

## DAFTAR ISI

|                                                               |             |
|---------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....                               | <b>iii</b>  |
| <b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....                               | <b>iv</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....                                   | <b>v</b>    |
| <b>INTISARI</b> .....                                         | <b>vi</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                         | <b>vii</b>  |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....                                       | <b>viii</b> |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....                                    | <b>x</b>    |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....                                     | <b>xiii</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....                                | <b>14</b>   |
| I.1. Latar Belakang .....                                     | 14          |
| I.2. Rumusan Masalah .....                                    | 16          |
| I.3. Maksud dan Tujuan .....                                  | 16          |
| I.4. Manfaat Penelitian .....                                 | 16          |
| I.5. Lokasi Penelitian .....                                  | 17          |
| I.6. Batasan Penelitian .....                                 | 19          |
| I.7. Peneliti Terdahulu .....                                 | 19          |
| I.8. Keaslian Penelitian .....                                | 19          |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....                          | <b>23</b>   |
| II.1. Geologi Daerah Penelitian .....                         | 23          |
| II.1.1. Cekungan Sumatera Selatan .....                       | 23          |
| II.1.2. Cekungan Tarakan .....                                | 24          |
| II.1.3. Cekungan Barito .....                                 | 25          |
| II.1.4. Cekungan Pasir .....                                  | 25          |
| II.1.5. Cekungan Ombilin .....                                | 26          |
| II.2. Karakteristik Geokimia Batubara Daerah Penelitian ..... | 27          |
| II.2.1. Cekungan Sumatera Selatan .....                       | 27          |
| II.2.2. Cekungan Tarakan .....                                | 28          |
| II.2.3. Cekungan Barito .....                                 | 28          |
| II.2.4. Cekungan Pasir .....                                  | 29          |
| II.2.5. Cekungan Ombilin .....                                | 29          |
| <b>BAB III DASAR TEORI DAN HIPOTESIS</b> .....                | <b>31</b>   |
| III.1. Geologi Batubara .....                                 | 31          |
| III.1.1. Genesis batubara .....                               | 31          |
| III.1.2. Material penyusun batubara .....                     | 33          |
| III.2. Karakteristik Geokimia Batubara .....                  | 34          |
| III.2.1. Unsur-unsur dalam batubara .....                     | 34          |
| III.2.2. Keterdapatan unsur-unsur dalam batubara .....        | 35          |
| III.3. Pengantar <i>Machine Learning</i> .....                | 37          |
| III.3.1. Jenis-jenis <i>machine learning</i> .....            | 37          |
| III.3.2. <i>Unsupervised machine learning</i> .....           | 40          |
| III.4. Analisis <i>Machine Learning</i> .....                 | 44          |
| III.5. Hipotesis .....                                        | 47          |
| <b>BAB IV METODE PENELITIAN</b> .....                         | <b>49</b>   |
| IV.1. Metodologi Penelitian .....                             | 49          |

