UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira Tebu Berbasis Mekanika Media Berpori Dua Fase Melalui
Analisis Hidro-Mekanis Terkopel**
Ari Wibowo, Prof. Dr. Ir. Gesang Nugroho, S.T., M.T., IPM; Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
KATA PENGANTAR vi
DAFTAR ISI viii
DAFTAR GAMBAR x
DAFTAR TABEL xiv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xv
INTISARI xviii
ABSTRACT xix
BAB 1. PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Perumusan Masalah 8
1.3. Asumsi dan Batasan Masalah 9
1.4. Keaslian Penelitian 12
1.5. Tujuan Penelitian 13
1.6. Manfaat Penelitian 14
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA 15
2.1. Evolusi Penelitian Ekstraksi Nira pada Stasiun Gilingan 15
2.2. Studi Eksperimental pada Cacahan Tebu (*Prepared cane*) 19
2.3. Pemodelan Numerik Ekstraksi Nira pada Stasiun Gilingan 22
2.4. Optimasi Parameter Ekstraksi Nira pada Stasiun Gilingan 25
2.5. Sintesis dan Kesenjangan Penelitian 29
BAB 3. LANDASAN TEORI 45
3.1. Pengetahuan Dasar Tebu sebagai Bahan Baku Ekstraksi Nira 45
3.2. Dasar Ekstraksi Nira pada Gilingan Rol 50
3.3. Mekanika Media Berpori dan Perilaku Mekanik Cacahan Tebu 67

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira Tebu Berbasis Mekanika Media Berpori Dua Fase Melalui
Analisis Hidro-Mekanis Terkopel**
Ari Wibowo, Prof. Dr. Ir. Gesang Nugroho, S.T., M.T., IPM; Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.4. Formulasi Numerik Metode Elemen Hingga untuk Analisis Tekanan Pori–Perpindahan Terkopel 99

BAB 4. METODOLOGI PENELITIAN 111

4.1. Desain Penelitian 111
4.2. Variabel Penelitian 112
4.3. Alat dan Bahan Penelitian 114
4.4. Tahap 1: Sifat-Sifat Mekanik dari Cacahan Tebu 117
4.5. Tahap 2: Optimasi Parameter-Parameter Ekstraksi Nira 128
4.6. Tahap 3: Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira 133

BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN 143

5.1. Pengujian Sifat-Sifat Mekanik Tebu Cacah 143
5.2. Studi Eksperimental untuk optimasi parameter-parameter operasional pada ekstraksi nira 163
5.3. Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira Tebu 177

BAB 6. PENUTUP 218

6.1. Kesimpulan 218
6.2. Saran 220

DAFTAR PUSTAKA 223
LAMPIRAN 231

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira Tebu Berbasis Mekanika Media Berpori Dua Fase Melalui
Analisis Hidro-Mekanis Terkopel**
Ari Wibowo, Prof. Dr. Ir. Gesang Nugroho, S.T., M.T., IPM; Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Evolusi penelitian ekstraksi nira pada stasiun gilingan. 15
Gambar 3.1 Skema struktur jaringan batang tebu. 46
Gambar 3.2 Komposisi dan neraca massa makroskopik tebu. 48
Gambar 3.3 Skema sistem ekstraksi di penggilingan tebu. 51
Gambar 3.4 Skema mekanisme ekstraksi nira pada gilingan tiga rol. 57
Gambar 3.5 Skema teori dasar milling berbasis volume. 63
Gambar 3.6 Komponen penyusun cacahan tebu sebagai media berpori. 68
Gambar 3.7 Model satuan volume media berpori untuk mendefinisikan volume spesifik dan void ratio. 71
Gambar 3.8 Skema aliran fluida melalui media berpori berdasarkan hukum Darcy. 72
Gambar 3.9 Prinsip tegangan efektif pada media berpori. 74
Gambar 3.10 Ilustrasi bidang kontak dan bidang identifikabel pada media granular atau fibrous. 75
Gambar 3.11 Selubung keruntuhan Mohr–Coulomb. 90
Gambar 3.12 Kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb dalam ruang tegangan. 91
Gambar 3.13 Permukaan luluh Drucker–Prager. 92
Gambar 3.14 Kriteria luluh Drucker–Prager. 93
Gambar 3.15 Model Modified Drucker–Prager Cap (MDPC). 94
Gambar 3.16 Hubungan void ratio terhadap ln σ′v pada kompresi satu dimensi. 96
Gambar 3.17 Kuat puncak dan kuat ultimit terdrainase. 98
Gambar 3.18 Kuat kritis dan garis keadaan kritis. 99
Gambar 3.19 Skema umum formulasi dan penyelesaian MEH. 100
Gambar 3.20 Elemen tekanan pori–perpindahan terkopel dengan derajat kebebasan perpindahan dan tekanan pori pada node. 105
Gambar 3.21 Domain analisis dan kondisi batas mekanik-hidrolik pada formulasi tekanan pori–perpindahan terkopel. 106

