

**PERBANDINGAN PENYINGKIRAN FENOL,
NITROGEN DAN TUNTUTAN OKSIGEN DALAM
PAYA TIRUAN YANG BERMEDIA BATU HALUS
DAN SEKAM PADI**

oleh

TEE HENG CHONG

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

2006

PENGHARGAAN

Terlebih dahulu, saya ingin mengambil kesempatan ini untuk mengucapkan jutaan terima kasih kepada Profesor Lim Poh Eng selaku penyelia saya, Profesor Madya Dr. Seng Chye Eng dan Profesor Madya Dr. Ahmad Mohd Noor selaku penyelia bersama saya atas segala bimbingan, tunjuk ajar, nasihat, cadangan dan sokongan moral yang diberikan untuk mengatasi masalah dan rintangan yang saya hadapi sepanjang tempoh kajian ini.

Tidak lupa juga ucapan jutaan terima kasih ingin saya tujukan kepada papa, mama, goh, leng, mei, di, lee dan ahli keluarga yang lain kerana telah memberikan sokongan dan galakkan yang tak terhingga kepada saya.

Di samping itu, saya juga ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada Encik Chee, Encik Chua, Encik Yee, Encik Wahad, saudara Harry Chong, saudari Vanitha dan rakan seperjuangan saya iaitu saudari Flora yang telah banyak memberikan tunjuk ajar dan berjuang bersama saya untuk menyempurnakan projek penyelidikan ini. Tanpa sokongan dan kerjasama mereka, penyelidikan ini tidak akan berjalan dengan lancar.

Akhir sekali, ucapan terima kasih ingin saya sampaikan kepada semua pihak yang terlibat secara langsung mahupun tidak langsung dalam membantu saya menyiapkan projek penyelidikan ini. Jutaan ampun maaf ingin saya mohonkan daripada mana-mana pihak jika saya telah menyinggung perasaan mereka, tidak kira dari segi pertuturan ataupun kelakuan saya semasa menjalankan kajian ini. Jasa semua dikenang selalu.

SUSUNAN KANDUNGAN

	Muka surat
PENGHARGAAN	ii
JADUAL KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	vii
SENARAI RAJAH	viii
SENARAI PLAT	xii
SENARAI SINGKATAN	xiii
SENARAI LAMPIRAN	xiv
SENARAI PENERBITAN DAN SEMINAR	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xix
BAB SATU : PENGENALAN	
1.1 Sistem Paya Tiruan	1
1.1.1 Jenis Paya Tiruan	2
1.1.2 Tumbuhan Paya	4
1.1.2.1 Cattail (<i>Typha latifolia</i>)	5
1.1.3 Media	7
1.1.3.1 Batu halus (gravel)	8
1.1.3.2 Sekam Padi	8
1.2 Mikroorganisma	9
1.3 Penyingkiran Nitrogen dalam Paya Tiruan	10
1.3.1 Pemeruapan Ammonia	11
1.3.2 Ammonifikasi (Mineralisasi)	11
1.3.3 Nitrifikasi dan Denitrifikasi	12
1.3.4 Pengambilan Nitrogen oleh Tumbuhan	14
1.3.5 Jerapan Media	15
1.4 Mekanisme Penyingkiran Sebatian Organik dalam Sistem Paya Tiruan	15
1.4.1 Biouraian Secara Respirasi Aerobik	16
1.4.2 Biouraian Secara Respirasi Anoksik	17
1.4.3 Biouraian Secara Respirasi Anaerobik	17
1.4.4 Penyingkiran Bahan Organik Terbiourai	19

1.5	Fenol	19
1.5.1	Lintasan Penguraian Fenol	20
1.6	Model Rasional Bagi Penyingkiran Nitrogen, Tuntutan Oksigen (COD) dan Fenol	21
1.7	Evapotranspirasi dan Evaporasi	24
1.8	Kajian Corak Aliran Hidraulik	25
1.9	Sorotan Kajian Lepas tentang Penggunaan Paya Tiruan dalam Pengolahan Air Buangan	27
1.9.1	Peranan Tumbuhan dalam Kecekapan dan Mekanisme Penyingkiran Nitrogen dan Tuntutan Oksigen	27
1.9.2	Penggunaan Media yang Berlainan	29
1.9.3	Kesan Kedalaman	30
1.9.4	Pengolahan Fenol	30
1.10	Objektif Kajian	32
BAB DUA : BAHAN DAN KAEDAH PENYELIDIKAN		
2.1	Tapak Kajian	33
2.2	Penyediaan Paya Tiruan	33
2.2.1	Titik Pensampelan	33
2.3	Penyediaan Media	36
2.3.1	Batu Halus (Pea Gravel)	36
2.3.2	Sekam Padi Mentah	37
2.4	Penanaman Cattail	39
2.5	Pengoperasian Paya Tiruan	40
2.5.1	Pengolahan Air Buangan Domestik (Peringkat I)	40
2.5.1	Pengolahan Air Buangan Domestik Bersama Fenol (Peringkat II, III Dan IV)	42
2.6	Penentuan Tempoh Retensi Hidraulik (HRT) Nominal	44
2.7	Kajian Corak Aliran Hidraulik	45
2.8	Kajian Evapotranspirasi dan Penyejatan	47
2.9	Kajian Pemeruapan Fenol	47
2.10	Pemantauan Prestasi Pengolahan Paya Tiruan	49
2.10.1	Pensampelan	49
2.10.5	Penentuan Kepekatan AN [4500-NH ₃ B dan C(APHA 1998)]	49
2.10.3	Penentuan Kepekatan N-Org [4500-N _{org} B(APHA 1998)]	50

2.10.4	Penentuan Kepekatan Fenol [5530 D(APHA 1998)]	50
2.10.5	Penentuan Tuntutan Oksigen Kimia (COD) [5220 C (APHA 1998)]	51
2.11	Kajian Kinetik	52
2.12	Penentuan Kadar Spesifik Pengambilan Oksigen (SOUR) [2710 B (APHA 1998)]	54
2.13	Analisis Spektroskopi Jisim dan Gas Kromatografi (GCMS)	55
2.14	Kawalan Mutu Data	56
BAB TIGA : KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN		
3.1	Kajian Evapotranspirasi dan Evaporasi	58
3.2	Kajian Corak Aliran Hidraulik	61
3.3	Penyingkiran Spesies Nitrogen	72
3.3.1	Nitrogen Ammonia (AN)	72
3.3.1.1	Sebelum Penambahan Fenol (Fasa I)	72
3.3.1.2	Penambahan 300 mg/L Fenol (Fasa III)	77
3.3.1.3	Penambahan 500 mg/L Fenol (Fasa IV)	80
3.3.1	Nitrogen Kjedhal Total (TKN)	86
3.4	Penyingkiran Fenol	92
3.4.1	Penambahan 300 mg/L	92
3.4.2	Penambahan 500 mg/L	96
3.5	Penyingkiran Tuntutan Oksigen (COD)	102
3.5.1	Sebelum Penambahan 300 mg/L	102
3.5.2	Penambahan 300 mg/L dan 500 mg/L Fenol	105
3.6	Kajian Kinetik terhadap Biouraian Fenol	106
3.6.1	Kajian Kinetik pada Peringkat Pertama	107
3.6.2	Kajian Kinetik pada Peringkat Kedua	110
3.6.3	Model Kinetik bagi Biouraian Fenol	112
3.7	Kajian Lintasan Biouraian Fenol	115
3.8	Kesan Ketoksikan Fenol dan Sebatian Perantaraan Biouraiannya terhadap Kultur Bercampur dan Kultur Bercampur Penitritan	127
3.8.1	Kesan Ketoksikan terhadap Kultur Bercampur Penitritan	127
3.8.2	Kesan Ketoksikan terhadap Kultur Bercampur	130
3.8.1	Kesan Ketoksikan Hasil Biouraian terhadap Kultur Bercampur Penitritan	131

3.9	Pemodelan Matematik untuk Penyingkiran AN dan Fenol dalam Paya Tiruan	134
3.9.1	Model Penyingkiran AN	134
3.9.2	Model Penyingkiran Fenol	137
3.9.2.1	Penambahan 300 mg/L Fenol	137
3.9.2.2	Penambahan 500 mg/L Fenol	139
BAB EMPAT : KESIMPULAN		
4.1	Kajian Evapotranspirasi dan Evaporasi	142
4.2	Kajian Corak Aliran Hidraulik	142
4.3	Penyingkiran Spesies Nitrogen	142
4.3.1	Sebelum Penambahan Fenol (Fasa I)	142
4.3.2	Penambahan 300 mg/L Fenol (Fasa III)	143
4.3.3	Penambahan 500 mg/L Fenol (Fasa IV)	144
4.4	Penyingkiran Fenol	144
4.4.1	Peringkat Penambahan 300 mg/L Fenol	144
4.4.2	Peringkat Penambahan 500 mg/L Fenol	145
4.5	Penyingkiran Tuntutan Oksigen (COD)	146
4.5.1	Sebelum Penambahan Fenol (Fasa I)	146
4.5.2	Penambahan 300 dan 500 mg/L Fenol	146
4.6	Kajian Kinetik Terhadap Biouraian Fenol	146
4.7	Kajian Lintasan Biouraian Fenol	147
4.8	Ujian SOUR	147
4.8.1	Kesan Ketoksikan terhadap Kultur Bercampur Penitritan	147
4.8.2	Kesan Ketoksikan terhadap Kultur Bercampur	148
4.8.3	Kesan Ketoksikan Hasil Biouraian terhadap Kultur Bercampur Penitritan	149
4.9	Pemodelan Matematik untuk Penyingkiran AN dan Fenol	149
4.9.1	Model Penyingkiran AN	149
4.9.2	Model Penyingkiran Fenol	150
4.9.2.1	Penambahan 300 mg/L Fenol	150
4.9.2.2	Penambahan 500 mg/L Fenol	150
4.10	Cadangan untuk Penyelidikan Lanjutan	151
SENARAI RUJUKAN		152
LAMPIRAN		159

SENARAI JADUAL

		Muka surat
Jadual 1.1	Jenis corak aliran berdasarkan nilai nombor penyerakan	26
Jadual 2.1	Kepekatan larutan stok fenol	42
Jadual 2.2	Peratusan pemulihan bagi AN, N-Org, dan COD	57
Jadual 3.1	Nilai d bagi paya tiruan GT, G, RT dan R pada lokasi pensampelan yang berbeza	68
Jadual 3.2	Kecekapan penyingkiran AN bagi paya tiruan GT, G, RT dan R sebelum penambahan fenol	73
Jadual 3.3	Kecekapan peratusan penyingkiran AN dan fenol bagi paya tiruan RT, R, GT dan G yang mengolah air buangan domestik berfenol 300 mg/L	78
Jadual 3.4	Kecekapan peratusan penyingkiran AN dan fenol bagi paya tiruan RT, R, GT dan G yang mengolah air buangan domestik berfenol 500 mg/L	81
Jadual 3.5	Kecekapan penyingkiran TKN bagi paya tiruan GT, G, RT dan R sebelum penambahan fenol.	86
Jadual 3.6	Kecekapan peratusan penyingkiran TKN bagi paya tiruan RT, R, GT dan G yang mengolah air buangan domestik berfenol 300 dan 500 mg/L.	87
Jadual 3.7	Kecekapan peratusan penyingkiran fenol bagi paya tiruan RT, R, GT dan G yang mengolah air buangan domestik berfenol 300 mg/L	92
Jadual 3.8	Kecekapan peratusan penyingkiran fenol bagi paya tiruan RT, R, GT dan G yang mengolah air buangan domestik berfenol 500 mg/L	97
Jadual 3.9	Kecekapan penyingkiran COD bagi paya tiruan GT, G, RT dan R sebelum penambahan fenol.	102
Jadual 3.10	Pemalar kadar tertib pertama ($\text{jam}^{-1}\text{Lg}^{-1}$) bagi kajian kinetik biouraian fenol peringkat pertama dan kedua.	113
Jadual 3.11	Kepekatan sebatian perantaraan hasil biouraian fenol dari titik pensampelan RT, R, GT dan G.	116
Jadual 3.12	Nilai SOUR yang diperolehi daripada hasil kajian kinetik terhadap masa dengan menggunakan kultur bercampur penitritan.	132

