UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Multi-Class Domain Adaptation Untuk Kompensasi Drift Temporal dan Variasi Antar Perangkat Pada Sistem Enose Multi Unit
Budi Sumanto, Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc; Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
HALAMAN PENGESAHAN ..... **ii**
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI ..... **iii**
PRAKATA ..... **iv**
DAFTAR ISI ..... **vi**
DAFTAR GAMBAR ..... **ix**
DAFTAR TABEL ..... **xii**
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN ..... **xiii**
INTISARI ..... **xiv**
ABSTRACT ..... **xv**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1. Latar Belakang **1**
1.2. Rumusan Masalah **3**
1.3. Batasan Masalah **3**
1.4. Tujuan Penelitian **4**
1.5. Hipotesa Penelitian **4**
1.6. Manfaat Penelitian **5**
1.7. Kebaruan (Novelty) **6**
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **8**
2.1. Pengembangan *Electronic Nose* (E-nose) **8**
2.2. Metode Transfer Kalibrasi dan Kompensasi *Drift* pada Sistem E-nose **8**
2.2.1. Metode Kalibrasi Klasik Berbasis Transformasi 9
2.2.2. Metode Berbasis Ekstraksi Fitur dan *Preprocessing* 10
2.2.3. Metode Berbasis *Machine Learning* dan *Domain Adaptation* 12
2.3. Kesenjangan Penelitian dan Justifikasi Studi **20**
BAB III LANDASAN TEORI **22**
3.1. Sistem *Electronic Nose* (E-nose) **22**
3.2. Prinsip Kerja Sistem E-nose **30**
3.3. Akuisisi Data **31**
3.4. Model Analisis Kemometrik Pada Sistem E-nose **32**
3.4.1 Analisis Kemometrik dan *machine learning* 33
3.4.2 *Transfer Learning* 34
3.4.3 *Multi-Class Domain Adaptation (MCDA)* 36

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Multi-Class Domain Adaptation Untuk Kompensasi Drift Temporal dan Variasi Antar Perangkat Pada Sistem Enose Multi Unit
Budi Sumanto, Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc; Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.4.4 ***Ekstraksi Fitur*** 40
3.4.5 ***Principal Component Analysis (PCA)*** 43
3.4.6 ***Analisis t-SNE*** 44
3.4.7 ***Confusion Matrix*** 46
3.4.8 ***Receiver Operating Characteristics – Area Under Curve (ROC-AUC)*** . 48
BAB IV METODE PENELITIAN 51
4.1. Alat dan Bahan Penelitian 51
4.1.1. Peralatan Pembuatan Sampel Gas 51
4.1.2. Peralatan Sistem E-nose dan Pengambilan Data 52
4.1.3. Sensor Gas MOS pada Sistem GeNose C19 52
4.1.4. Bahan Penelitian 53
4.2. Alur Metodologi Penelitian 54
4.3. Pembuatan Sampel Gas 56
4.3.1. Prinsip Pembuatan Sampel Gas 56
4.3.2. Prosedur Injeksi Analit Cair 56
4.3.3. Perhitungan Konsentrasi Sampel Gas 57
4.3.4. Variasi Jenis dan Konsentrasi sampel Gas 58
4.3.5. Ringkasan Proses Pembuatan Sampel Gas 58
4.4. Proses Pengambilan (Sampling) Data 59
4.4.1. Persiapan Sistem dan Kondisi Sampling 59
4.4.2. Mekanisme Aliran Gas dan Pembentukan *Baseline* 60
4.4.3. Proses *Sniffing* (Koleksi Data Respon Sensor) 60
4.4.4. Pembentukan Data Respon Sensor terhadap Waktu 62
4.4.5. Ringkasan Proses sampling Data 62
4.5. Tempat dan Waktu Penelitian 63
4.6. Dataset Penelitian dan Sumber data 63
4.6.1. Data Primer: Sistem GeNose C19 63
4.6.2. Dataset Benchmark: UCSD (Vergara, 2012) 63
4.7. Prosedur Penelitian 63
4.7.1. Setup Sistem E-nose 64
4.7.2. Proses Pembuatan Sampel Gas 64
4.7.3. Proses *Sampling* Data 64
4.7.4. Koleksi Data (Proses *Sniffing*) 64
4.7.5. Pra-Pemrosesan Sinyal dan Ekstraksi Fitur 65

