

PENGELOLAAN AIR ASAM TAMBANG DENGAN TEKNIK *PERMEABLE REACTIVE BARRIER (PRBs)* BERBASIS MEDIA GAMBUT DAN *FLY ASH-BOTTOM ASH (FABA)*

FIQIATUL FAIDAH



**PROGRAM STUDI ILMU TANAH
FAKULTAS PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Pengelolaan Air Asam Tambang dengan Teknik *Permeable Reactive Barrier* (PRBs) Berbasis Media Gambut dan *Fly Ash-Bottom Ash* (FABA)” adalah karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam daftar pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, 12 Januari 2026

Fiqiatul Faidah
NIM A1501231007

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

RINGKASAN

FIQIATUL FAIDAH. Pengelolaan Air Asam Tambang dengan Teknik *Permeable Reactive Barrier* (PRBs) Berbasis Media Gambut dan *Fly Ash-Bottom Ash* (FABA). Dibimbing oleh R.A DYAH TJAHYANDARI SURYANINGTYAS dan ISKANDAR.

Indonesia menempati peringkat ketiga untuk produksi batubara di dunia pada tahun 2023, dengan total produksi 775 juta ton. Aktivitas penambangan sangat penting untuk memenuhi kebutuhan energi, namun di sisi lain penambangan menghasilkan sejumlah limbah, salah satunya air asam tambang (AAT). AAT menjadi isu yang serius terkait pH yang sangat rendah, tingginya konsentrasi sulfat, dan kontaminasi logam-logam terlarut yang berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan dan risiko kesehatan. Secara umum, pengelolaan AAT dilakukan melalui dua metode, yaitu pengelolaan secara aktif menggunakan metode netralisasi dengan kapur dan pengelolaan secara pasif dengan metode lahan basah buatan. Salah satu teknologi yang sedang dikembangkan adalah *permeable reactive barrier* (PRBs), yaitu sistem *permeable* yang dipasang *in situ* untuk menurunkan konsentrasi kontaminan dan meningkatkan pH dengan biaya pemeliharaan yang relatif rendah dan lebih berkelanjutan.

Media PRBs yang digunakan dalam penelitian ini adalah gambut dan *fly ash-bottom ash* (FABA). Gambut merupakan tanah organik dengan kapasitas tukar kation yang tinggi, sehingga efektif digunakan sebagai adsorben dalam mengurangi konsentrasi ion-ion dalam AAT. Secara umum, tingkat kematangan gambut terbagi atas fibrik, hemik dan saprik. Jenis gambut yang digunakan dalam penelitian ini adalah gambut fibrik dengan tingkat kematangan yang rendah dan gambut saprik dengan tingkat kematangan tinggi. FABA merupakan abu hasil pembakaran batubara di PLTU yang jumlahnya melimpah dengan proporsi 80-90% *fly ash* (FA) dan 10-20% *bottom ash* (BA). Karakteristik alkalinitas media ini membantu dalam proses penetralan AAT, sehingga kombinasi gambut dan FABA berpotensi digunakan sebagai media PRBs dalam pengelolaan AAT yang efektif dan berkelanjutan.

Tujuan penelitian ini adalah (1) menguji efektivitas gambut, FABA, maupun kombinasi keduanya sebagai media PRBs dalam pengelolaan air asam tambang, dan (2) menetapkan kombinasi gambut dan FABA yang memiliki efektivitas tinggi dalam menetralkan pH dan mengurangi logam-logam dan sulfat terlarut air asam tambang. Penelitian dilaksanakan pada Agustus 2024 hingga September 2025. Percobaan perkolasi dengan teknik PRBs dilakukan dengan menggunakan AAT artifisial, sedangkan media PRBs menggunakan gambut dan FABA. Penelitian menggunakan dua tingkat kematangan gambut (fibrik dan saprik) dengan model instalasi media sebagai berikut (1) Gambut fibrik-FABA, (2) Gambut saprik - FABA, (3) Gambut fibrik-FABA-gambut fibrik, (4) Gambut saprik-FABA-gambut saprik, (5) Gambut fibrik, (6) Gambut Saprik, (7) FABA. Masing-masing perlakuan diulang sebanyak 3 kali sehingga diperoleh 21 model instalasi. AAT artifisial dialirkan pada instalasi PRBs dengan volume 50 ml perhari selama 49 hari percobaan perkolasi. Pengambilan perkolat dilakukan secara periodik setiap minggu untuk mengetahui perubahan karakteristik AAT. Karakteristik AAT artifisial yang digunakan dalam penelitian disesuaikan dengan karakteristik AAT