SENARAI RAJAH

		Muka surat
Rajah 1.1	Paya tiruan berjenis (a) permukaan air bebas (FWS); (b) aliran sub-permukaan (SF) (Lim dan Polprasert, 1998).	3
Rajah 1.2	Bunga, daun dan rizom bagi cattail.	6
Rajah 1.3	Jenis lapisan tanah yang terdapat dalam sistem paya tiruan selepas kematangan tumbuhan.	16
Rajah 1.4	Lintasan biouraian sebatian organik secara respirasi (a) aerobik, (b) anoksik dan (c) anaerobik (Redy dan Patrick, 1984).	18
Rajah 1.5	Lintasan penguraian fenol	21
Rajah 2.1	Lukisan skematik bagi paya tiruan dari segi (a) pandangan atas, (b) pandangan sisi dan (c) pandangan depan.	35
Rajah 2.2	Sistem di tapak kajian yang mengandungi tangki pemendakan, tangki pengumpulan, pam peristaltik dan paya tiruan.	41
Rajah 2.3	Lukisan skematik bagi kajian kinetik.	53
Rajah 3.1	Profil kadar aliran efluen, influen dan suhu bagi paya tiruan (a) RT dan R (b) GT dan G.	59
Rajah 3.2	RTD bagi aliran palam dan aliran berserak.	61
Rajah 3.3	Graf RTD pada titik pensampelan (a) C15, (b) C45, (c) EF15 dan (d) EF45 bagi paya tiruan GT.	63
Rajah 3.4	Graf RTD pada titik pensampelan (a) C15, (b) C45, (c) EF15 dan (d) EF45 bagi paya tiruan RT.	64
Rajah 3.5	Graf RTD pada titik pensampelan (a) C15, (b) C45, (c) EF15, (d) EF45 dan (e) EFP bagi paya tiruan G.	65
Rajah 3.6	Graf RTD pada titik pensampelan (a) C15, (b) C45, (c) EF15, (d) EF45 dan (e) EFP bagi paya tiruan R.	66
Rajah 3.7	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran AN terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT dan R pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m sebelum penambahan fenol.	74
Rajah 3.8	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran AN terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT dan G pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m sebelum penambahan fenol.	74

Rajah 3.9	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran AN terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT dan R pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 300 mg/L fenol.	79
Rajah 3.10	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran AN terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT dan G pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 300 mg/L fenol.	79
Rajah 3.11	Perubahan profil bagi kepekatan AN terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	82
Rajah 3.12	Perubahan profil bagi kepekatan AN terhadap masa operasi dalam paya tiruan R (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	82
Rajah 3.13	Perubahan profil bagi kepekatan AN terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	83
Rajah 3.14	Perubahan profil bagi kepekatan AN terhadap masa operasi dalam paya tiruan G (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	84
Rajah 3.15	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran TKN terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT dan R pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m sebelum penambahan fenol.	88
Rajah 3.16	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran TKN terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT dan G pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m sebelum penambahan fenol.	88
Rajah 3.17	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran TKN terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT dan R pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 300 mg/L fenol.	89
Rajah 3.18	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran TKN terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT dan G pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 300 mg/L fenol.	89
Rajah 3.19	Perubahan profil bagi kepekatan TKN terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	90
Rajah 3.20	Perubahan profil bagi kepekatan TKN terhadap masa operasi dalam paya tiruan R (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	90

Rajah 3.21	Perubahan profil bagi kepekatan TKN terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	91
Rajah 3.22	Perubahan profil bagi kepekatan TKN terhadap masa operasi dalam paya tiruan G (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	91
Rajah 3.23	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran fenol terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 300 mg/L fenol.	93
Rajah 3.24	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran fenol terhadap masa operasi dalam paya tiruan R pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 300 mg/L fenol.	93
Rajah 3.25	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran fenol terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 300 mg/L fenol.	94
Rajah 3.26	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran fenol terhadap masa operasi dalam paya tiruan G pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 300 mg/L fenol.	94
Rajah 3.27	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran fenol terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	98
Rajah 3.28	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran fenol terhadap masa operasi dalam paya tiruan R pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	98
Rajah 3.29	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran fenol terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	99
Rajah 3.30	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran fenol terhadap masa operasi dalam paya tiruan G pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m selepas penambahan 500 mg/L fenol.	99
Rajah 3.31	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran COD terhadap masa operasi dalam paya tiruan RT pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m sebelum penambahan fenol.	103
Rajah 3.32	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran COD terhadap masa operasi dalam paya tiruan R pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m sebelum penambahan fenol.	103
Rajah 3.33	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran COD terhadap masa operasi dalam paya tiruan GT pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m sebelum penambahan fenol.	104

Rajah 3.34	Perubahan profil bagi peratusan penyingkiran COD terhadap masa operasi dalam paya tiruan G pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m sebelum penambahan fenol.	104
Rajah 3.35	Perubahan kepekatan fenol mengikut masa bagi biouraian biojisim dari paya tiruan yang ditambahkan fenol pada (a) Fasa II (b) Fasa III dan (c) Fasa IV di bawah keadaan aerobik, anoksik dan anaerobik.	108
Rajah 3.36	Perubahan kepekatan fenol mengikut masa dengan menggunakan larutan dan biojisim yang sama daripada kajian kinetik pertama yang diperolehi daripada (a) Fasa II (b) Fasa III dan (c) Fasa IV di bawah keadaan aerobik dan anoksik.	111
Rajah 3.37	Spektrum GCMS bagi paya tiruan RT pada titik (a) A30, (b) C30, (c) E30 dan (d) EF30.	118
Rajah 3.38	Spektrum GCMS bagi paya tiruan R pada titik (a) A30, (b) C30, (c) E30 dan (d) EF30.	120
Rajah 3.39	Spektrum GCMS bagi paya tiruan GT pada titik (a) A30, (b) C30, (c) E30 dan (d) EF30.	122
Rajah 3.40	Spektrum GCMS bagi paya tiruan G pada titik (a) A30, (b) C30, (c) E30 dan (d) EF30.	124
Rajah 3.41	Lintasan biouraian fenol	126
Rajah 3.42	Profil bagi nilai SOUR terhadap kepekatan yang berlainan bagi fenol dan sebatian perantaraan biouraiannya dengan menggunakan kultur bercampur penitritan.	128
Rajah 3.43	Profil bagi nilai SOUR terhadap kepekatan yang berlainan bagi fenol dan sebatian perantaraan biouraiannya dengan menggunakan kultur bercampur.	130
Rajah 3.44	Pemalar kadar, k terhadap masa operasi bagi AN pada peringkat sebelum dan selepas penambahan 300 mg/L fenol pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m.	135
Rajah 3.45	Pemalar kadar, k terhadap masa operasi bagi fenol pada peringkat selepas penambahan 300 mg/L fenol pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m.	138
Rajah 3.46	Pemalar kadar, k terhadap masa operasi bagi fenol pada peringkat selepas penambahan 500 mg/L fenol pada kedalaman (a) 0.15 dan (b) 0.45 m.	140

SENARAI PLAT

		Muka surat
Plat 2.1	Gambaran dalaman bagi paya tiruan sebelum pengisian media.	36
Plat 2.2	Paya tiruan yang telah diisi dengan media batu halus	38
Plat 2.3	Rendaman selama tiga hari bagi media sekam padi.	38
Plat 2.4	Paya tiruan yang telah ditanam dengan cattail.	39
Plat 2.5	Paya tiruan yang bertumbuhan matang tanpa penambahan fenol.	41
Plat 2.6	Paya tiruan yang bertumbuhan selepas penambahan 100 mg/L fenol.	43
Plat 2.7	Paya tiruan yang bertumbuhan selepas penambahan 300 mg/L fenol.	43
Plat 2.8	Paya tiruan yang bertumbuhan selepas penambahan 500 mg/L fenol.	44
Plat 2.9	Jenis bikar yang berlainan untuk kajian pemeruapan fenol.	48
Plat 2.10	Susunan radas bagi kajian kinetik.	53
Plat 3.1	Pengumpulan sekam padi secara berkelompok pada akar cattail.	70
Plat 3.2	Sebelum penambahan fenol.	85
Plat 3.3	Selepas penambahan 500 mg/L fenol.	85

SENARAI SINGKATAN

AN	Nitrogen Ammonia
RT	Paya Tiruan yang Bertumbuhan dan Bermedia Sekam Padi
d	Nombor Penyerakan
DO	Oksigen Terlarut
FWS	Paya Tiruan Permukaan Air Bebas
G	Paya Tiruan tidak Bertumbuhan dan Bermedia Batu Halus
GCMS	Spektroskopi Jisim dan Gas Kromatografi
GT	Paya Tiruan yang Bertumbuhan dan Bermedia Batu Halus
k	Pemalar Tertib Pertama
HRT	Tempoh Retensi Hidraulik Nominal
MLSS	Kepekatan Pepejal Terampai Campuran Reaktor
N-NO ₂ ⁻	Nitrogen Nitrit
N-NO ₃ ⁻	Nitrogen Nitrat
N-Org	Nitrogen organik
ORP	Nilai Keupayaan Redoks
R	Paya Tiruan tidak Bertumbuhan dan Bermedia Sekam Padi
RT	Paya Tiruan yang Bertumbuhan dan Bermedia Sekam Padi
RTD	Taburan Masa Residen
SBR	Reaktor Kelompok Berturutan
SF	Paya Tiruan Aliran Sub-permukaan
SOUR	Kadar Spesifik Pengambilan Oksigen
TKN	Nitrogen Kjeldhal Total

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 Fenol [5530 D (APHA, 1998)]
- Lampiran 4: Penentuan Tuntutan Oksigen Kimia (COD) [5220 C, APHA (1998)]
- Lampiran 5: Kajian evapotranspirasi dan evaporasi bagi paya tiruan RT, R, GT dan G.
- Lampiran 6: Kajian corak aliran hidraulik bagi paya tiruan (a) GT & G dan (b) RT & R.
- Lampiran 7: Kepekatan AN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media sebelum penambahan fenol.
- Lampiran 8: Kepekatan AN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media selepas penambahan 300 mg/L fenol.
- Lampiran 9: Kepekatan AN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media selepas penambahan 500 mg/L fenol.
- Lampiran 10: Kepekatan TKN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media sebelum penambahan fenol.
- Lampiran 11: Kepekatan TKN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media selepas penambahan 300 mg/L fenol.
- Lampiran 12: Kepekatan TKN (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media selepas penambahan 500 mg/L fenol.
- Lampiran 13: Kepekatan fenol (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media selepas penambahan 300 mg/L fenol.
- Lampiran 14: Kepekatan fenol (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media selepas penambahan 500 mg/L fenol.
- Lampiran 15: Kepekatan COD (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media sebelum penambahan fenol.
- Lampiran 16: Kepekatan COD (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media selepas penambahan 300 mg/L fenol.