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Multi-Class Domain Adaptation Untuk Kompensasi Drift Temporal dan Variasi Antar Perangkat Pada Sistem Enose Multi Unit
Budi Sumanto, Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc; Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.7.6. Kalibrasi dan Evaluasi 66
4.8. Desain Eksperimen dan Skema Transfer Kalibrasi **66**
4.8.1. Skenario Eksperimen Antar Unit E-nose 66
4.8.2. Pemilihan Domain Sumber dan Target 69
4.8.3. Skema Transfer Kalibrasi pada *Dataset Benchmark Drift* 69
4.9. Analisis Data **71**
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN **75**
5.1 Analisis Awal *Drift* dan Fitur **75**
5.2 Evaluasi Intra-Unit dan Pemilihan Unit Referensi **82**
5.3 Evaluasi Transfer Kalibrasi Antar-Unit pada Sistem E-nose Multi-Unit **85**
5.3.1. Evaluasi Transfer Kalibrasi Berdasarkan Skema-1 85
5.3.2. Evaluasi Transfer Kalibrasi Berdasarkan Skema-2 98
5.3.3. Sintesis dan Perbandingan Kedua Skema 107
5.4 Evaluasi model kalibrasi Umum **109**
5.5 Eksperimen pada data *benchmark* sensor *drift* **112**
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN **122**
6.1. Kesimpulan **122**
6.2. Saran **123**
DAFTAR PUSTAKA **124**
LAMPIRAN **132**

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Multi-Class Domain Adaptation Untuk Kompensasi Drift Temporal dan Variasi Antar Perangkat Pada Sistem Enose Multi Unit
Budi Sumanto, Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc; Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Skema kebaruan (Novelty) penelitian 7
Gambar 3. 1. Perbandingan sistem penciuman mamalia dan e-nose (Arshak *et al.*, 2004) 23
Gambar 3. 2. Bagian-bagian sensor gas TGS (Figaro, 2012)..... 25
Gambar 3. 3. Model Potensial barrier saat gas oksigen terserap dalam permukaan bahan sensing (Figaro, 2005) 26
Gambar 3. 4. Model Potensial barrier saat gas lain bereaksi dengan oksigen (Figaro, 2005) 26
Gambar 3. 5. Pengaruh tekanan oksigen terhadap resistansi sensor gas (Figaro, 2005) . 27
Gambar 3. 6. Karakteristik sensitifitas sensor terhadap variasi gas (Rs/Ro) (Figaro, 2012) 28
Gambar 3. 7. Respon sensor gas (Figaro, 2012)..... 28
Gambar 3. 8. Profil tindakan awal sensor gas (Figaro, 2012) 29
Gambar 3. 9. Karakteristik kepekaan sensor terhadap pengaruh suhu dan kelembaban (Figaro, 2012) 29
Gambar 3. 10. Kestabilan jangka panjang dari sensor gas TGS (Figaro, 2012)..... 30
Gambar 3. 11. Karakteristik sensitivitas sensor terhadap tegangan pemanas (Figaro, 2012) 30
Gambar 3. 12. Blok diagram akuisisi data secara umum 31
Gambar 3. 13. Rangkaian dasar untuk sensor TGS813, TGS822, dan TGS826 (Figaro, 2002) 32
Gambar 3. 14. Rangkaian dasar untuk sensor TGS2600, TGS2602, TGS2611, TGS2612, dan TGS2620 (Figaro, 2012) 32
Gambar 3. 15. Tradisional *machine learning* vs *transfer learning* (Leon-Medina *et al.*, 2020) 36
Gambar 3. 16. Ilustrasi confusion matrix 47
Gambar 3. 17. Grafik kurva ROC-AUC..... 49
Gambar 4. 1 Sistem e-nose..... 24
Gambar 4. 2. Proses injeksi cairan analit ke *sampling bag* menggunakan *micro syringe*. 57
Gambar 4. 3. Proses sampling gas analit..... 59
Gambar 4. 4. Konfigurasi waktu sampling a) *Flushing* b) *Collecting* c) *Purging* 61
Gambar 4. 5. Alur Analisis Data Skenario-1..... 72
Gambar 4. 6. Alur *transfer learning* dengan metode MCDA 73
Gambar 5. 1. Respon sensor dari keempat unit e-nose terhadap pemberian gas toluena pada konsentrasi 30 ppm (a) E-nose 1, (b) E-nose 2, (c) E-nose 3, dan (d) E-nose 4) pada saat pengukuran (Sumanto *et al*., 2025)..... 76
Gambar 5. 2. Distribusi nilai (a) *baseline* dan (b) Kelembaban Relatif (RH) serta Suhu yang dihitung dari empat unit e-nose pada pengukuran gas toluene 30 ppm sebagai contoh. Pola variasi serupa teramati pada gas ethanol dan aseton (Sumanto *et al*., 2025)..... 77
Gambar 5. 3. Memperlihatkan skor PCA dari sampel dengan pengaturan unit e-nose yang berbeda. Warna menunjukkan jenis gas (aseton(ACT), etanol(ETN), toluene(TLN)), sedangkan bentuk simbol menunjukkan asal unit e-nose (E-nose 1-4). PC1 dan PC2 secara