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira Tebu Berbasis Mekanika Media Berpori Dua Fase Melalui
Analisis Hidro-Mekanis Terkopel**
Ari Wibowo, Prof. Dr. Ir. Gesang Nugroho, S.T., M.T., IPM; Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 3.22 Algoritma solusi incremental-iterative pada analisis MEH nonlinear terkopel. 108
Gambar 4.1 Peta jalan penelitian 111
Gambar 4.2 Diagram alur pengujian sifat-sifat mekanik cacahan tebu 118
Gambar 4.3 Mesin mini shredder 119
Gambar 4.4 Proses manufaktur kontainer ekstraksi 120
Gambar 4.5 (a) Persiapan sampel, (b) tebu cacah dengan tiga tingkat kerusakan, (c) Uji PI berdasarkan metode ICUMSA GS7-3 121
Gambar 4.6 Skema pengujian kompresi aksial terkungkung 125
Gambar 4.7 Diagram alur pengujian optimasi parameter-parameter ekstraksi 130
Gambar 4.8 Diagram alur pemodelan dan simulasi numerik ekstraksi nira 134
Gambar 4.9. Skema konfigurasi dan parameter geometri model gilingan empat rol 138
Gambar 5.1 PI dari masing-masing sampel tebu cacah 143
Gambar 5.2 Pengaruh PI pada massa jenis curah 144
Gambar 5.3 (a) Gambar SEM pada penampang melintang tebu, (b) gambar SEM pada penampang memanjang tebu, (c) gambar SEM pada tebu cacah, (d) gambar Dino-Lite pada penampang melintang tebu, (e) gambar Dino-Lite penampang memanjang tebu, (f) gambar Dino-Lite pada tebu cacah, dan (g) spektrum EDS tebu 146
Gambar 5.4 Spektrum FTIR dari tebu segar dan tebu cacah dengan nilai PI berbeda. 149
Gambar 5.5 Kurva DSC (hitam), DTG (merah), dan TG (biru) dari sampel tebu. 150
Gambar 5.6 Hubungan antara PI dan efisiensi ekstraksi pada berbagai kecepatan penekanan. 152
Gambar 5.7 Kurva Poisson’s ratio terhadap tegangan aksial pada tebu hasil persiapan dengan PI berbeda 154
Gambar 5.8 Kurva tegangan-regangan pada proses loading–unloading untuk gaya 5 kN, 10 kN, dan 20 kN. 155