- Lampiran 17: Kepekatan COD (mg/L) bagi paya tiruan (a) RT, (b) R, (c) GT, (d) G pada paras 0.15 dan 0.45 m dari permukaan media selepas penambahan 500 mg/L fenol.
- Lampiran 18: Kajian kinetik biouraian fenol dalam keadaan aerobik dengan menggunakan (a) biojisim yang terus daripada paya tiruan dan (b) biojisim hasil daripada eksperimen biouraian.
- Lampiran 19: Kajian kinetik biouraian fenol dalam keadaan anoksik dengan menggunakan (a) biojisim yang terus daripada paya tiruan dan (b) biojisim hasil daripada eksperimen biouraian.
- Lampiran 20: Kajian kinetik biouraian fenol dalam keadaan anaerobik dengan menggunakan biofilem daripada Fasa II, III dan IV.
- Lampiran 21: Nilai SOUR bagi fenol dan sebatian perantaraan biouraiannya pada kepekatan yang berlainan dengan menggunakan (a) kultur bercampur penitritan dan (b) kultur bercampur.
- Lampiran 22: Analisis regrasi bagi penyingkiran AN pada kedalaman 0.15 dan 0.45 m bagi paya tiruan RT, R, GT dan G pada peringkat sebelum dan selepas penambahan 300 mg/L fenol.
- Lampiran 23: Analisis regrasi bagi penyingkiran fenol pada kedalaman 0.15 dan 0.45 m bagi paya tiruan RT, R, GT dan G pada peringkat selepas penambahan 300 mg/L fenol.
- Lampiran 24: Analisis regrasi bagi penyingkiran fenol pada kedalaman 0.15 dan 0.45 m bagi paya tiruan RT, R, GT dan G pada peringkat selepas penambahan 500 mg/L fenol.

SENARAI PENERBITAN & SEMINAR

- 1.1 Tee, H.C., Tan, F.W.N., Lim, P.E. (2005). Nitrogen and phenol removal in gravel- and raw rice husk-based constructed wetlands. *Journal of Physical Science*, 16(1): 85-97.
- 1.2 Tee, H.C., Seng, C.E., Ahmad, M.N., Lim, P.E. (2005). Comparison of phenol, nitrogen and oxygen demand removal in constructed wetlands with gravel- and rice husk-based media. **In** *The 11th Asian Chemical Congress*, Korea University, Seoul, Korea. August 24-26, 2005.

PERBANDINGAN PENYINGKIRAN FENOL, NITROGEN DAN TUNTUTAN OKSIGEN DALAM PAYA TIRUAN YANG BERMEDIA BATU HALUS DAN SEKAM PADI

ABSTRAK

Penyelidikan ini bertujuan untuk menyiasat potensi penggunaan sekam padi mentah sebagai media alternatif dalam paya tiruan untuk mengolah air buangan domestik yang ditambahkan dengan fenol. Peranan tumbuhan paya tiruan dalam penyingkiran nitrogen, tuntutan oksigen dan fenol serta kesan fenol terhadap penyingkiran nitrogen dan tuntutan oksigen di dalam paya tiruan juga dikaji. Empat unit paya tiruan jenis aliran sub-permukaan mendatar berskala eksperimen telah dibina dan dioperasikan di lapangan. Dua di antaranya diisikan sedalam 0.60 m dengan batu halus dan yang dua lagi diisikan dengan kebanyakannya sekam padi. Sebuah unit bagi setiap jenis paya tiruan ditanam dengan tumbuhan cattail (*Typha latifolia*). Air buangan domestik disalurkan ke dalam keempat-empat unit dengan masa retensi hidraulik nominal selama 7 hari. Selepas cattail menjadi matang, kepekatan nitrogen ammonia (AN), nitrogen Kjeldhal total (TKN) dan tuntutan oksigen kimia (COD) dipantau di alur masuk, alur keluar dan enam titik perantaraan pada kedalaman 0.15 dan 0.30 m selama enam bulan. Selepas itu, unit-unit paya tiruan itu disalurkan dengan air buangan domestik yang sama bersama fenol pada kepekatan meningkat dari 100, 300 dan 500 mg/L masing-masing selama 30, 74 dan 198 hari tempoh operasi. Pada peringkat ini, kepekatan fenol, AN, TKN dan COD pada titik pensampelan yang dinyatakan di atas dipantau. Keputusan yang diperolehi menunjukkan bahawa paya tiruan bertumbuhan mencapai prestasi penyingkiran spesies nitrogen yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan paya tiruan tidak bertumbuhan pada peringkat sebelum mahupun selepas penambahan fenol. Ini menunjukkan tumbuhan paya memainkan peranan penting dalam penyingkiran nitrogen. Keputusan juga menunjukkan bahawa keempat-empat unit paya tiruan dapat menyingkirkan 100% jumlah fenol apabila 300 mg/L fenol ditambahkan. Namun, pada peringkat penambahan 500 mg/L fenol,

peratusan kecekapan penyingkiran fenol bagi paya tiruan tanpa tumbuhan yang bermedia batu halus dan sekam padi masing-masing telah merosot kepada 18 dan 25% manakala paya tiruan bertumbuhan pula masing-masing mencapai 68 dan 100%. Dalam kehadiran fenol, kemerosotan kecekapan penyingkiran AN dan TKN dapat diperhatikan bagi paya tiruan yang bertumbuhan dan tidak bertumbuhan. Namun, kesannya adalah lebih ketara kepada paya tiruan tidak bertumbuhan dan menunjukkan tumbuhan berperanan penting dalam mengurangkan kesan pencemaran fenol. Dalam kajian ini, nilai COD yang diperolehi telah didominasi oleh kehadiran fenol dan menyebabkan kesan penambahan fenol terhadapnya tidak dapat ditentukan dengan jelas. Daripada kajian kinetik, kadar penyingkiran fenol dalam keadaan aerobik didapati lebih cepat berbanding dengan kadarnya dalam keadaan anoksik. Kajian GCMS pula menunjukkan fenol dimineralisasikan mengikut lintasan: o-kresol → benzokuinon → asid cis-cis mukanoik → asid suksinik → asid etanoik dan akhirnya air dan karbon dioksida sebagai hasil akhirnya. Kajian SOUR telah menunjukkan bahawa fenol dan o-kresol merupakan bahan yang toksik kepada bakteria penitritan. Penyelidikan ini menunjukkan sekam padi mentah dapat digunakan sebagai media ganti dalam paya tiruan.

COMPARISON OF PHENOL, NITROGEN AND OXYGEN DEMAND REMOVAL IN CONSTRUCTED WETLANDS WITH GRAVEL- AND RICE HUSK-BASED MEDIA

ABSTRACT

This study aims to investigate the potential of raw rice husks to be used as an alternative media in constructed wetlands to treat phenol-containing domestic wastewater. The role of wetland vegetation in the removal of nitrogen, oxygen demand and phenol, and the effect of phenol on nitrogen and oxygen demand removal in constructed wetlands were also studied. Four laboratory-scale horizontal subsurface-flow constructed wetland units were built and were operated outdoors. Two of the wetland units were filled with pea gravel and the other two with mainly raw rice husks as wetland media to a depth 0.60 m. One unit of each type of constructed wetland was planted with cattail (*Typha latifolia*). The units were initially fed with domestic wastewater and operated at a nominal hydraulic retention time of 7 days. After the cattail plants had attained maturity, the concentrations of ammonical nitrogen (AN), total nitrogen kjeldhal (TKN) and chemical oxygen demand (COD) were monitored at the inlet, outlet and the intermediate sampling points at the depths of 0.15 dan 0.45 m for six months. Subsequently, the wetland units were fed with the same domestic wastewater spiked with increasing phenol concentrations at 100, 300 and 500 mg/L for the durations of 30, 74 and 198 days, respectively. During these periods, phenol, AN, TKN and COD concentrations at those sampling positions mentioned above were monitored. The results showed that planted wetland units were more efficient than unplanted wetland units in nitrogen removal before and after the addition of phenol. This indicated that wetland plants play an important role in nitrogen removal. The results also showed that, irrespective of planted or unplanted, there was nearly total phenol removal in the gravel- and rice husk-based wetland units when 300 mg/L phenol was added. However, at 500 mg/L phenol, the percentages of phenol removal for unplanted gravel- and rice husk-based wetland units deteriorated to 18 and 21%,

respectively, whereas the planted units yielded 68 and 100%, respectively. In the presence of phenol, the reduction of AN and TKN removal efficiencies was observed in both types of planted and unplanted wetland units but the effect was greater in the unplanted units indicating that wetland vegetations play a role in reducing the inhibitory effect of phenol. As the values of COD obtained in this study were dominated by the present of phenol, the effect of phenol on COD cannot be determined. From the kinetic study, the rate of degradation for phenol in aerobic condition was found to be faster than that in anoxic condition. The results of the GCMS study proved that phenol was mineralized according to the pathway: o-cresol → benzoquinone → cis-cis mucanoic acid → succinic acid → etanoic acid and finally water and carbon dioxide as the final products. The SOUR study indicated that phenol and o-cresol were most toxic compounds to the nitrifying bacteria. This research shows that raw rice husks can be used as an alternative media in constructed wetlands.

BAB SATU PENGENALAN

1.1 Sistem Paya Tiruan

Paya tiruan ialah sistem kejuruteraan yang direka dan dibina untuk mempergunakan proses semulajadi termasuk tumbuhan paya, tanah dan bersekutu dengan bantuan mikroorganisma dalam pengolahan air buangan. Paya tiruan direka dengan mengambil kira kebaikan yang diperolehi daripada paya semulajadi tetapi di dalam suatu persekitaran yang lebih terkawal. Penggunaan sistem paya tiruan sebagai sistem kawalan pencemaran air merupakan satu contoh perkembangan ekoteknologi. Sistem paya tiruan telah menjadi tumpuan sebagai cara alternatif dalam mengolah air buangan. Sistem paya tiruan yang bertindak sebagai penapis, penyingkir pepejal yang tersangkut, penyerap nutrien dan ion-ion oleh tumbuhan dapat memulihkan kualiti air buangan yang melalui mereka selepas sesuatu jangka masa (Gersberg *et al.*, 1986; Bavor *et al.*, 1987). Contoh penggunaan bagi paya tiruan adalah seperti dalam mengolah air kumbahan (Hammer, 1989; Juwarkar *et al.*, 1995; Kadlec dan Knight, 1996, Brix dan Carlos, 2005), air banjir kilat (Hammer, 1989; Green dan Martin, 1996), air larut lesap kawasan pelupusan sampah (Masbough, 2005), air buangan pertanian (Vought *et al.*, 1994) dan air buangan industri (Vrhovsek *et al.*, 1996; Kadlec dan Knight, 1996; Suthersan, 2002).