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Multi-Class Domain Adaptation Untuk Kompensasi Drift Temporal dan Variasi Antar Perangkat Pada Sistem Enose Multi Unit
Budi Sumanto, Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc; Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

total menjelaskan 48,76% variansi (masing-masing 29,60% dan 19,16%)(Sumanto *et al*., 2025) 79
Gambar 5. 4. Contoh respons khas sensor berbasis logam-oksida terhadap 60 ppm aseton yang menunjukkan tiga fase utama: baseline, paparan gas, dan pemulihan. Pola serupa diamati pada ethanol dan toluene (Sumanto *et al*., 2025). 80
Gambar 5. 5. Perbandingan sinyal asli dan sinyal yang difilter menggunakan metode *Exponential Moving Average* (EMA) dengan tiga nilai α berbeda (0,1; 0,01; 0,001) (Sumanto *et al*., 2025). 81
Gambar 5. 6. Plot hasil nilai rata-rata akurasi dan presisi dari pengujian menggunakan metode klasifikasi SVM, QDA, GB, NB, dan LDA pada tiap unit e-nose. 84
Gambar 5. 7. Kurva ROC-AUC hasil transfer kalibrasi dari unit E1 ke E2 menggunakan pendekatan MCDA. 90
Gambar 5. 8. Visualisasi PCA hasil transfer kalibrasi dari unit E1 ke E2 menggunakan MCDA: (a) berdasarkan label kelas, (b) berdasarkan domain (sumber vs target) 91
Gambar 5. 9. Visualisasi t-SNE hasil transfer kalibrasi dari unit E1 ke E2 menggunakan pendekatan MCDA: (a) berdasarkan label kelas, (b) berdasarkan domain. 92
Gambar 5. 10. Kurva ROC-AUC hasil transfer kalibrasi dari unit E1 ke E3 menggunakan pendekatan MCDA. 93
Gambar 5. 11. Visualisasi PCA berdasarkan label kelas (a) dan domain (b) dari hasil transfer kalibrasi antara unit E1 dan E3. Komponen utama pertama (PC1) dan kedua (PC2) menjelaskan masing-masing 46% dan 35% variansi total, dengan total 81% variansi yang tercakup dalam proyeksi dua dimensi ini. 94
Gambar 5. 12. Visualisasi t-SNE berdasarkan label kelas (a) dan domain (b) dari hasil transfer kalibrasi antara unit E1 dan E3. Distribusi yang cukup terpisah antar kelas menunjukkan efektivitas MCDA dalam mengekstraksi fitur diskriminatif, sementara pemisahan domain mengindikasikan bahwa adaptasi domain belum sepenuhnya terwujud. 95
Gambar 5. 13. Kurva ROC untuk skenario transfer kalibrasi dari unit E1 ke E4. Nilai AUC *micro* dan *macro* rata-rata sebesar 0,98 menunjukkan kemampuan diskriminatif yang sangat baik. Kinerja per kelas juga tinggi (kelas 0: 0,96, kelas 1: 1,00, kelas 2: 0,96), mengindikasikan efektivitas MCDA dalam klasifikasi multi-kelas meskipun terdapat perbedaan domain. 96
Gambar 5. 14. Visualisasi PCA dari hasil transfer kalibrasi antara unit E1 (sumber) dan unit E4 (target), ditampilkan berdasarkan kelas (a) dan domain (b). Dua komponen utama (PC1 dan PC2) menjelaskan varians kumulatif sebesar 80%. 96
Gambar 5. 15. Visualisasi t-SNE dari hasil transfer kalibrasi antara unit E1 (sumber) dan unit E4 (target), ditampilkan berdasarkan kelas (a) dan domain (b). 97
Gambar 5. 16. Kurva ROC untuk skenario transfer kalibrasi dari unit E2 ke E1. 101
Gambar 5. 17. Visualisasi distribusi fitur menggunakan PCA pada skenario transfer domain E2 → E1 dengan model MCDA. Plot (a) menunjukkan pemisahan data berdasarkan kelas (0: Aseton, 1: Etanol, 2: Toluena), sedangkan plot (b) menunjukkan distribusi data berdasarkan domain (Sumber dan Target). 102
Gambar 5. 18. Visualisasi distribusi fitur hasil t-SNE untuk skenario transfer domain E2 → E1 menggunakan model MCDA. Plot (a) menunjukkan pemetaan data berdasarkan label kelas (0: Aseton, 1: Etanol, 2: Toluena), sedangkan plot (b) menunjukkan distribusi data berdasarkan domain (*Source* dan Target). 103