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira Tebu Berbasis Mekanika Media Berpori Dua Fase Melalui
Analisis Hidro-Mekanis Terkopel**
Ari Wibowo, Prof. Dr. Ir. Gesang Nugroho, S.T., M.T., IPM; Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.9 Hubungan antara PI dan modulus Young pada berbagai gaya pemulihan 157
Gambar 5.10 Kurva hubungan void ratio terhadap ln σ_z pada gaya 5 kN, 10 kN, dan 20 kN. 158
Gambar 5.11 Kurva shear stress–shear displacement pada PI 85,95%, 92,14%, dan 95,96% dengan berbagai tekanan normal 160
Gambar 5.12 Nilai PI lima sampel tebu hasil pencacahan dengan tingkat kehalusan berbeda. 163
Gambar 5.13 Kurva hubungan antara PI dan efisiensi ekstraksi nira. 164
Gambar 5.14 Hubungan antara PI, efisiensi ekstraksi, dan kebutuhan daya spesifik. 167
Gambar 5.15 Skema uji kompresi aksial terkungkung untuk optimasi tekanan terhadap ekstraksi 168
Gambar 5.16 Grafik pengaruh tekanan terhadap ekstraksi 168
Gambar 5.17 Grafik pengaruh kecepatan tekan terhadap ekstraksi 170
Gambar 5.18 Pemanas elemen batang 173
Gambar 5.19 Pemanas elemen rice cooker 173
Gambar 5.20 Pemanas kolom elemen 174
Gambar 5.21 Perbandingan kurva gaya reaksi terhadap perpindahan antara hasil eksperimen dan simulasi pada uji kompresi aksial terkungkung 188
Gambar 5.22 Evolusi tekanan fluida pori terhadap perpindahan, disertai distribusi kontur tekanan pada beberapa tahapan kompresi. 191
Gambar 5.23 Evolusi *void ratio* terhadap perpindahan, disertai distribusi kontur pada beberapa tahapan kompresi. 194
Gambar 5.24 Evolusi *seepage velocity* terhadap perpindahan selama proses kompresi. 196
Gambar 5.25 Distribusi dan arah vektor aliran fluida pada material tebu cacah pada salah satu tahap kompresi. 198
Gambar 5.26 Distribusi komponen energi terhadap perpindahan selama proses kompresi. 200

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira Tebu Berbasis Mekanika Media Berpori Dua Fase Melalui
Analisis Hidro-Mekanis Terkopel**
Ari Wibowo, Prof. Dr. Ir. Gesang Nugroho, S.T., M.T., IPM; Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.27 Konfigurasi geometri dan komponen model gilingan empat rol skala industri. 203
Gambar 5.28 Diskretisasi elemen hingga pada material cacahan tebu, rol, dan plat ampas. 204
Gambar 5.29 Evolusi deformasi material cacahan tebu selama simulasi pada t = 0-6,5 s. 205
Gambar 5.30 Distribusi tegangan ekuivalen von Mises pada material cacahan tebu di dalam sistem gilingan empat rol. 207
Gambar 5.31 Distribusi tekanan kontak, *void ratio*, tekanan fluida pori, dan tekanan hidrostatik, pada material cacahan tebu. 208
Gambar 5.32 Distribusi gaya reaksi pada masing-masing rol selama proses penggilingan tebu. 210

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pemodelan dan Simulasi Numerik Ekstraksi Nira Tebu Berbasis Mekanika Media Berpori Dua Fase Melalui
Analisis Hidro-Mekanis Terkopel**
Ari Wibowo, Prof. Dr. Ir. Gesang Nugroho, S.T., M.T., IPM; Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Ringkasan penelitian terdahulu terkait sifat mekanik tebu, pemodelan ekstraksi, dan optimasi parameter gilingan. 32
Tabel 2.2. Komparasi pendekatan pemodelan ekstraksi nira dan posisi penelitian 44
Tabel 3.1 Kelompok output dan variabel hasil analisis pada model tekanan pori–perpindahan terkopel. 109
Tabel 4.1 Pengembangan model numerik kompresi aksial terkungkung 135
Tabel 4.2. Parameter geometri dan kinematik model gilingan empat rol 139
Tabel 4.3 Pengembangan model numerik sistem gilingan empat rol 140
Tabel 5.1 Persamaan fitting linear pada segmen reloading untuk berbagai nilai PI dan gaya pemulihan 156
Tabel 5.2 Compression index dan swelling index untuk setiap PI dengan pembebanan yang berbeda 159
Tabel 5.3 Kuat kohesi dan sudut gesekan internal untuk setiap sampel PI 161
Tabel 5.4 Rekapitulasi sifat-sifat mekanik tebu cacah yang dipengaruhi PI 162
Tabel 5.5 Analisis efektivitas relatif parameter terhadap ekstraksi 175
Tabel 5.6 Hasil uji independensi mesh pada simulasi kompresi aksial 183
Tabel 5.7. Ringkasan stabilitas inkremental dan konvergensi model mesh 4 mm 185
Tabel 5.8 Estimasi kebutuhan torsi dan daya berdasarkan gaya reaksi hasil simulasi sistem gilingan empat rol 211
Tabel 5.9. Perbandingan kecepatan putar dan torsi hasil simulasi dengan data operasional PG Rejoagung Baru 214