Paya tiruan dapat dibina dengan darjah kawalan yang lebih tinggi lalu membenarkan penubuhan kemudahan pengolahan eksperimen yang dapat membezajelaskan kandungan substrat, jenis tumbuhan dan corak aliran. Tambahan pula, paya tiruan adalah lebih berkesan daripada paya semulajadi dari sudut pemilihan, kefleksibelan dalam pensaizan, dan yang lebih penting, dalam pengawalan corak aliran dan masa retensi. Bahan pencemar dalam sistem ini disingkirkan melalui gabungan proses fizik, kimia dan biologi, termasuk penguraian, pemendapan, pemendakan,

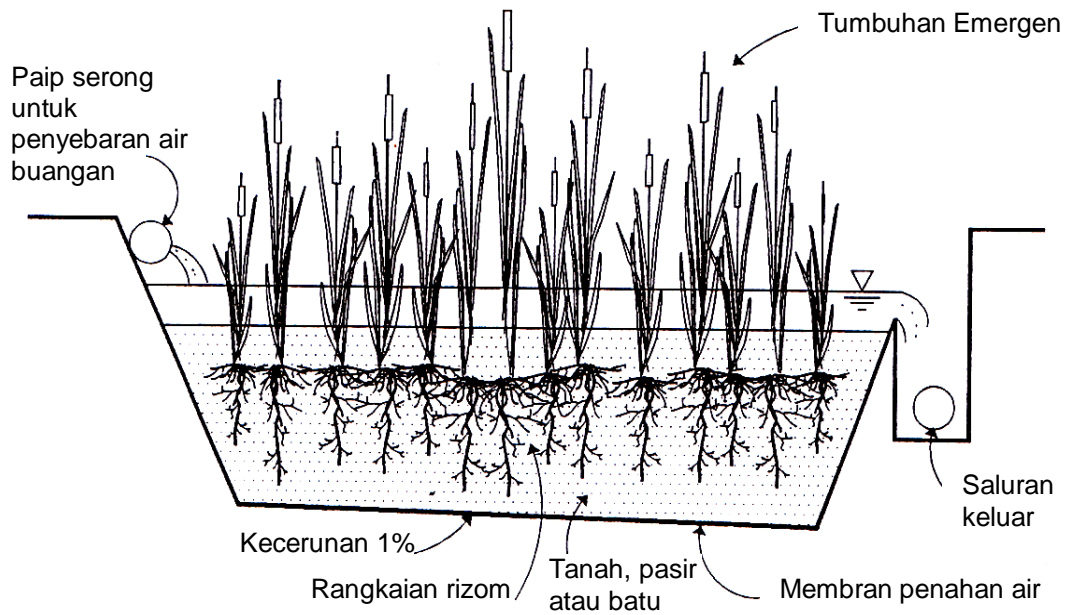
penjerapan pada media, penyerapan terhadap zarah tanah, penyerapan oleh tisu tumbuhan dan permukaan mikroorganisma (Brix, 1993).

1.1.1 Jenis Paya Tiruan

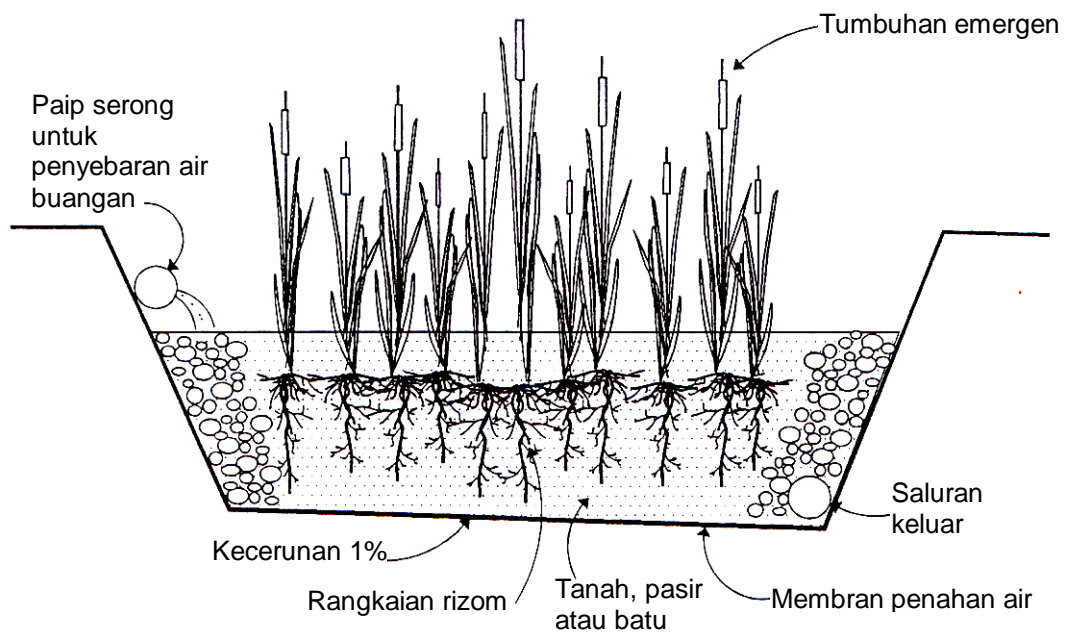
Terdapat banyak kajian literatur yang menerangkan kepelbagaian jenis rekaan paya tiruan yang digunakan untuk mengolah air buangan. Sistem ini dapat dibezakan dari segi format aliran, media dan jenis tumbuhan yang ditanam. Akan tetapi, pada umumnya, paya tiruan hanya dapat dibahagikan kepada dua jenis iaitu, paya tiruan permukaan air bebas (FWS) dan paya tiruan aliran sub-permukaan (SF) (Lim dan Polprasert, 1996).

Sistem FWS adalah mimik sistem paya semulajadi [Rajah 1.1(a)]. Pada lazimnya, sistem jenis ini mengandungi lurah ataupun saluran yang diperbuat daripada bahan kalis air seperti tanah pada bahagian bawah sistem bagi mencegah penyerapan tanah. Pada bahagian atas lapisan kalis air tersebut, tanah ataupun medium yang lain diletakkan untuk menyokong pertumbuhan tumbuhan emergent dan pengaliran air pada kedalaman aliran yang cetek melalui unit. Umumnya, konfigurasi sistem ini terdiri daripada kedalaman air yang cetek, kelajuan aliran yang rendah dan kehadiran batang tumbuhan, kotoran serta aliran yang panjang dan sempit untuk memastikan sistem ini berada dalam keadaan aliran palam (Reed *et al.*, 1998).

Pada umumnya, sistem paya tiruan jenis SF mempunyai komponen yang sama seperti dengan sistem FWS tetapi air buangannya dibataskan pada substratum. Dalam sistem ini, tumbuhannya yang disokong oleh media bertumbuh dengan normal pada unit yang mengandungi tanah, pasir, gravel dan batu-batan dalam turutan ke bawah untuk menyediakan keadaan berliang yang lebih baik (Rajah 1.2(b)). Corak aliran dalam sistem ini boleh berada dalam keadaan aliran ke atas, aliran ke bawah dan aliran mendatar.



(a)



(b)

Rajah 1.1: Paya tiruan berjenis (a) permukaan air bebas (FWS); (b) aliran sub-permukaan (SF) (Lim dan Polprasert, 1998).

Dalam sistem SF, apabila air buangan dialirkan melalui media, ia telah ditapis menerusi sentuhan air buangan tersebut dengan permukaan media dan zon berakar tumbuhan. Zon sub-permukaan pada umumnya adalah anoksik tetapi tumbuhan dapat membawa oksigen yang berlebihan kepada sistem akar lalu mewujudkan keadaan aerobik pada akar dan rizom. Terdapat juga satu zon aerobik yang nipis dalam substratum yang berdekatan dengan permukaan udara tanah.

1.1.2 Tumbuhan Paya

Tumbuhan memainkan peranan yang penting dalam pengolahan air buangan dalam paya dengan membekalkan substrat kepada mikrob yang merupakan prosesor terpenting dalam air buangan tercemar. Tumbuhan juga membekalkan mikrob dengan sumber karbon. Tumbuhan menyerap nutrien supaya ia tidak dialirkan keluar daripada sistem pengolahan semasa musim tumbesaran. Apabila tumbuhan mati, sesetengah nutrien akan dikembalikan kepada sistem manakala sebahagian nutrien yang lain pula disimpan dalam bahagian tumbuhan yang telah reput dan dikumpulkan pada hampasnya. Tumbuhan mengoksigenkan zon akar dengan membaurkan oksigen keluar daripada akar mereka. Rizosfera yang dioksigenkan akan membekalkan habitat kepada mikrob aerobik dan meningkatkan kadar nitrifikasi dan penyingkiran BOD. Paya pengolahan yang bertumbuhan dapat bertindak dengan lebih berkesan dalam penyingkiran bahan pencemar jika berbanding dengan paya pengolahan yang tidak bertumbuhan (Gersberg *et al.*, 1986; Tong dan Sikora, 1995; Lim *et al.*, 2001; Huett *et al.*, 2005; Ciria *et al.*, 2005).

Spesies tumbuhan yang sesuai untuk paya tiruan yang mengolah air buangan adalah bergantung kepada keadaan tempatan, kedalaman air, rekaan (SF atau FWS) dan ciri-ciri air buangan. Penyelidikan terhadap kehidupan tumbuhan paya dan keberkesanannya dalam paya pengolahan (Reddy dan Debusk, 1987; Hammer, 1992)

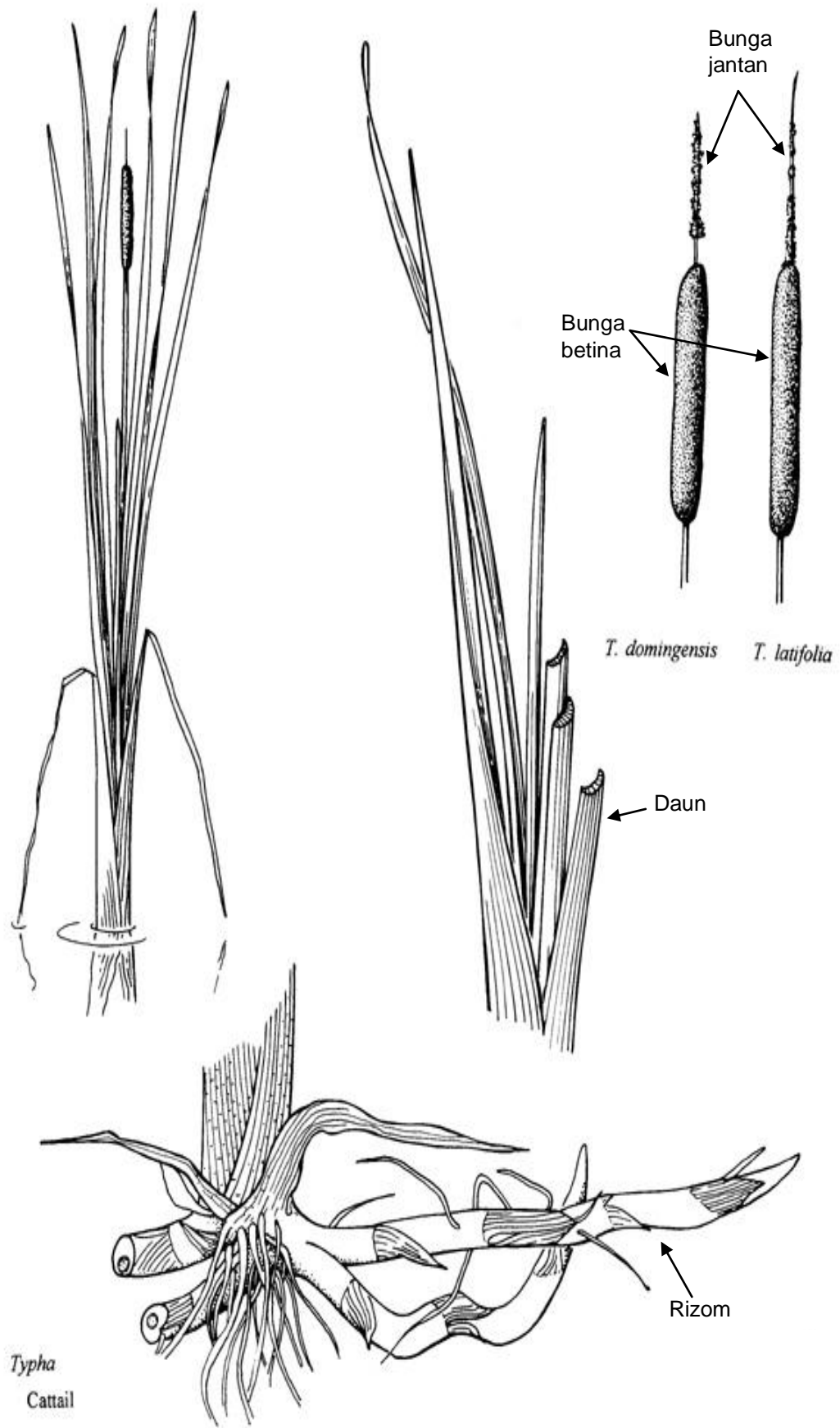
telah mencadangkan kriteria yang umum dalam pemilihan sesuatu tumbuhan yang sesuai (Tanner, 1996):