alami dari hasil studi literatur, sedangkan volume AAT disesuaikan dengan volume yang dihasilkan dari aktivitas penambangan batubara pada Pit Bravo PT. Sarana Cipta.

Analisis data meliputi perhitungan konsentrasi logam-logam atau sulfat terlarut (mg/L) setelah AAT melalui proses perkolasi. Selanjutnya, kurva plot untuk menggambarkan hubungan antara waktu penghilangan kontaminan dan perubahan karakteristik AAT artifisial. Pada grafik, sumbu X merepresentasikan waktu (hari), sedangkan sumbu Y menunjukkan perubahan karakteristik AAT. Dari hasil analisis tersebut, diperoleh model kurva yaitu dinamika perubahan pH dan dinamika perubahan konsentrasi sulfat dan logam-logam terlarut. Selanjutnya, dilakukan perhitungan efektivitas media PRBs (%).

Hasil penelitian menunjukkan PRBs berbasis media gambut, FABA tunggal ataupun kombinasinya mampu meningkatkan pH AAT dari 2,88 menjadi 7,65-8,46 serta menurunkan konsentrasi polutan AAT Fe dari 292,36 mg/L menjadi 0,01 – 0,76 mg/L, Mn dari 117,92 mg/L menjadi 0,02 – 0,24 mg/L, Al dari 142,87 mg/L menjadi 0,41 – 0,74 mg/L, dan Zn dari 63,38 mg/L menjadi 0,01 mg/L. Konsentrasi sulfat (SO_4^{2-}) berkurang dari 7816,40 mg/L menjadi 466,29 – 548,49 mg/L. Parameter Fe, Mn, Zn, dan Al dalam penelitian ini, telah memenuhi baku mutu lingkungan sesuai ketentuan yang berlaku. Model PRBs terbaik dari seluruh model yang diujikan yaitu model susunan tiga lapis media (gambut saprik – FABA – gambut saprik) karena kinerja yang lebih stabil.

Kata kunci: limbah tambang, netralisasi, polutan, pirit, remediasi

SUMMARY

FIQIATUL FAIDAH. Management of Acid Mine Water Using Permeable Reactive Barrier (PRBs) with Peat and fly ash-bottom ash (FABA). Supervised by R.A DYAH TJAHYANDARI SURYANINGTYAS and ISKANDAR.

Indonesia produced 775 million tons of coal in 2023, ranking third in the world. While mining is necessary to fulfill energy demands, it also generates a number of wastes, including acid mine drainage (AMD). AMD is a serious issue due to its very low pH, high sulfate concentration, and contamination with dissolved metals that have the potential to cause environmental pollution and health risks. In general, AMD are managed using two methods: active management with lime neutralization and passive management using artificial wetlands. One of the technologies presently under development is permeable reactive barriers (PRBs), which are permeable in situ systems designed to decrease concentrations of pollutants and increase pH levels in a cost-effective and environmentally sustainable way.

The media utilized in this study comprised peat and fly ash-bottom ash (FABA). Peat is an organic soil that effectively reduces ion concentrations in AMD as an adsorbent due to its high cation exchange capacity and functional groups. The maturity level of peat is typically categorized into three types: fibric, hemic, and sapric. This study utilized two types of peat: fibric peat, characterized by a low maturity level, and sapric peat, which has a high maturity level. FABA consists of solid waste generated from the combustion of coal in coal-fired power plants, comprising approximately 80-90% fly ash (FA) and 10-20% bottom ash (BA). The integration of peat and FABA presents a promising option for a PRBs medium, facilitating effective and sustainable AMD management due to the alkalinity properties of this medium, which support the AMD neutralization process.

