalkan habitat kepada mikroorganisma kerana mempunyai luas permukaan yang besar. Selain itu, media mampu menyingkirkan bahan pencemar yang terkandung dalam air buangan melalui proses penukaran ion, penjerapan dan pemendakan.

Penentuan media yang sesuai bergantung kepada faktor resapan dan muatan penjerapan nutrien dan bahan pencemar. Saiz dan jenis media akan memberi kesan terhadap konduktiviti hidraulik di mana konduktiviti hidraulik yang lemah akan menurunkan keberkesanan sistem paya dalam mengolah air buangan akibat berlakunya litar pintas. Kandungan bahan kimia dalam media juga akan memberi kesan terhadap paya tiruan. Media dengan kandungan nutrien yang rendah akan menyebabkan tumbuhan mengambil nutrien terus daripada air buangan. Media yang mengandungi Al dan Fe yang tinggi dapat menurunkan kepekatan fosfat dalam influen dengan berkesan.

(a) Batu Kelikir (Gravel)

Batu kelikir dipilih sebagai media dalam sistem paya tiruan ini kerana ia dapat memberi sokongan fizikal kepada sistem akar dan rizom tumbuhan cattail. Batu kelikir dapat menawarkan substrat yang sesuai kepada cattail, kadar pengaliran yang cekap, kadar resapan yang tinggi serta konduktiviti hidraulik yang baik. Batu kelikir yang telah dicuci dapat menurunkan risiko "clogging" bagi meningkatkan kebolehan dalam proses penapisan.

(b) Sekam Padi Mentah (Raw Rice Husks)

Setiap tahun sempena musim menuai, sekam padi akan dihasilkan sebagai bahan buangan dalam kuantiti yang besar dan menimbulkan masalah pembuangannya. Sekam padi tidak sesuai dijadikan makanan binatang kerana kandungan proteinnya yang rendah. Kaedah tradisi dalam pengurusan sekam padi adalah melalui pembakaran secara terbuka tetapi ia bukan satu cara yang mesra alam kerana menyebabkan pencemaran udara. Oleh itu, sekam padi harus dipergunakan bagi memanfaatkan hidup kita.

Sekam padi terdiri daripada bahan-bahan organik seperti lignin, selulosa dan hemiselulosa manakala serbuk sekam padi mengandungi silika yang tinggi. Sekam padi sesuai dijadikan sebagai agen penjerapan kerana kandungan selulosa dan silika dapat menyerap pelbagai bahan pencemar seperti pencelup dengan berkesan (Chuah *et al.*, 2005). Ia dikatakan murah kerana ia merupakan bahan mentah secara semulajadi yang senang didapati di kawasan pertanian yang mengusahakan padi.

1.3.2.3 Mikroorganisma

Sistem paya amat bergantung kepada aktiviti-aktiviti mikroorganisma seperti bakteria, alga dan protozoa dalam membiodegradasikan bahan pencemar. Mikroorganisma dapat mencernakan atau menguraikan bahan pencemar yang mempunyai ikatan kimia yang kompleks kepada komponen-komponen yang lebih ringkas lalu mengurangkan ketoksikannya supaya tidak mengancam kehidupan akuatik dan tidak membahayakan manusia.

(a) Bakteria

Bakteria dapat dikategorikan kepada dua jenis iaitu, bakteria aerobik dan bakteria anaerobik. Bakteria aerobik seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* ialah

bakteria yang memerlukan oksigen dalam proses nitrifikasi iaitu, pengoksidaan ammonia kepada nitrat. Ia biasanya didapati di sekitar sistem akar tumbuhan kerana tumbuhan akan mengangkut oksigen dari udara ke dalam tanah.

Bakteria anaerobik pula didapati di zon yang kekurangan oksigen kerana bakteria ini tidak memerlukan oksigen untuk menjalankan proses denitrifikasi. Contoh bakteria anaerobik adalah seperti *Akromobacter* dan *Aerobacter*.