- Dapat diterima oleh ekologi iaitu, tidak membahayakan sistem ekologi dan keadaan genetik pada ekosistem semulajadi yang terdapat pada sekelilingnya.
- Dapat menyesuaikan diri terhadap keadaan iklim persekitaran, perosak dan penyakit.
- Dapat beradaptasi terhadap bahan tercemar berkepekatan tinggi.
- Sedia untuk penyebaran dan dapat bertumbuh dengan cepat.
- Kebolehan mengangkut oksigen dari daun ke bahagian akar dan rizom.

Tumbuhan akuatik dapat dibahagikan kepada tiga jenis iaitu sub-emergen (Elodia) yang tumbuh di bawah permukaan air; emergent (cattail, bulrush) yang akarnya tumbuh di dalam tanah tetapi batang dan daunnya tumbuh di atas permukaan air; dan tumbuhan terapung (duckweed, water hyacinth) yang dapat tumbuh dengan terapung di atas permukaan air. Tumbuhan emergent yang tumbuh dengan meluas telah memainkan peranan yang penting dalam penyingkiran bahan tercemar pada paya tiruan kerana ia dapat bertoleransi kepada keadaan persekitaran dan mempunyai struktur akar yang dalam.

1.1.2.1 Cattail (*Typha latifolia*)

Cattail merupakan sejenis tumbuhan emergent yang hidup di kawasan berpaya dan pinggir parit dan populasinya tersebar luas di seluruh dunia. Cattail boleh dibahagikan kepada dua jenis iaitu, *Typha latifolia* dan *Typha augustifolia*. Cattail dapat hidup di antara suhu 10-30 °C dan mempunyai tahap ketahanan masin yang maksimum iaitu, sebanyak 30 bahagian per seribu. Manakala julat pH dan paras air yang optimum bagi cattail masing-masing ialah pH 4-10 dan 15-100 cm (Reed *et al.*, 1995). Kadar pertumbuhannya adalah cepat dan akarnya mampu menembusi kedalaman sehingga 30 cm dari permukaan media.



Rajah 1.2: Bunga, daun dan rizom bagi cattail. (IFAS, 1990)

Cattail mengambil masa selama tiga bulan untuk mencapai kematangan dan ketinggiannya boleh mencapai sehingga 3 m tinggi. Tangkal yang berbunga adalah lebih tinggi dan bunganya yang seakan-akan batang cerut tumbuh di hujung tangkal (Rajah 1.2). Bunga cattail bersifat uniseks. Bahagian bunga betina berada di bawah bahagian bunga jantan dan ia berbentuk silinder setebal 2.5-4 cm. 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.

Cattail mempunyai nilai perubatan dengan biji debunganya boleh berfungsi sebagai agen anti pembekuan plasma darah (Lakshman, 1987). Cattail juga berpotensi digunakan sebagai bahan mentah untuk bahan api biojisim dalam proses termokimia (Ciria *et al.*, 2005). Akan tetapi, Cattail dipilih sebagai tumbuhan emergan utama dalam sistem paya kerana ia berkebolehan untuk mengangkut oksigen dari daun ke akar dan rizom. Ini membolehkan proses penguraian dan pengambilan bahan pencemar dari air dilakukan oleh bakteria aerobik.

1.1.3 Media

Umumnya, media merupakan satu percantuman tepu yang terdiri daripada tanah, pasir, batu dan bahan organik yang digunakan dalam paya tiruan. Media berfungsi sebagai penyokong kepada tumbuhan emergan dan menyediakan permukaan aktif bagi pengkompleksan ion-ion serta menyumbangkan permukaan secara langsung ataupun tidak langsung kepada mikroorganisma untuk menguraikan bahan pencemar (Hammer dan Bastian, 1990). Media yang digunakan mesti mempunyai konduktiviti hidraulik yang tinggi supaya air buangan boleh mengalir dengan kadar yang berkesan supaya tahap kecekapan pengolahan yang tinggi tercapai. Kadar peresapan air buangan dalam media yang sesuai ialah $<0.5 \text{ cm jam}^{-1}$ (Metcalf dan Eddy, 1991). Banyak kajian telah dijalankan ke atas penggunaan

kepelbagaian jenis batu halus (gravel) dan tanah sebagai media dalam paya tiruan (Vymazal, 1998). Walaupun gravel dapat berfungsi sebagai media yang berkesan, media lain juga berpotensi digunakan.

1.1.3.1 Batu halus (gravel)

Batu halus mempunyai kandungan silika di antara 64–68% (Lindsey *et al.*, 1998) dan menyebabkannya tidak mudah terurai dan tahan terhadap tindakan kimia, fizik mahupun biologi. Batu halus dapat memberi sokongan fizikal kepada sistem akar dan rizom tumbuhan cattail. Batu halus yang diameternya bersaiz di antara 3-5 mm merupakan bahan media yang paling sesuai dalam sistem paya tiruan kerana ia dapat memberi sokongan kepada akar dan rizom tumbuhan emergent untuk membesar (Ho, 2002). Ia juga menawarkan kadar pengaliran yang cekap, kadar resapan yang tinggi serta konduktiviti hidraulik yang baik. Batu halus yang telah dicuci dapat menurunkan risiko “clogging” bagi meningkatkan prestasi pengolahan terutamanya melalui proses penapisan.

1.1.3.2 Sekam Padi

Sekam padi merupakan hasil buangan utama dalam proses pengilangan beras. Sekam padi terdiri daripada 1/5 berat asal padi. Disebabkan sifat kasar, nilai nutrien yang rendah, densiti berat yang rendah dan kandungan abu yang tinggi, hanya sedikit daripada sekam padi yang dihasilkan digunakan sebagai makanan pelawas haiwan. Sekam padi yang tinggal biasanya dibakar secara terbuka dan ini menyebabkan pencemaran kepada alam sekitar.

Sekam padi mempunyai bentuk yang bujur panjang, struktur yang keras, kasar, bergentian dan berwarna coklat keemasan. Permukaan luar sekam padi yang berkandungan silika tinggi (13.2-29%) terdiri daripada barisan berbonjol yang kasap

dan permukaan dalaman yang lebih licin dengan rangkaian memanjang yang berhubungan dengan barisan berbonjol. Bahagian tengah sekam padi pula menunjukkan terdapat liang-liang di antara lapisan berlamina (Houston, 1972). Komposisi sekam padi terdiri daripada bahan organik (71-85%) dan selebihnya bahan bukan organik (15-29%). Antara komposisi bahan organik yang utama ialah karbohidrat, protein mentah, lipid, lignin dan kutin, vitamin dan asid organik. Komposisi bahan takorganik yang utama dalam sekam padi pula terdiri daripada abu (13.2-29.0% daripada berat sekam padi). Komponen abu sekam padi terdiri daripada silika, K_2O , CaO , Fe_2O_3 , P_2O_5 , SO_3 , Na_2O dan MgO (Hsu dan Luh, 1980).

1.2 Mikroorganisma

Operasi proses-proses pengolahan air buangan dalam paya tiruan bergantung kepada aktiviti-aktiviti mikroorganisma seperti bakteria, alga, virus dan protozoa. Mikroorganisma dalam air buangan memainkan peranan penting dengan bertindak sebagai agen penyahtoksikan. Sebaliknya, ia juga berpotensi menukarkan kandungan yang tidak toksik kepada bentuk yang toksik. Akan tetapi, had pencemaran penyahtoksikan dan pentoksikan dalam sistem akuatik adalah kurang difahami.

Bakteria yang penting dalam pengolahan air buangan secara aerobik adalah jenis yang berbentuk batang, fakultatif dan mesofil. Ia adalah agen yang mengoksidakan bahan organik mati (saprofit) yang sangat baik dan membesar dengan baik dalam air buangan. Kesemuanya boleh membina (menitis) suatu lapisan lendir berkelompok yang merupakan suatu mekanisme penting dalam proses pengolahan pada paya tiruan. Koliform dan bakteria usus lain tidak berperanan penting dalam proses pengolahan air buangan. Ia hanya menumpang sahaja dalam sistem itu (Mara, 1976). Contoh bakteria yang terdapat dalam paya tiruan ialah *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* dan *Pseudomonas*.

Kebanyakan alga adalah organisma-organisma berbilang sel, yang wujud dalam pelbagai bentuk dan saiz. Karbon dioksida digunakan sebagai sumber karbon untuk sintesis sel baru dan oksigen dihasilkan daripada air melalui mekanisme fotosintesis tumbuhan. Tanpa cahaya matahari, alga memerlukan oksigen untuk respirasi dan sebatian organik untuk tumbesaran. Pertumbuhannya (sama ada dalam kegelapan atau cahaya) banyak dirangsangkan oleh fosfat dan nitrat yang biasa wujud dalam efluen air buangan. Garam-garam ini menyebabkan perkayaan nutrien suatu badan air, diikuti dengan berlakunya pertumbuhan alga secara meluas (eutrofikasi). Contoh alga yang terdapat dalam air buangan ialah *euglena*, *nitzschia* dan *clorella*.

Protozoa merupakan protista bersel tunggal yang menjadi leluhur kepada alam haiwan. Terdapat tiga kumpulan utama protozoa iaitu: amoeba, siliat dan flagelat. Amoeba dan flagelat tidak berapa penting dalam pengolahan air buangan, tetapi amoeba jenis *Entamoeba histolitika* merupakan patogen manusia yang penting yang menyebabkan disenteri amoeba (amoebiasis). Jenis siliat adalah lebih penting kerana mereka sering wujud di loji-loji pengolahan air buangan dan mereka memakan sebilangan besar bakteria. Bilangan mereka adalah di antara 10^3 - 10^4 per mL. Ujikaji makmal yang terkawal telah menunjukkan bahawa mereka bertanggungjawab membersihkan sebahagian besar air buangan (Mara, 1974).