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Multi-Class Domain Adaptation Untuk Kompensasi Drift Temporal dan Variasi Antar Perangkat Pada Sistem Enose Multi Unit
Budi Sumanto, Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc; Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5. 19. Kurva ROC untuk skenario transfer domain E2 → E3 dengan model MCDA. Model menunjukkan performa klasifikasi yang sangat baik dengan nilai AUC mendekati 1 untuk seluruh kelas (kelas 0 = 0,96; kelas 1 = 1,00; kelas 2 = 0,99), serta nilai *micro-average* dan *macro-average* AUC sebesar 0,99..... 104
Gambar 5. 20. Visualisasi PCA hasil transfer kalibrasi dari unit E2 ke E3. Panel (a) menunjukkan distribusi data berdasarkan kelas, sedangkan panel (b) menunjukkan distribusi data berdasarkan domain..... 105
Gambar 5. 21. Visualisasi t-SNE hasil transfer kalibrasi dari unit E2 ke E3. Panel kiri menunjukkan distribusi data berdasarkan kelas, sedangkan panel kanan menunjukkan distribusi berdasarkan domain. 106
Gambar 5. 22. Perbandingan akurasi model *Gradient Boosting* (GB) dan *Multi-Class Domain Adaptation* (MCDA) terhadap data Unit E-nose 4, diuji dengan konfigurasi sumber data latih bertahap (1: E-nose 1 (E1); 2: E-nose 2 (E2) dan (E1+E2); 3: E-nose 3 (E3) dan (E1+E2+E3) dan skenario kalibrasi konstan (n=90) serta bertahap (n=90, 180, 270).... 110
Gambar 5. 23. Diagram skater PCA tiap *batch* 113
Gambar 5. 24. Kurva ROC-AUC pada *Batch*-1 terhadap *Batch*-6..... 116
Gambar 5. 25. Visualisasi PCA hasil transfer kalibrasi *batch* 1-6 yang dipisah berdasarkan (a) kelas yaitu (0, 1, 2, 3, 4 dan 5) dan (b) berdasarkan domain. 117
Gambar 5. 26. Visualisasi t-SNE transfer kalibrasi antara *batch* 1-6 yang dipisahkan (a) berdasarkan kelas dan (b) berdasarkan domain. 118
Gambar 5. 27. Kurva ROC-AUC pada pengukuran *batch* 5-6..... 118
Gambar 5. 28. Visualisasi PCA hasil transfer kalibrasi *batch* 5-6 yang dipisah berdasarkan kelas (Gambar Kiri) dan berdasarkan domain (Gambar Kanan). 119
Gambar 5. 29. Visualisasi t-SNE transfer kalibrasi antara *batch* 5-6 yang dipisahkan (a) berdasarkan kelas dan (b) berdasarkan domain. 120

