Transformasi Limbah Sludge IPAL Sewon menjadi Paving Block : Studi Dampak Lingkungan dengan Uji
TCLP, Life Cycle Assessment (LCA) Berbasis SimaPro, dan Valuasi Moneter Eco-cost
Intan Larashatiku, Ir. Intan Supraba, S.T., MSc., Ph.D., IPM., ASEAN. Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PERSETUJUAN ii
HALAMAN PENGESAHAN iii
HALAMAN PERNYATAAN iv
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vi
DAFTAR TABEL ix
DAFTAR GAMBAR xi
INTISARI xiii
ABSTRACT xiv
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Batasan Masalah 4
1.5 Manfaat Penelitian 5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Studi Terdahulu 6
2.1.1 Pemanfaatan Beberapa Macam Limbah dalam Produk *Paving Block* 6
2.1.2 Pengaruh Substitusi Lumpur sebagai Material Pembuatan *Paving Block* 7
2.1.3 Analisis Dampak Lingkungan Produk Berbasis Limbah (TCLP dan LCA) ... 11
2.2 Keaslian Penulisan 20
BAB 3 LANDASAN TEORI 21
3.1 *Paving Block* 21
3.2 Bahan Penyusun *Paving Block* 22
3.2.1 Semen Portland Komposit 22
3.2.2 Air 23
3.2.3 Agregat Halus 24
3.3 Limbah *Sludge* IPAL Sewon 27
3.3.1 Stabilisasi/Solidifikasi (S/S) 30
3.3.2 Karakterisasi Material *Sludge* 31

Transformasi Limbah Sludge IPAL Sewon menjadi Paving Block : Studi Dampak Lingkungan dengan Uji
TCLP, Life Cycle Assessment (LCA) Berbasis SimaPro, dan Valuasi Moneter Eco-cost
Intan Larashatiku, Ir. Intan Supraba, S.T., MSc., Ph.D., IPM., ASEAN. Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.4 Metode Perancangan Campuran (Mix Design) 33
3.5 Perawatan Benda Uji (*Paving Block*) 33
3.6 Mekanisme Pengujian Fisik Mekanik & Lingkungan 34
3.7 Analisis Dampak Lingkungan (*Life Cycle Assessment*) 36
3.7.1 *Goals and Scope* 37
3.7.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) 37
3.7.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) 38
3.7.4 Interpretasi 42
BAB 4 METODE PENELITIAN 43
4.1 Lokasi penelitian 43
4.2 Prosedur penelitian 43
4.3 Pengumpulan Data Penelitian 44
4.4 Alat dan Bahan Penelitian 45
4.4.1 Alat Penelitian 45
4.4.2 Bahan Penelitian 45
4.5 Tahapan Evaluasi Teknis (Eksperimen Laboratorium) 46
4.5.1 Pengambilan dan Persiapan Limbah *Sludge* 46
4.5.2 Pengujian Karkteristik Awal Material 46
4.5.3 Perancangan Campuran (*Mix Design*) 49
4.5.4 Pembuatan dan Perawatan (*Curing*) *Paving Block* 49
4.5.5 Pengujian Kualitas Produk 50
4.6 Tahapan Evaluasi Lingkungan (LCA dan *Eco-cost*) 51
4.6.1 Penentuan *Goal & Scope* 51
4.6.2 Analisis Data Inventori (LCI) 52
4.6.3 Penilaian Dampak (LCIA) 53
4.6.4 Penilaian *Eco-cost* 54
BAB 5 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 55
5.1 Karakterisasi Awal Material Agregat Halus (*Sludge* dan Pasir) 55
5.1.1 Analisis Kadar Air, Abu, dan Volatil pada *Sludge* 55
5.1.2 Hasil Karakterisasi pada *Sludge* 56
5.1.3 Evaluasi Toksisitas Awal (Uji TCLP *Sludge*) 58
5.1.4 Kandungan Zat Organik pada *Sludge* dan Pasir 59
5.1.5 Kadar Lumpur pada Pasir 60
5.1.6 Berat Jenis Pasir dan *Sludge* 61