1.3 Penyingkiran Nitrogen dalam 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^-). Terdapat beberapa proses penyingkiran nitrogen dalam paya tiruan. Antaranya ialah pemeruapan ammonia, ammonifikasi, nitrifikasi, denitrifikasi, pengambilan nitrogen oleh tumbuhan dan jerapan media.

1.3.1 Pemeruapan Ammonia

Pemeruapan ammonia adalah suatu proses kimia fizik. Ammonia berada dalam keseimbangan di antara bentuk gas NH_3 dan bentuk ion ammonium (NH_4^+) seperti yang ditunjukkan dalam persamaan berikut:



Kehilangan NH_3 menerusi pemeruapan adalah tidak penting sekiranya nilai pH adalah di bawah 8.0. Pada pH 9.3, nisbah antara ammonia dan ion ammonium adalah 1:1 dan pemeruapan NH_3 adalah penting (Reddy dan Patrick, 1984). Dalam paya tiruan FWS, pemeruapan NH_3 adalah penting kerana proses fotosintesis oleh alga pada permukaan air akan menghasilkan nilai pH yang tinggi. Dalam paya tiruan SF yang mengalir secara mendatar pula, nilai pH air biasanya tidak banyak berubah semasa melalui media dan bagi air buangan domestik biasanya tidak melebihi pH 8.0. Maka, pemeruapan NH_3 dalam paya tiruan SF boleh diabaikan (Vymazal, 1999). Vymazal (1999) telah merumuskan bahawa kadar pemeruapan dikawal oleh kepekatan NH_4^+ dalam air, suhu, kelajuan angin, sinaran suria, bilangan tumbuhan akuatik serta kapasiti sistem untuk menukar nilai pH dalam kitaran harian (ketidakhadiran CO_2 akan menambahkan kadar pemeruapan).

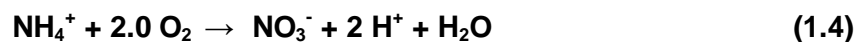
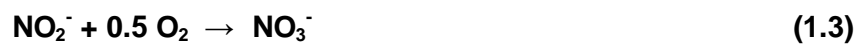
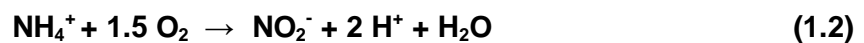
1.3.2 Ammonifikasi (Mineralisasi)

Ammonifikasi ataupun mineralisasi ialah satu proses transformasi biologi yang menukarkan N-Org kepada ammonia dan ia merupakan langkah pertama dalam mineralisasi N-Org (Reddy dan Patrick, 1984). Proses ini berlaku menerusi pemecahan asid amino dan hidrolisis urea serta asid urik oleh mikroorganisma (Kadlec dan Knight, 1996). Kadar mineralisasi adalah cepat pada zon beroksigen dan menurun dari kawasan aerobik ke anaerobik fakultatif. Julat pH optimum bagi proses ammonifikasi adalah di antara 6.5-8.5 (Patrick dan Wyatt, 1964). Kadar proses ammonifikasi aerobik bergantung kepada suhu dan akan digandakan apabila suhu meningkat sebanyak 10

^oC (Vymazal, 1999). Biasanya air buangan domestik tidak mengandung kandungan N-
Org yang tinggi. Akan tetapi, sebahagian besar (sehingga 100%) N-
Org dalam kebanyakan air buangan akan bertukar kepada ammonia (Kadlec dan Knight, 1996).

1.3.3 Nitrifikasi dan Denitrifikasi

Nitrifikasi adalah satu proses kemoautotofik yang ditakrifkan sebagai satu
pengoksidaan biologi yang menukarkan ion ammonium kepada nitrit dan nitrat.
Bakteria nitrifikasi memperolehi tenaga daripada pengoksidaan ammonia dan/ataupun
nitrit dengan karbon dioksida digunakan sebagai sumber karbon untuk sintesis sel
baru. Organisma ini memerlukan oksigen semasa AN dioksidakan kepada N-nitrit dan
N-nitrit dioksidakan kepada N-nitrat.



Pengoksidaan ammonia kepada nitrat melibatkan dua peringkat (Hauck, 1984).
Peringkat pertama ialah pengoksidaan ammonia kepada nitrit oleh bakteria aerobik
seperti *Nitrosovibrio* (*N. tenuis*), *Nitrosolobus* (*N. multiformis*) dan *Nitrosomonas* (*N.*
europaea) yang bergantung kepada pengoksidaan ammonia untuk memperolehi
tenaga untuk tumbesaran (Hauck, 1984). Peringkat kedua dalam proses nitrifikasi ialah
pengoksidaan nitrit kepada nitrat oleh bakteria kemolitotrofik fakultatif seperti
Nitrobacter winogradskyi yang menggunakan sebatian organik dan hasil daripada
nitrifikasi langkah kedua iaitu, nitrat untuk menjana tenaga bagi pertumbuhan.

Vymazal (1999) merumuskan bahawa suhu optimum bagi proses nitrifikasi di
dalam kultur tulen adalah dalam julat 25-35 ^oC dan di dalam tanah ialah 30-40 ^oC.
Suhu yang rendah (<15 ^oC) akan mengurangkan kadar nitrifikasi jika dibandingkan
dengan suhu di antara 15-35 ^oC. Suhu minimum untuk pertumbuhan *Nitrosomonas*
dan *Nitrobacter* masing-masing adalah di antara nilai 4 dan 5 ^oC. Nilai pH optimum

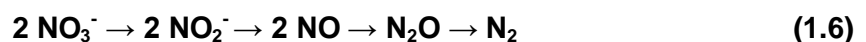
bagi proses nitrifikasi ialah di antara 7.5-8.6. Akan tetapi, proses nitrifikasi juga boleh berlaku pada pH yang lebih rendah. Untuk pengoksidaan AN kepada nitrat, lebih kurang 4.3 mg O₂ per mg AN diperlukan. Pada proses penukaran AN kepada nitrat ini, jumlah alkaliniti yang banyak juga diperlukan, iaitu lebih kurang 8.64 mg HCO₃⁻ per mg AN teroksida (Cooper *et al.*, 1996).

Dari sudut biokimia, denitrifikasi adalah satu proses bakteria di mana nitrogen teroksida (dalam bentuk ionik dan gas) bertindak sebagai terminal penerima elektron untuk pembawa elektron dalam proses respirasi. Elektron dibawa dari suatu substrat penderma elektron (sebatian organik) menerusi beberapa sistem pembawa kepada bentuk nitrogen yang lebih teroksida. Proses denitrifikasi boleh diwakili dengan persamaan seperti berikut:



Tindak balas ini adalah sehalu dan tidak berbalik. Ia berlaku dalam keadaan anaerobik dengan nitrogen digunakan sebagai penerima elektron (Hauck, 1984).

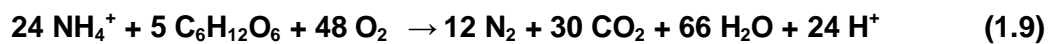
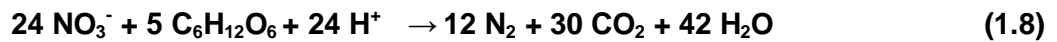
Kebanyakan bakteria denitrifikasi adalah kemoheterotrofik. Mereka memperolehi tenaga hanya menerusi tindak balas kimia dan menggunakan sebatian organik sebagai penderma elektron dan sumber karbon selular (Hauck, 1984). Bakteria yang penting adalah *Aeromonas*, *Vibrio* dan *Pseudomonas* (Grant dan Long, 1985). Pada umumnya, turutan perubahan biokimia daripada nitrat kepada unsur nitrogen bergas yang disarankan ialah (Vymazal, 1999):



Vymazal (1999) merumuskan bahawa faktor persekitaran yang mempengaruhi kadar denitrifikasi ialah ketidakhadiran oksigen, tenaga keupayaan redoks, kelembapan tanah, suhu, pH, kehadiran bakteria denitrifikasi, jenis tanah, bahan organik dan lapisan air. Cooper *et al.* (1996) telah menyatakan bahawa kehadiran oksigen terlarut akan menindas enzim yang diperlukan untuk denitrifikasi dan ia

merupakan parameter yang kritikal. Nilai pH optimum terletak dalam julat 7-8. Akan tetapi, alkali yang dihasilkan semasa denitrifikasi boleh menyebabkan peningkatan nilai pH. Denitrifikasi juga sangat bergantung kepada suhu dan mencapai kadar yang rendah pada suhu kurang daripada 5 °C.

Diketahui bahawa nitrifikasi dan denitrifikasi berlaku serentak dalam tanah yang dibanjiri air yang terdapat zon aerobik dan anaerobik. Dengan menggabungkan kedua-dua tindak balas ini, satu persamaan seimbang yang berlaku dalam zon aerobik dan anaerobik boleh dituliskan seperti berikut (Reddy dan Patrick, 1984):



1.3.4 Pengambilan Nitrogen oleh Tumbuhan

Jumlah nitrogen yang diambil oleh tumbuhan pada paya tiruan adalah di antara 16-75% (Gersberg *et al.*, 1986; Reddy dan Debsk, 1987; Lim *et al.*, 2001; Ciria *et al.*, 2005). Nitrogen diambil dalam bentuk ion-ion ammonium dan nitrat oleh akar tumbuhan. Nitrat diturunkan oleh Nitrobacter kemudian dilepaskan ke tanah dan diserap oleh tumbuhan. Tumbuhan yang sedang berbunga memerlukan lebih banyak nitrat daripada ammonia. Sebahagian besar nitrat dalam bahan N-Org, terutamanya disimpan pada vakuol sel atau dibawa ke bahagian tumbuhan yang lain. Selanjutnya gabungan N dalam tumbuhan diuraikan lagi kepada ammonia oleh pengurai pada saat tumbuhan mati.

1.3.5 Jerapan Media

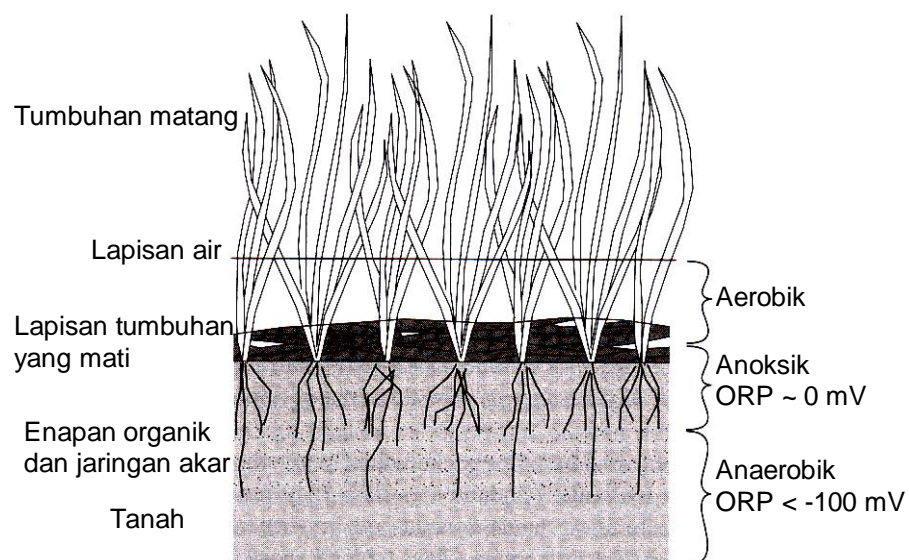
Pada peringkat penurunan, N-Org adalah stabil dan boleh diserap kepada bahagian aktif pada media. Akan tetapi, ion penukaran N-NH₄⁺ pada bahagian

pertukaran kation media tidak boleh dianggap sebagai satu proses penyingkiran N-NH₄⁺ yang berjangka masa panjang. Penjerapan N-NH₄⁺ dijangkakan dapat dibalikkan dengan cepat (Cooper *et al.*, 1996). Selain itu, media yang biasa digunakan dalam paya tiruan SF (gravel) adalah lengai dan tidak membekalkan bahagian aktif yang banyak untuk tujuan penjerapan.