(b) Alga

Alga wujud dalam pelbagai jenis bentuk dan saiz. Pertumbuhan alga sama ada dalam kegelapan atau cahaya dirangsangkan oleh fosfat dan nitrat. Menurut Palmer (1962), spesies alga yang biasa didapati di dalam sistem paya tiruan adalah *Phormidium*, *Agmenellum*, *Lepocinclis*, *Nitzschia*, *Pyrobotrys*, *Tetraedron*, *Euglena*, *Spirogyra*, *Chlorogonium*, *Phacus*, *Chlorella* dan *Lyngbya*.

(c) Protozoa

Ameoba, *Siliat* dan *Flagelat* merupakan tiga kumpulan utama protozoa. *Siliat* memainkan peranan yang penting kerana ia memakan sebilangan besar bakteria yang terdapat dalam air buangan. *Siliat* boleh dibahagikan kepada tiga jenis iaitu, yang merangkak, yang berenang dan yang bertangkai.

1.4 Penyingkiran Nitrogen dalam Sistem Paya Tiruan

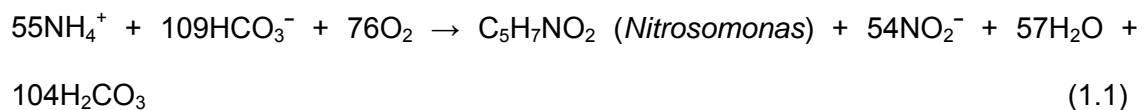
Dalam sistem paya tiruan, nitrogen wujud dalam pelbagai bentuk seperti nitrogen ammonia (NH_3 , NH_4^+), nitrogen organik dan nitrogen teroksida (NO_2^- , NO_3^-). Mekanisme penyingkiran nitrogen merangkumi nitrifikasi/denitrifikasi, pengewapan ammonia (NH_3), ammonifikasi, pengambilan nitrogen oleh tumbuhan dan penyerapan matriks. Banyak kajian telah membuktikan bahawa antara mekanisme ini, nitrifikasi/

denitrifikasi, pengewapan ammonia dan pengambilan nitrogen oleh tumbuhan adalah mekanisme penyingkiran yang terpenting dalam sistem paya tiruan (Brix, 1993; Bavor *et al.*, 1995; Vymazal, 1999; Lim *et al.*, 2001). Apabila kandungan nitrogen dalam influen adalah rendah, tumbuhan akan bersaing dengan bakteria untuk mendapatkan NH_4^+ dan NO_3^- manakala kandungan nitrogen yang tinggi akan merangsangkan aktiviti nitrifikasi dan denitrifikasi.

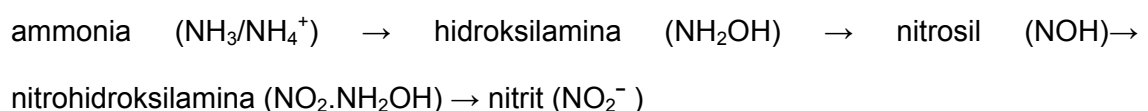
1.4.1 Nitrifikasi

Nitrifikasi adalah suatu proses kemoautotrofik yang ditakrifkan sebagai pengoksidaan ammonia kepada nitrat dengan nitrit sebagai bahan perantaraan. Pengoksidaan N-ammonia kepada N-nitrat dilakukan oleh bakteria autotrof dalam keadaan aerobik. Bacteria mendapat tenaga daripada pengoksidaan ammonia atau/dan nitrit serta karbon dioksida dalam mensintesisakan sel-sel baru. Organisma ini memerlukan oksigen semasa mengoksidakan N-ammonia kepada N-nitrit dan N-nitrit kepada N-nitrat.

Pengoksidaan ammonia kepada nitrat melibatkan dua peringkat (Wallace dan Nicholas, 1969; Hauck, 1984). Peringkat pertama ialah pengoksidaan ammonia kepada nitrit oleh bakteria aerobik seperti *Nitrosomonas* yang amat bergantung pada pengoksidaan ammonia untuk tumbesaran.