Transformasi Limbah Sludge IPAL Sewon menjadi Paving Block : Studi Dampak Lingkungan dengan Uji
TCLP, Life Cycle Assessment (LCA) Berbasis SimaPro, dan Valuasi Moneter Eco-cost
Intan Larashatiku, Ir. Intan Supraba, S.T., MSc., Ph.D., IPM., ASEAN. Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.1.7 Gradasi Pasir dan *Sludge* 62
5.2 Perancangan Campuran (*Mix Design*) dan Evaluasi Kepadatan 66
5.3 Evaluasi Sifat Fisik dan Mekanik *Paving Block* 71
5.3.1 Analisis Uji Daya Serap Air 71
5.3.2 Analisis Uji Kuat Tekan 73
5.3.3 Analisis Uji Keausan 77
5.4 Evaluasi Keamanan Lingkungan (Uji TCLP *Paving Block* Optimal) 79
5.5 Analisis Dampak Daur Hidup (LCA) 80
5.5.1 Dampak Lingkungan Daur Hidup Skenario Konvensional 81
5.5.2 Dampak Lingkungan Daur Hidup Skenario Alternatif 87
5.6 Interpretasi Data 93
5.7 Analisis Valuasi Ekonomi Lingkungan (*Eco-cost*) 94
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN 99
6.1 Kesimpulan 99
6.2 Saran 100
DAFTAR PUSTAKA 101
DAFTAR LAMPIRAN 108
LAMPIRAN 1 108
LAMPIRAN 2 120
LAMPIRAN 3 122
LAMPIRAN 4 126
LAMPIRAN 5 127
LAMPIRAN 6 128

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Transformasi Limbah Sludge IPAL Sewon menjadi Paving Block : Studi Dampak Lingkungan dengan Uji
TCLP, Life Cycle Assessment (LCA) Berbasis SimaPro, dan Valuasi Moneter Eco-cost**
Intan Larashatiku, Ir. Intan Supraba, S.T., MSc., Ph.D., IPM., ASEAN. Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Studi Terdahulu dalam Substitusi Lumpur pada Pembuatan Paving Block 9
Tabel 2.2 Kandungan Logam Berat Limbah *Bottom Ash* (Rachmawati dkk., 2024)..... 11
Tabel 2.3 Hasil Pengujian Konsentrasi Pb dan Cu pada *Paving Block* (Aji dkk., 2014)..... 12
Tabel 2.4 Perbandingan Hasil Uji TCLP pada Berbagai Studi Pemanfaatan Limbah sebagai *Paving Block*..... 13
Tabel 2.5 Potensi Dampak Lingkungan (Rachmawati dkk., 2024) 16
Tabel 2.6 Analisis Daur Hidup Pembuatan *Paving Block* Berbasis Limbah pada Beberapa Studi Literatur..... 17
Tabel 3.1 Sifat-sifat Fisika (SNI 03-0691-1996) 21
Tabel 3.2 Senyawa Oksida Utama Semen 22
Tabel 3.3 Persyaratan Rasio Air-Semen 24
Tabel 3.4 Parameter Pengujian Agregat Halus (SK SNI S-04-1989-F)..... 25
Tabel 3.5 Gradasi Agregat Halus (SNI C136:2012) 27
Tabel 3.6 Pengujian TCLP Sludge IPAL Sewon 2014 29
Tabel 3.7 Pengujian TCLP Sludge IPAL Sewon 2024 29
Tabel 3.8 Baku Mutu TCLP (Lampiran XII Salinan PP No. 22 Tahun 2021)..... 35
Tabel 5.1 Hasil Pengujian Kadar Air pada Limbah *Sludge* 55
Tabel 5.2 Hasil Uji Kadar Abu pada *Sludge* 55
Tabel 5.3 Rekapitulasi Hasil Uji Kadar Air, Abu, dan Volatil pada *Sludge*..... 56
Tabel 5.4 Hasil Uji TCLP pada *sludge* IPAL Sewon..... 59
Tabel 5.5 Hasil Uji Kadar Lumpur pada Pasir 60
Tabel 5.6 Hasil Uji Berat Jenis dan Absorbsi pada Pasir..... 61
Tabel 5.7 Hasil Uji Berat Jenis dan Absorbsi pada *Sludge*..... 62
Tabel 5.8 Hasil Pengujian Gradasi pada Pasir 63
Tabel 5.9 Hasil Pengujian Gradasi pada *Sludge* 64
Tabel 5.10 Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakterisasi Awal Agregat Halus 66
Tabel 5.11 Rekapitulasi Proporsi Campuran *Paving Block*..... 70
Tabel 5.12 Evaluasi Berat Isi *Paving Block* Aktual dengan Rencana..... 70
Tabel 5.13 Tabel Mutu *Paving Block*..... 71
Tabel 5.14 Hasil Uji Daya Serap Air Rata-rata *Paving Block* 72
Tabel 5.15 Hasil Uji Kuat Tekan Rata-rata *Paving Block* 74

Transformasi Limbah Sludge IPAL Sewon menjadi Paving Block : Studi Dampak Lingkungan dengan Uji
TCLP, Life Cycle Assessment (LCA) Berbasis SimaPro, dan Valuasi Moneter Eco-cost
Intan Larashatiku, Ir. Intan Supraba, S.T., MSc., Ph.D., IPM., ASEAN. Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 5.16 Rekapitulasi Hasil Uji Keausan Rata-rata *Paving Block* 78