1.4 Mekanisme Penyingkiran sebatian Organik dalam Sistem Paya Tiruan

Sistem paya tiruan berkemampuan untuk menyingkirkan sebatian organik toksik yang terdapat dalam air buangan melalui proses pemeruapan, penjerapan, biouraian oleh mikroorganisma dan pengambilan oleh tumbuhan. Penyingkiran melalui proses pemeruapan adalah berkait rapat dengan jisim molekul relatif bahan organik yang terlibat seperti vinil klorida, klorometana dan benzena (Suthersan, 2002). Telah dibuktikan bahawa biouraian oleh bakteria di bawah keadaan aerobik, anoksik dan anaerobik adalah amat berkesan dalam penyingkiran sebatian organik yang toksik (Kadlec dan Knight, 1996). Akan tetapi, sebelum proses biouraian berlaku, penjerapan sebatian organik pada biofilem untuk penyesuaian mesti berlaku dahulu. Penyingkiran sebatian organik juga dapat berlaku melalui proses penyerapan secara fizikal kepada pepejal terenap diikuti dengan proses pemendapan. Pada kebiasaannya, kesemua proses ini berlaku pada bahagian awal sistem. Penyingkiran melalui proses pengambilan oleh tumbuhan juga telah dilaporkan (Polprasert dan Dan, 1994; Mbuligwe, 2005; Davies *et al.*, 2005). Namun, lintasan penguraiannya adalah tidak jelas dan mungkin dipengaruhi oleh jenis tumbuhan dan ciri-ciri sebatian organik yang diolah. Semasa proses biouraian berlaku, bahan organik bertindak sebagai sumber tenaga (karbon) bagi bakteria dan ditukar kepada bahan perantara atau gas karbon dioksida dan air sekiranya proses mineralisasi adalah lengkap (USEPA, 2000).

Kandungan oksigen bebas mengalami pengurangan yang cepat dengan pertambahan kedalaman dalam kebanyakan jenis media. Ini adalah disebabkan oleh metabolisme mikroorganisma yang menggunakan jirim organik dalam tanah dan pengoksidaan kimia oleh bahan penurunan yang memerlukan penggunaan kandungan oksigen yang tinggi. Pengurangan kandungan oksigen bebas ini dapat digambarkan melalui nilai keupayaan redoks (ORP). Menurut Suthersan (2002), keadaan aerobik dapat dicirikan dengan nilai ORP > 100 mV kerana kandungan oksigen terlarut tersedia. Apabila nilai ORP < -100 mV, keadaan ini dikategorikan sebagai anaerobik kerana tiada kandungan oksigen terlarut. Nilai ORP di sekitar 0 mV mencirikan keadaan anoksik. Rajah 1.3 menunjukkan keadaan redoks dalam paya tiruan selepas kematangan tumbuhan.



Rajah 1.3: Jenis lapisan tanah yang terdapat dalam sistem paya tiruan selepas kematangan tumbuhan.

1.4.1 Biouraian Secara Respirasi Aerobik

Oksigen memainkan peranan yang penting dalam peringkat penguraian secara respirasi aerobik. Oksigen merupakan penerima elektron dan diturunkan ke air apabila bahan organik (sumber penderma elektron) mengalami pengoksidaan. Mekanisme ini merupakan mekanisme utama dalam penyingkiran sebatian organik dalam sistem paya tiruan apabila kuantiti oksigen adalah mencukupi. Oksigen yang berlebihan digunakan

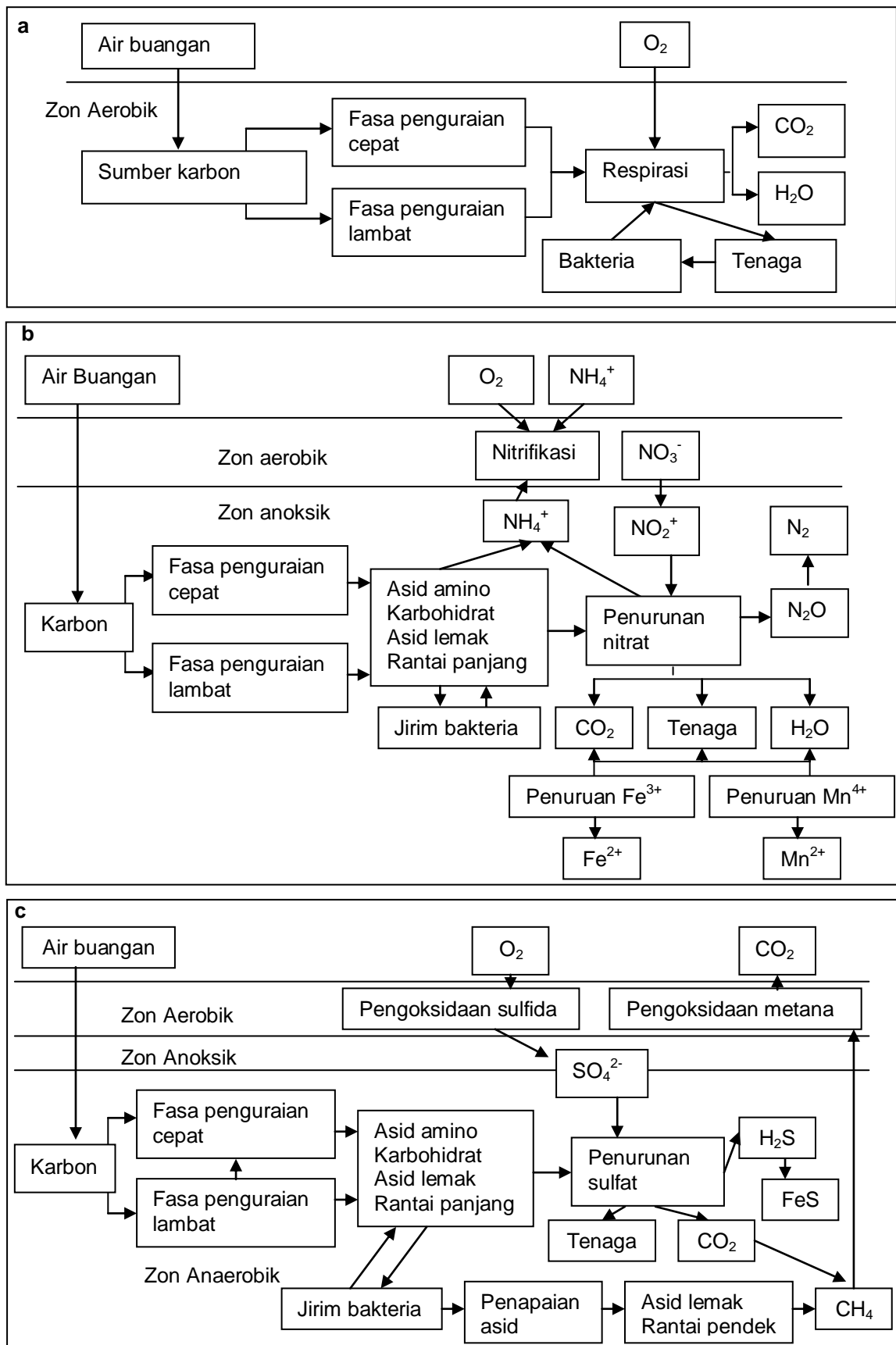
sebagai agen penerima elektron kerana ia mempunyai afiniti terhadap elektron yang tinggi jika dibandingkan dengan penerima elektron yang lain. Peringkat penguraian secara respirasi aerobik ini adalah paling berkesan untuk menyingkirkan sebatian organik dalam air buangan (Reddy dan Patrick, 1984). Lintasan biouraian sebatian organik secara respirasi aerobik ditunjukkan dalam Rajah 1.4 (a).

1.4.2 Biouraian Secara Respirasi Anoksik

Apabila pembekalan oksigen ke dalam air adalah terhad, bakteria akan mengalami respirasi anoksik. Bakteria akan menggunakan NO_3^- sebagai agen penerima elektron semasa pengoksidaan bahan organik [Rajah 1.4(b)]. Selain daripada NO_3^- , bakteria juga menggunakan sebatian mangan dan sebatian ferum sebagai agen penerima elektron (Reddy dan Patrick, 1984). Dalam respirasi anoksik, NO_3^- akan dipilih dahulu dan diikuti oleh sebatian mangan dan akhir sekali oleh sebatian ferum untuk bertindak sebagai agen penerima elektron.

1.4.3 Biouraian Secara Respirasi Anaerobik

Dalam keadaan tanpa oksigen, NO_3^- , sebatian mangan dan sebatian ferum, bakteria anaerobik akan menggunakan sulfat dan karbon dioksida sebagai penerima elektron untuk mengoksidakan bahan organik. Dalam sistem paya tiruan, keadaan ini berlaku di bahagian yang terbawah sekali. Hasil bagi jenis respirasi ini ialah H_2S , CH_4 dan CO_2 (Rajah 1.4(c)).



Rajah 1.4: Lintasan biouraian sebatian organik secara respirasi (a) aerobik, (b) anoksik dan (c) anaerobik (Redy dan Patrick, 1984).

1.4.4 Penyingkiran Bahan Organik Terbiourai

Dalam sistem paya tiruan, biouraian memainkan peranan penting dalam penyingkiran bahan organik terbiourai yang larut (BOD atau COD) dalam air buangan. Baki BOD bergabung dengan bahan terenap dan disingkir melalui proses pemendapan. Kedua-dua sistem FWS dan SF berfungsi sebagai reaktor pelekatan hidupan biologi. Bagi sistem FWS, sumbangan mikroorganisma dalam ruangan air kepada penyingkiran BOD tidak boleh diabaikan. Mekanisme penyingkiran BOD oleh pelekatan biofilem seolah-olah suatu proses penurasan yang dikendalikan secara perlahan-lahan. Biouraian berlaku apabila sebatian organik terlarut diangkut oleh proses penyebaran ataupun pembauran kepada biofilem yang terlekat di bahagian tangkai tumbuhan yang tenggelam (sistem FWS), sistem akar dan media sekeliling. Tumbuhan memainkan peranan penting dalam proses biouraian ini dengan menyediakan medium sokongan kepada mikroorganisma untuk melakukan biouraian di samping membawa oksigen dari rizosfera kepada zon aerobik.

1.5 Fenol

Fenol merupakan sejenis bahan kimia toksik yang penting dan umumnya dalam sektor perindustrian. Ia disebarkan kepada alam sekitar melalui penggunaannya dalam resin, plastik, pelekat, petrokimia, baja, dye dan sebagainya. Fenol adalah sejenis terbitan benzena yang toksik (menurunkan aktiviti enzim) ataupun akan membawa maut kepada ikan pada kepekatan 5.25 mg/L (Rosfjord *et al.*, 1976). Kehadiran fenol yang hanya berkepekatan 2 µg/L telah dapat memberikan rasa yang tidak menyenangkan dan berbau kepada air minuman sekiranya ia bergabung dengan klorin (Athur *et al.*, 1979).