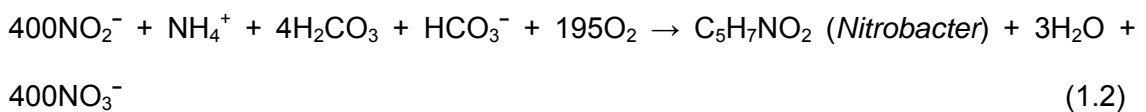


Laluan tindak balas dalam pengoksidaan ammonia kepada nitrit yang dicadangkan oleh Hauck (1984) adalah seperti berikut:



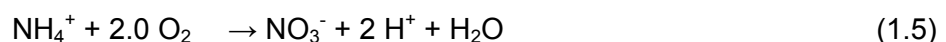
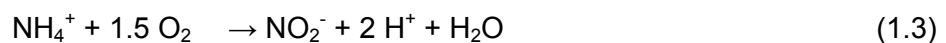
Bahan perantara NOH dan $\text{NO}_2\text{NH}_2\text{OH}$ sentiasa wujud bersama. Penglibatan mereka memberikan andaian yang konsisten bahawa dua elektron dipindah dalam langkah pengoksidaan masing-masing antara NH_4^+ dan NO_2^- .

Peringkat kedua pula melibatkan pengoksidaan nitrit kepada nitrat. Dalam proses penukaran ini, jumlah kealkalian yang besar digunakan dan ini mengakibatkan nilai pH meningkat. *Nitrobacter* adalah bakteria pengoksida nitrit dalam peringkat ini.



Vymazal (1995) merumuskan bahawa nitrifikasi dipengaruhi oleh suhu, nilai pH, sifat kealkalian air, bahan karbon takorganik, kepekatan ammonia dan keterlarutan oksigen. Suhu optimum bagi nitrifikasi adalah antara 30-35 °C. Kadar nitrifikasi menurun pada suhu < 5 °C dan suhu > 40 °C. Suhu minimum bagi pertumbuhan *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* masing-masing adalah 5 dan 4 °C (Cooper dan Maeseneer, 1996). Nilai pH < 6 merosotkan proses nitrifikasi. Setelah ammonia dioksidakan, asid nitrik terbentuk menyebabkan pH menurun.

Secara amnya, nitrifikasi dapat ditunjukkan dengan persamaan di bawah:

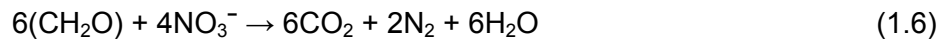


1.4.2 Denitrifikasi

Proses pengoksidaan anoksik yang pertama selepas pengurangan oksigen ialah denitrifikasi. Jika ditinjau dari sudut biokimia, denitrifikasi ialah suatu proses yang

ditindak oleh bakteria anaerobik di mana NO_3^- -N sebagai terminal penerima elektron dan gas $\text{N}_2/\text{N}_2\text{O}$ dihasilkan. Gas nitrogen merupakan hasil dominan dalam denitrifikasi. Kehilangan nitrogen daripada efluen berlaku akibat ketidakhadiran oksigen (anoksik) apabila karbon organik telah sedia ada.

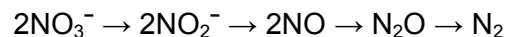
Denitrifikasi boleh diwakili oleh persamaan (Hauck, 1984):



Tindak balas ini sehalu, tidak dapat dibalikkan. Ia berlaku dalam keadaan anaerobik atau anoksik (nilai ORP = +350 ke +100 mV) di mana nitrogen bertindak sebagai penerima elektron yang menggantikan oksigen.

Kebanyakan bakteria denitrifikasi adalah kemoheterotrof yang hanya boleh mendapatkan tenaga menerusi tindak balas kimia dengan menggunakan komponen organik sebagai penderma elektron dan bahan karbon. *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Bacillus* dan *Micrococcus* adalah bakteria terpenting dalam tanah.