Tabel 5.17 Hasil Uji TCLP pada *Raw Sludge* dan *Paving Block*..... 80

Tabel 5.18 Analisis Komparasi pada *Impact Category*..... 93

Tabel 5.19 Hasil Perhitungan *Eco cost* 96

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Transformasi Limbah Sludge IPAL Sewon menjadi Paving Block : Studi Dampak Lingkungan dengan Uji
TCLP, Life Cycle Assessment (LCA) Berbasis SimaPro, dan Valuasi Moneter Eco-cost**
Intan Larashatiku, Ir. Intan Supraba, S.T., MSc., Ph.D., IPM., ASEAN. Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbandingan Hasil Uji Penyerapan Air dengan SNI Paving Block (Ayu, 2012) . 8
Gambar 2.2 Perbandingan Hasil Uji Kuat Tekan dengan SNI Paving Block (Triyono, 2015) . 8
Gambar 2.3 *Normalization Impact* dengan metode (a) CML 2001 dan (b)TRACI (Goyal dkk., 2023)..... 15
Gambar 3.1 Skema Proses SBR IPAL Sewon (Balai Pialam, 2024) 28
Gambar 3.2 Skema Langkah Kerja *Life Cycle Assessmennt* (LCA) 36
Gambar 3.3 Tahapan Sistem dari Siklus Hidup Produk..... 37
Gambar 3.4 Diagram Input Output LCA 38
Gambar 3.5 *Midpoint* dan *Endpoint* di LCIA (Vogtländer, 2023)..... 39
Gambar 3.6 *Midpoint* dan *Endpoint* pada Metode ReCiPe (Vogtländer, 2023) 40
Gambar 3.7 Kurva Biaya Pencegahan Marginal (Vogtländer, 2023) 41
Gambar 4.1 Bagan Alir Penelitian 44
Gambar 4.2 Titik Pengambilan Sampel Limbah *Sludge* 46
Gambar 4.3 *System Boundaries* 52
Gambar 4.4 *Flowchart* LCI..... 53
Gambar 5.1 Hasil Uji XRF pada *Sludge* 57
Gambar 5.2 Hasil Uji XRD pada *Sludge*..... 57
Gambar 5.3 Hasil Pengujian Kadar Organik : (a) Pengujian pada pasir dan (b) Pengujian pada *sludge* 60
Gambar 5.4 Grafik Hasil Pengujian Gradasi pada Pasir 63
Gambar 5.5 Grafik Hasil Pengujian Gradasi pada *Sludge* 65
Gambar 5.6 Grafik Hasil Uji Daya Serap Air Rata-rata *Paving Block* 73
Gambar 5.7 Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Rata-rata *Paving Block* 75
Gambar 5.8 Perbandingan Hasil Pengujian Kuat Tekan dengan Penelitian Terdahulu..... 76
Gambar 5.9 Grafik Hasil Uji Keausan Rata-rata *Paving Block* 78
Gambar 5.10 Data Inventori Skenario Pertama dalam Tahapan LCI SimaPro..... 81
Gambar 5.11 Jarak Pengangkutan Limbah *Sludge* IPAL Sewon ke TPA Wukirsari Klaten... 82
Gambar 5.12 Tahapan LCIA Skenario Pertama pada SimaPro 83
Gambar 5.13 *Network Global Warming* pada Skenario Pertama dengan Tampilan 0,434% .. 85
Gambar 5.14 Grafik Hasil LCIA pada Skenario Pertama 86
Gambar 5.15 Hasil *Characteriation* LCIA pada Skenario Pertama..... 86

Transformasi Limbah Sludge IPAL Sewon menjadi Paving Block : Studi Dampak Lingkungan dengan Uji
TCLP, Life Cycle Assessment (LCA) Berbasis SimaPro, dan Valuasi Moneter Eco-cost
Intan Larashatiku, Ir. Intan Supraba, S.T., MSc., Ph.D., IPM., ASEAN. Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.16 Data Inventori Skenario Kedua dalam Tahapan LCI SimaPro 88
Gambar 5.17 Jarak Pengangkutan Material Semen dan Pasir..... 89
Gambar 5.18 Tahapan LCIA Skenario Kedua pada SimaPro 90
Gambar 5.19 *Network Global Warming* pada Skenario Kedua dalam Tampilan 1,49%..... 91
Gambar 5.20 Grafik Hasil LCIA pada Skenario Kedua..... 92
Gambar 5.21 Hasil *Characterization* LCIA pada Skenario Kedua..... 92