This study aims to (1) evaluate the effectiveness of peat, FABA, and their combination as media for permeable reactive barriers in managing acid mine drainage, and (2) identify the optimal combination of peat and FABA that can be used as PRBs media to effectively neutralize pH and decrease metals and dissolved sulfates in acid mine drainage. The study was carried out between August 2024 and September 2025. Percolation experiments employing the PRBs technique were conducted with synthetic AAT, utilizing peat and FABA as the PRBs media. The research used the maturity level of peat (fibric and sapric), with the following installation models combinations: (1) Fibric peat-FABA, (2) Sapric peat-FABA, (3) Fibric peat-FABA-fibric peat, (4) Sapric peat -FABA-sapric peat, (5) Fibric peat, (6) Sapric peat, (7) FABA. Each model went through three repetitions, resulting in a total of 21 models instalation. Synthetic AMD was introduced into the PRBs installation at a volume per day of 50 ml over a period of 49 days for percolation experiments.

Data analysis included the calculation of AMD concentrations after percolation (mg/L) to determine the amount of dissolved metals and sulfates removed. Subsequently, logarithmic curve fitting was applied to describe the relationship between contaminant removal time and changes in synthetic AMD quality. In the graphs, the X-axis represented time (days), while the Y-axis indicated changes in AMD quality parameters. From the analysis, two primary curve models



were obtained: pH dynamics and the dynamics of sulfate and dissolved metal concentration reductions. The effectiveness of PRBs media was then calculated as a percentage (%).

The results of the study show that peat-based PRBs, single FABA, or a combination of both are capable of increasing the pH of AMD from 2.88 to 7.65-8.46 and reducing the concentration of AMD pollutants. Fe decreased from 292.36 mg/L to 0.01-0.76 mg/L, Mn from 117.92 mg/L to 0.02-0.24 mg/L, Al from 142.87 mg/L to 0.41-0.74 mg/L, and Zn from 63.38 mg/L to 0.01 mg/L. The sulfate (SO_4^{2-}) concentration decreased from 7816.40 mg/L to 466.29–548.49 mg/L. The Fe, Mn, Zn, and Al parameters in this study met the applicable environmental quality standards. The three-layer media model (sapric peat – FABA – sapric peat) was identified as the most effective PRB model among those evaluated, demonstrating an advantage in performance.

Keyword: mine waste, neutralization, pollutants, pyrite, remediation



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

PENGELOLAAN AIR ASAM TAMBANG DENGAN TEKNIK *PERMEABLE REACTIVE BARRIER* (PRBs) BERBASIS MEDIA GAMBUS DAN FLY ASH-BOTTOM ASH (FABA)

FIQIATUL FAIDAH

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Sains
pada
Program Studi Ilmu Tanah

**PROGRAM STUDI ILMU TANAH
FAKULTAS PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis

1. Dr. Ir. RA. Dyah Tjahyandari Suryaningtyas, M.Appl.Sc
2. Prof. Dr. Ir. Iskandar
3. Dr. Ir. Heru Bagus Pulunggono, M.Agr
4. Dr. Ir. Darmawan, M.Sc

Judul Tesis : Pengelolaan Air Asam Tambang dengan Teknik *Permeable Reactive Barrier* (PRBs) Berbasis Media Gambut dan *Fly Ash-Bottom Ash* (FABA)

Nama : Fiqiatul Faidah
NIM : A1501231007

Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Dr. Ir. RA. Dyah Tjahyandari Suryaningtyas,
M.Appl.Sc



Pembimbing 2:

Prof. Dr. Ir. Iskandar



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Ir. Darmawan, M.Sc
NIP 19631103 199002 1 001