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Multi-Class Domain Adaptation Untuk Kompensasi Drift Temporal dan Variasi Antar Perangkat Pada Sistem Enose Multi Unit
Budi Sumanto, Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc; Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Perbandingan metode kalibrasi dan domain adaptation pada sistem *electronic nose* (e-nose) dalam menghadapi *drift* temporal dan variasi antar unit pada skenario klasifikasi multi kelas. 16
Tabel 3. 1. Daftar produk e-nose yang tersedia secara komersial 23
Tabel 3. 2. Fitur yang diekstrak dari data deret waktu 42
Tabel 4. 1. Peralatan Pembuatan Sampel Gas 52
Tabel 4. 2. Peralatan Sistem E-nose dan Pengambilan Data 52
Tabel 4. 3. Sensor MOS pada instrument GeNose C19 (Hidayat *et al*., 2022) 53
Tabel 4. 4. Bahan Penelitian 53
Tabel 4. 5. Sampel gas dan tingkat konsentrasinya 58
Tabel 4. 6. Jumlah susunan unit e-nose dan sampel yang digunakan dalam berbagai skenario yang dipertimbangkan, serta partisi data yang digunakan untuk setiap skenario 68
Tabel 4. 7. Jumlah pengukuran dan informasi *batch* kumpulan data e-nose dengan *drift*. 70
Tabel 5. 1. Hasil uji skenario pertama dengan beberapa model *machine learning* 83
Tabel 5. 2. Hasil evaluasi metrik akurasi dengan metode MCDA dan GB. 86
Tabel 5. 3. Performansi klasifikasi model MCDA pada skenario transfer antar-unit berbasis urutan waktu. Metrik AUC ROC disajikan dalam format *micro-average*, *macro-average*, dan per kelas (0: Aseton, 1: Etanol, 2: Toluena), berikut kategorisasi kualitas model. 89
Tabel 5. 4. Hasil evaluasi metrik akurasi pada Skema 2, menggunakan pendekatan transfer kalibrasi berdasarkan urutan performa unit, dengan metode *Gradient Boosting* (GB) dan *Multi-Class Domain Adaptation* (MCDA). 99
Tabel 5. 5. Performansi klasifikasi model MCDA pada skenario transfer antar-unit berdasarkan performa domain sumber. Metrik AUC ROC disajikan dalam format *micro-aver*age, *macro-average*, dan per kelas (0: Aseton, 1: Etanol, 2: Toluena), berikut kategorisasi kualitas model. 100
Tabel 5. 6. Ringkasan perbandingan performa klasifikasi MCDA antara dua skema transfer kalibrasi berdasarkan domain sumber 108
Tabel 5. 7. Akurasi Pengenalan (%) Dalam Skenario-1 115
Tabel 5. 8. Akurasi Pengenalan (%) Dalam Skenario-2. 118

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Multi-Class Domain Adaptation Untuk Kompensasi Drift Temporal dan Variasi Antar Perangkat Pada Sistem Enose Multi Unit
Budi Sumanto, Dr. Eng. Ahmad Kusumaatmaja, S.Si., M.Sc; Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

Batch	:	Kelompok data berdasarkan waktu pengambilan atau *batch* sensor
DANN	:	*Domain-Adversarial Neural Network*
ΔR	:	*Delta Resistansi sensor*
EMA	:	*Exponential Moving Average*
E-nose	:	*Electronic Nose*
GB	:	*Gradient Boosting*
LDA	:	*Linear Discriminant Analysis*
MCDA	:	*Multi-Class Domain Adaptation*
MOS	:	*Metal Oxide Semiconductor*
NB	:	*Naive Bayes*
PCA	:	*Principal Component Analysis*
QDA	:	*Quadratic Discriminant Analysis*
ROC-AUC	:	*Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve*
SDG	:	*Sustainable Development Goals*
Steady-state	:	Kondisi stabil pada respons sensor
SVM	:	*Support Vector Machine*
Transien	:	*Fase awal respons sensor*
UDA	:	*Unsupervised Domain Adaptation*