Perubahan biokimia daripada nitrat kepada nitrit dan diikuti dengan penghasilan nitrik oksida, nitrous oksida dan gas nitrogen yang disarankan oleh Vymazal (1995) ialah:



Proses denitrifikasi dihadkan oleh beberapa jenis faktor. Menurut Johnston (1991) dan Vymazal (1995), kadar denitrifikasi dipengaruhi oleh ketidakhadiran oksigen, keupayaan tindak balas redoks, kelembapan tanah, suhu, pH, kehadiran bakteria, karbon dan nitrat, jenis tanah, lapisan air dan bahan organik. Dalam denitrifikasi, suhu optimum adalah dalam julat 25-65 °C, pH optimum dalam julat 7-8.

Alkali yang dihasilkan semasa denitrifikasi boleh menyebabkan pH meningkat. Kadar denitrifikasi akan menurun apabila kehadiran NO_3^- dan bekalan karbon adalah rendah.

1.4.3 Ammonifikasi (Mineralisasi)

Ammonifikasi ialah proses pertukaran N-organik kepada N-takorganik seperti NH_4^+ -N. Kadar ammonifikasi adalah paling cepat pada zon aerobik yang mengandungi kepekatan oksigen yang tinggi. Kadar ammonifikasi semakin berkurang apabila mineralisasi beralih dari zon aerobik ke zon anaerobik akibat kekurangan oksigen.

Kadar ammonifikasi yang berlaku dalam sistem paya tiruan bergantung kepada suhu, pH, nisbah C/N, nutrien di dalam sistem, serta tekstur dan struktur media (Reddy dan Patrick, 1984). Nilai pH optimum adalah dalam julat 6.5-8.5. Reddy *et al.* (1979) merumuskan bahawa kadar ammonifikasi adalah berganda dua apabila suhu meningkat sebanyak 10 °C.

1.4.4 Pengewapan Ammonia

Pengewapan ammonia merupakan suatu proses penyingkiran nitrogen. Ammonia berada dalam keseimbangan di antara bentuk NH_3 dan bentuk NH_4^+ seperti:



Pada pH 9.3, nisbah antara ammonia dan ion ammonium ialah 1:1, proses pengewapan adalah tinggi. Manakala pada pH 8.0 dan ke bawah, kehilangan NH_3 tidak begitu serius (Reddy dan Patrick, 1984). Proses fotosintesis yang dijalankan oleh alga akan meningkatkan nilai pH yang turut meningkatkan kadar pengewapan ammonia. Ketidakhadiran CO_2 turut meningkatkan pengewapan ammonia.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kadar pengewapan ammonia adalah seperti kepekatan NH_4^+ dalam air, suhu, angin, sinaran cahaya matahari, kuantiti tumbuhan, dan kehadiran CO_2 (Vymazal, 1995).

1.4.5 Pengambilan Nitrogen oleh Tumbuhan

Ammonia diambil dalam bentuk ion ammonium oleh akar tumbuhan. Nitrat diturunkan oleh *Nitrobacter* kemudian dilepaskan ke tanah dan diserap oleh tumbuhan. Pengambilan nitrogen oleh tumbuhan menjadi bermakna jika tumbuhan mengalami penuaian dan biojisim disingkirkan daripada sistem. Sebahagian besar nitrat dalam bahan N-organik disimpan terutama pada vakuol sel atau dibawa ke bahagian tumbuhan yang lain. Nitrogen yang telah dikumpulkan oleh tumbuhan akan dibebaskan semula kepada sistem di mana gabungan N dalam tumbuhan diurai kepada ammonia oleh pengurai pada saat tumbuhan mati.

1.4.6 Penjerapan Media

Dalam keadaan terturun, ammonia adalah stabil dan dapat terjerap pada permukaan media yang aktif. Namun, penjerapan ammonia dapat dibalikkan ketika kawasan penukaran kation media menjadi tepu. AN akan dibebaskan semula kepada sistem. Maka, penjerapan media tidak dianggap sebagai proses penyingkiran nitrogen.