Dekan Fakultas Pertanian:

Prof. Dr. Ir. Suryo Wiyono, MSc.Agr
NIP 19690212 199203 1 003




Tanggal Ujian:
5 Januari 2026

Tanggal Lulus:

15 JAN 2026

PRAKATA

Puji syukur kepada Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan nikmat yang telah diberikan sehingga penulis bisa menyelesaikan tesis dengan judul “Pengelolaan Air Asam Tambang dengan Teknik *Permeable Reactive Barrier* Berbasis Gambut dan *Fly Ash-Bottom Ash* (FABA)”. Penulis juga lantunkan salawat serta salam kepada baginda Rasulullah saw serta para keluarga, sahabat, serta para pengikutnya yang menjadi suri tauladan bagi ummat manusia. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penyusunan tesis ini tidak terlepas dari motivasi, dukungan, serta doa-doa yang setiap saat dilangitkan. Untuk itu, ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada:

1. Dr. Ir. RA Dyah Tjahyandari Suryaningtyas, M.Appl.Sc dan Prof. Dr. Ir. Iskandar selaku komisi pembimbing atas segala ilmu, ide, pengarahan, serta motivasi sejak rencana penelitian hingga penyusunan tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Dr. Ir. Heru Bagus Pulunggono, M.Agr selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan untuk tesis ini.
3. Dr. Ir. Darmawan, M.Sc selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, IPB.
4. SUA Laboratorium dan tenaga kependidikan Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, yang telah membantu dan mendampingi dalam pelaksanaan analisis penelitian dan administrasi.
5. Kedua orang tua yang senantiasa mendoakan dan mengupayakan yang terbaik untuk mimpi-mimpi penulis. Serta adik dan seluruh keluarga yang selalu menanyakan kabar, memberikan semangat dan dukungan baik secara moral ataupun material.
6. Ahmad Fathanah As’ad, S.Kesos yang selalu memberikan dukungan moral, perhatian, serta semangat tanpa henti kepada penulis, terutama dalam masa-masa sulit, sehingga penulis tidak menyerah, dan terus melangkah hingga proses penyelesaian tesis ini.
7. Nur Isra, S.P, M.ling yang telah membimbing dan memberikan saran kepada penulis dalam penyelesaian tesis dan penulisan jurnal.
8. Sahabat-sahabat di Ilmu Tanah IPB kak nabila, kak aul, mita dan kak asa, fayun, bang lambang dan Sahabat-sahabat di UNHAS, wafiq, trilin, arief syam, yang senantiasa berbagi semangat, ilmu dan dukungan tanpa henti.

Doa tulus penulis panjatkan agar Allah SWT selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada seluruh pihak yang turut terlibat dalam penyelesaian tesis ini. Semoga kebaikan dan ketulusan yang diberikan menjadi amal yang terus mengalir. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam tesis ini. Namun demikian, besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Bogor, Januari 2026

Fiqiatul Faidah

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Hipotesis	3
II METODE	4
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	4
2.2 Alat dan Bahan	4
2.3 Prosedur Kerja	4
2.4 Rancangan Penelitian	5
2.5 Pelaksanaan Penelitian	6
2.6 Analisis Data	9
III HASIL DAN PEMBAHASAN	10
3.1 Karakteristik Air Asam Tambang Artifisial	10
3.2 Karakteristik Media <i>Permeable Reactive Barrier</i>	10
3.3 Dinamika Perubahan pH Air Asam Tambang	11
3.4 Dinamika Konsentrasi Ion-Ion Logam dan Sulfat dalam Perkolat	13
3.5 Efisiensi Penurunan Konsentrasi Ion-Ion Logam dan Sulfat	18
3.6 Pembahasan Umum	19
IV SIMPULAN DAN SARAN	21
4.1 Simpulan	21
4.2 Saran	21
DAFTAR PUSTAKA	22
LAMPIRAN	28
RIWAYAT HIDUP	39

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.