Fenol dapat disingkirkan melalui proses fizik, kimia dan biologi. Bagi proses fizik, fenol disingkirkan melalui proses pemeruapan dan penjerapan oleh karbon teraktif

ataupun sebatian lain yang serupa. Bahan kimia dan mungkin pengoksidaan boleh digunakan untuk mengoksidakan fenol kepada hasil akhiran yang berupa sebatian takorganik. Penurunan fenol secara biologi oleh mikroorganisma aerobik dan anaerobik adalah berkemungkinan juga. Lumpur teraktif, penapis berkali dan kolam penstabilan air buangan adalah sebahagian daripada proses biologi yang telah digunakan untuk mengolah air buangan yang berfenol (Metcalf dan Eddy, 1991).

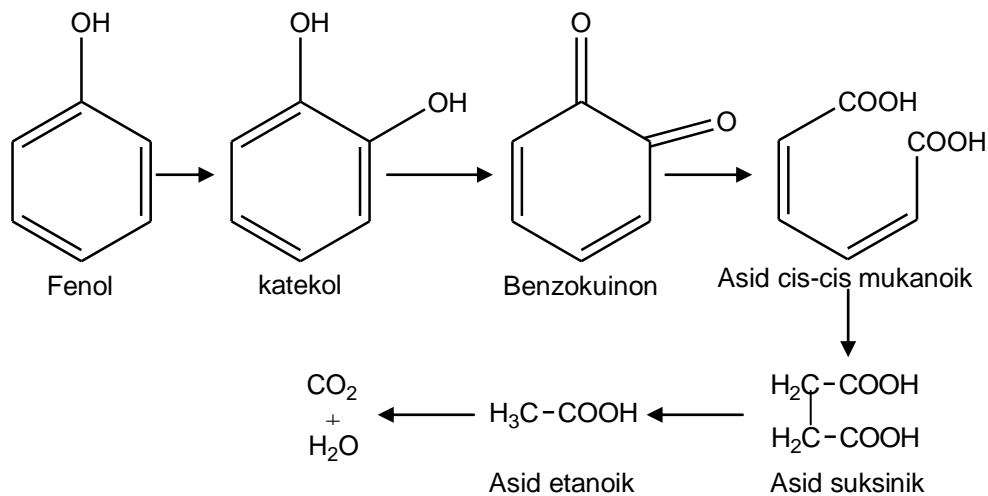
1.5.1 Lintasan Penguraian fenol

Bakteria memainkan peranan yang penting dalam penyingkiran fenol. Lazimnya, bilangan bakteria yang berkemampuan menguraikan fenol adalah sangat sedikit jika dibandingkan dengan jumlah populasi bakteria yang hadir. Akan tetapi, pendedahan kepada fenol yang berterusan akan menyebabkan penyesuaian diri dan menggunakannya sebagai sumber makanan (Young & Rivera, 1985; Tibbles & Baecker, 1989).

Fenol berkemungkinan ditukarkan kepada karbon dioksida oleh bakteria di bawah keadaan aerobik (Southworth *et al.*, 1985; Ursin, 1985; Aelion *et al.*, 1987; Aquino *et al.*, 1988), dan juga di bawah keadaan anaerobik (Bak dan Widdell, 1986; Tschek dan Fuchs, 1987). Benzokuinon, katekol, asid cis-cis mukanoik, β -ketoadipat, asid suksinik dan asid etanoik telah dikenal pasti merupakan hasil perantara dalam biouraian fenol (Paris *et al.*, 1982; Knoll dan Winter, 1987), (Rajah 1.5). Sebahagian karbon hasil daripada biouraian fenol mungkin bercampur dengan biojisim bakteria (Chesney *et al.*, 1985).

Menurut Howard (1989), fenol akan mengalami kadar biouraian yang paling cepat dalam keadaan aerobik yang bermedium air buangan domestik (> 90% dalam 8 jam), tanah (biouraian lengkap dalam masa 2-5 hari), air bersih (biouraian lengkap dalam masa < 1 hari) dan air laut (50% dalam masa 9 hari). Kadar biouraian dalam

keadaan anaerobik adalah lebih rendah jika dibandingkan dengan kadar dalam keadaan aerobik (Baker dan Mayfield, 1980).



Rajah 1.5: Lintasan penguraian fenol

Sumbangan bakteria kepada kadar biouraian keseluruhan mungkin akan diganggu oleh beberapa faktor seperti kepekatan fenol (Ursin, 1985; Hwang *et al.*, 1989), suhu (Hwang *et al.*, 1989), cahaya matahari (Hwang *et al.*, 1989), kedalaman tanah (Federle, 1988), kehadiran nutrien lain yang diperlukan untuk pertumbuhan bakteria (Thorton-Manning *et al.*, 1987) dan kehadiran bahan organik tercemar yang lain (Wang *et al.*, 1988).

1.6 Model Rasional bagi Penyingkiran Nitrogen, Tuntutan Oksigen (COD) dan Fenol

Penyingkiran bahan pencemar dalam sistem paya tiruan jenis SF dan FWS dapat dihuraikan dengan model kinetik pertama beraliran palam (Reed *et al.*, 1995). Model ini dapat digunakan untuk meramalkan kecekapan penyingkiran sesuatu bahan pencemar. Bagi model ini, anggapan bahawa penyingkiran AN hanya disebabkan oleh proses nitrifikasi dan proses penuaian tidak berlaku langsung telah dibuat.

Persamaan bagi model yang dicadangkan adalah seperti berikut:

$$C/C_o = e^{-kt} \quad (1.10)$$

dengan C = Kepekatan bahan pencemar dalam efluen, mg/L

C_o = Kepekatan bahan pencemar dalam influen, mg/L

k = Pemalar kadar tertib pertama, hari⁻¹

t = Tempoh retensi hidraulik (HRT), hari

Pers. (1.10) dapat digunakan untuk menggambarkan penyingkiran AN, COD dan fenol dalam paya tiruan.

Bagi penyingkiran AN, satu model alternatif juga telah dicadangkan oleh Reed *et al.* (1995). Dalam model ini, satu anggapan tambahan telah dibuat iaitu, jumlah TKN yang memasuki reaktor itu semuanya bertukar menjadi AN.

$$C/ C_{TO} = e^{-kt} \quad (1.11)$$

dengan C = Kepekatan efluen bagi AN, mg/L

C_{TO} = Kepekatan influen bagi TKN, mg/L

k = Pemalar kadar tertib pertama, hari⁻¹

t = Tempoh retensi hidraulik (HRT), hari

Dalam penyingkiran COD, terdapat sebahagian COD yang tidak dapat disingkirkan. Maka, sedikit pengubahan terhadap Pers. (1.10) perlu dibuat seperti berikut:

$$\frac{C - C_b}{C_o - C_b} = e^{-kt} \quad (1.12)$$

dengan C = Kepekatan COD efluen, mg/L

C_o = Kepekatan COD influen, mg/L

C_b = Kepekatan COD latar belakang, mg/L

k = Pemalar kadar tertib pertama, hari⁻¹

t = Tempoh retensi hidraulik (HRT), hari

Kesemua model ini menganggap air buangan dalam sistem mempunyai corak aliran palam. Maka adalah sangat penting untuk menentukan corak aliran hidraulik dalam sistem paya tiruan. Di samping itu, model kinetik tertib pertama telah dipilih kerana ia telah digunakan dengan meluasnya dan hanya satu parameter yang terlibat dalam pengiraan model ini dan senang didapati. Pekali kolerasi yang didapati juga adalah memuaskan.

Bagi sistem yang bercorak aliran berserak, maka model di atas perlu diubahsuaikan dengan menggunakan persamaan berikut (Wehner dan Wilhelm, 1956):

$$\frac{C}{C_0} = \frac{4a \exp\left(\frac{1}{2d}\right)}{(1+a)^2 \exp\left(\frac{a}{2d}\right) - (1-a)^2 \exp\left(\frac{-a}{2d}\right)} \quad (1.13)$$

dengan

$$a = \sqrt{1 + 4ktd}$$

C = Kepekatan pencemar efluen, mg/L

C₀ = Kepekatan pencemar influen, mg/L

k = Pemalar kadar keseluruhan

d = nombor penyerakan

t = Tempoh retensi hidraulik (HRT), hari

Disebabkan nilai $(1-a)^2 \exp\left(\frac{-a}{2d}\right)$ terlalu kecil apabila nilai d terlalu kecil ($d < 0.15$), maka ia dapat diabaikan. Pers.(1.13) dapat diubahsuai dengan memasukkan satu faktor F (pecahan bahan pencemar yang tertinggal).

$$\frac{C}{C_0} = F \frac{4a \exp\left(\frac{1-a}{2d}\right)}{(1+a)^2} \quad (1.14)$$

1.7 Evapotranspirasi dan evaporasi

Evapotranspirasi merupakan proses kehilangan air melalui proses penyejatan daripada permukaan air dan kehilangan air daripada daun dan batang tumbuhan. Evaporasi pula hanya mempertimbangan kehilangan air ke persekitaran melalui proses sejatan dari permukaan air. Kadar evapotranspirasi bergantung kepada keamatan sinaran cahaya matahari, kelembapan relatif dan suhu persekitaran (Hammer dan Kadlec, 1983). Kadar evapotranspirasi (ET) dapat dianggarkan mengikut persamaan di bawah:

$$ET = \text{aliran masuk} + \text{air sumber luar (hujan)} - \text{aliran keluar} \quad (1.15)$$

Dianggarkan bahawa kadar evapotranspirasi adalah 1.4 kali ganda kadar evaporasi tasik (Hammer, 1992). Menurut Tanner dan Sukias (1995), kadar evapotranspirasi untuk sistem paya tiruan yang mengandungi tumbuhan emergent ialah 7.1-11.7 mm/hari manakala bagi sistem paya tiruan yang tidak bertumbuhan ialah 3.2 mm/hari. Heritage *et.al* (1995) pula melaporkan bahawa kadar evapotranspirasi untuk sistem paya tiruan yang bertumbuhan cattail ialah 23.1-40.5 mm/hari. Selain itu, Lim (1998) juga mendapati bahawa pada HRT nominal 5 hari, kadar evapotranspirasi bagi sistem SF dan FWS yang bertumbuhan cattail masing-masing ialah 17.8-22.4 mm/hari dan 16.0-24.6 mm/hari. Ini telah menunjukkan bahawa kadar evapotranspirasi tidak banyak berbeza antara sistem FWS dengan SF.

Evapotranspirasi merupakan salah satu parameter yang sering mengganggu kejitian eksperimen sistem paya tiruan terutamanya di kawasan beriklim panas seperti di Malaysia. Jika kadar evapotranspirasi adalah tinggi, maka bacaan kepekatan sampel akan menjadi lebih pekat daripada nilai yang sebenar. Kadar aliran air dalam sistem akan menjadi lebih perlahan dan akan mengganggu nilai HRT nominal yang sebenar. Jika kejadian ini berlaku secara berterusan, sistem paya tiruan akan bertindak sebagai satu sistem rawatan secara kelompok dan bukan lagi secara berterusan. Fenomena ini