1.5 Model Rasional untuk Penyingkiran Nitrogen

Penyingkiran nitrogen dalam paya tiruan jenis SF dapat dihuraikan dengan model tertib pertama aliran jenis palam. Anggapan yang perlu dipertimbangkan ialah:

- Penyingkiran AN hanya disebabkan oleh proses nitrifikasi.
- Jumlah nitrogen Kjeldahl (TKN) yang terkandung dalam reaktor ditukar menjadi AN.
- Paya tiruan adalah jenis beraliran palam.

Model-model yang dicadangkan oleh USEPA (2000), WPCF (1990) dan Reed *et al.* (1995) adalah seperti berikut:

$$N_e/C_o = \exp (-kt) \quad (\text{Model I}) \quad (1.8)$$

dengan N_e = kepekatan AN dalam efluen, mg/L
 C_o = kepekatan TKN dalam influen, mg/L
 k = pemalar kadar tertib pertama, hari⁻¹
 t = tempoh retensi hidraulik (HRT), hari

Di sini, TKN influen digunakan kerana semua TKN yang memasuki paya tiruan itu akan ditukar menjadi AN. Untuk perbandingan, suatu model alternatif juga dicadangkan seperti berikut:

$$N_e/N_o = \exp (-kt) \quad (\text{Model II}) \quad (1.9)$$

dengan N_e = kepekatan AN dalam efluen, mg/L
 N_o = kepekatan AN dalam influen, mg/L
 k = pemalar kadar tertib pertama, hari⁻¹
 t = tempoh retensi hidraulik (HRT), hari

Untuk pengolahan TKN pula, model yang serupa dengan Model II dicadangkan seperti berikut:

$$C_e/C_o = \exp (-kt) \quad (\text{Model III}) \quad (1.10)$$

dengan C_e = kepekatan TKN dalam efluen, mg/L
 C_o = kepekatan TKN dalam influen, mg/L
 k = pemalar kadar tertib pertama, hari⁻¹
 t = tempoh retensi hidraulik (HRT), hari

1.6 Evapotranspirasi dan Evaporasi

Proses kehilangan air melalui proses penyejatan daripada permukaan daun dan batang tumbuhan dikenali sebagai evapotranspirasi manakala proses kehilangan air melalui proses penyejatan daripada permukaan media dikenali sebagai evaporasi. Proses evapotranspirasi hanya berlaku pada sistem yang ditanami tumbuhan manakala proses evaporasi berlaku pada sistem yang tidak ditanami tumbuhan.

Kadar evapotranspirasi dan evaporasi amat bergantung kepada beberapa faktor iaitu, keamatan sinaran cahaya matahari, kelembapan relatif persekitaran dan suhu udara. Kadar evapotranspirasi/evaporasi (ET) dapat dihitung dengan formula berikut:

$$ET = \text{kadar aliran masuk} + \text{air hujan} - \text{kadar aliran keluar}$$

Menurut Hammer (1992), kadar evapotranspirasi adalah 1.4 kali ganda kadar evaporasi tasik. Dalam kajian Tanner dan Sukias (1995) pula, kadar evapotranspirasi untuk sistem yang mengandungi tumbuhan adalah sebanyak 7.1-11.7 mm hari⁻¹ manakala 3.2 mm hari⁻¹ bagi sistem yang tidak mengandungi tumbuhan. Heritage *et al.* (1995) pula melaporkan bahawa kadar evapotranspirasi untuk sistem paya tiruan yang ditanami cattail ialah 16.2-28.4 mm hari⁻¹.

Menurut Lim (1998), kadar evapotranspirasi bagi sistem SF yang bermedia batu kelikir dan ditanam dengan cattail dengan HRT 7 hari adalah 19.4 mm hari⁻¹ manakala kadar evaporasi bagi sistem yang tidak ditanam dengan cattail adalah 6.2 mm hari⁻¹. Jadi, evapotranspirasi akan mengganggu kejitian eksperimen sistem paya tiruan terutamanya di kawasan beriklim khatulistiwa seperti Malaysia, yang terdedah kepada sinaran cahaya matahari sepanjang tahun. Kadar aliran air dalam sistem paya tiruan akan menjadi lebih perlahan dan menyebabkan bacaan kepekatan nitrogen