|                             |                                                                     |            |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| IV.1.1.                     | Data dan alat.....                                                  | 49         |
| IV.1.2.                     | Tahapan penelitian .....                                            | 51         |
| IV.1.3.                     | Jadwal penelitian.....                                              | 54         |
| <b>BAB V</b>                | <b>PENYAJIAN DATA .....</b>                                         | <b>56</b>  |
| V.1.                        | Distribusi Data.....                                                | 56         |
| V.1.1.                      | Unsur Jejak.....                                                    | 56         |
| V.1.2.                      | Oksida Utama.....                                                   | 62         |
| V.1.3.                      | Proksimat .....                                                     | 71         |
| <b>BAB VI</b>               | <b>PEMBAHASAN.....</b>                                              | <b>75</b>  |
| VI.1.                       | Eliminasi/ <i>Screening</i> Variabel Data .....                     | 75         |
| VI.1.1.                     | Unsur Jejak.....                                                    | 75         |
| VI.1.2.                     | Oksida Utama.....                                                   | 75         |
| VI.1.3.                     | Proksimat .....                                                     | 76         |
| VI.2.                       | Signifikansi Perbedaan antar Cekungan dan Umur.....                 | 77         |
| VI.2.1.                     | Signifikansi perbedaan berdasarkan data unsur jejak .....           | 77         |
| VI.2.2.                     | Signifikansi perbedaan berdasarkan data oksida utama.....           | 79         |
| VI.2.3.                     | Signifikansi perbedaan berdasarkan proksimat.....                   | 81         |
| VI.3.                       | Karakteristik Geokimia Batubara berdasarkan Cekungan dan Umur ..... | 83         |
| VI.3.1.                     | Analisis <i>Principal Component Analysis</i> (PCA).....             | 83         |
| VI.3.2.                     | Analisis <i>Hierarchical Clustering Analysis</i> (HCA) .....        | 90         |
| VI.3.3.                     | Analisis <i>Self-Organizing Map</i> (SOM) .....                     | 99         |
| VI.4.                       | Komparasi PCA, HCA, dan SOM dalam Data Geokimia Batubara .....      | 101        |
| VI.6.                       | Signifikansi Karakteristik Geokimia terhadap Pembentukan Batubara . | 103        |
| <b>BAB VII</b>              | <b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>                                   | <b>106</b> |
| VII.1.                      | Kesimpulan.....                                                     | 106        |
| VII.2.                      | Saran.....                                                          | 107        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b> |                                                                     | <b>108</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>        |                                                                     | <b>114</b> |
| <b>Lampiran 1.</b>          | <b>Rekap Hasil <i>Hierarchical Clustering Analysis</i> .....</b>    | <b>115</b> |
| <b>Lampiran 2.</b>          | <b><i>Script Analisis Unsupervised Machine Learning</i>.....</b>    | <b>134</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 1.1.</b> Cekungan sedimen pembawa batubara di Indonesia (Friederich dan van Leeuwen, 2017).....                                                                                                                                                                                             | 14 |
| <b>Gambar 1.2.</b> Alur kerja metode <i>unsupervised machine learning</i> (Naeem dkk., 2023).....                                                                                                                                                                                                     | 15 |
| <b>Gambar 1.3.</b> Peta lokasi penelitian .....                                                                                                                                                                                                                                                       | 18 |
| <b>Gambar 2.1.</b> Fisiografi/stratigrafi daerah penelitian (A) Cekungan Sumatera Selatan, Cekungan Barito, dan Cekungan Tarakan; (B) Cekungan Pasir; (C) Cekungan Ombilin (Koesoemadinata dan Pulunggono, 1978; Doust dan Noble, 2008; Suhada dan Wibisono, 2014) .....                              | 27 |
| <b>Gambar 3.1.</b> Diagram dari proses pembatubaraan yang melibatkan konversi sisa-sisa tumbuhan menjadi berbagai macam maseral, serta yang melibatkan kelembaban dan proses genetik dari materi mineral (Harvey dan Ruch 1986 dalam Susilawati, 2004) .....                                          | 32 |
| <b>Gambar 3.2.</b> Komposisi material penyusun batubara (Dai dkk., 2020) .....                                                                                                                                                                                                                        | 33 |
| <b>Gambar 3.3.</b> Nilai clarke unsur-unsur utama ( <i>major elements</i> ) dan unsur jejak ( <i>trace elements</i> ) pada batubara di dunia (dimodifikasi Hu dkk., 2021 dalam Ketriz dan Yudovich, 2009).....                                                                                        | 35 |
| <b>Gambar 3.4.</b> Jenis-jenis <i>machine learning</i> (Naqa dan Murphy, 2015).....                                                                                                                                                                                                                   | 37 |
| <b>Gambar 3.5.</b> Ilustrasi proses <i>Supervised Machine Learning</i> (Dhage dan Raina, 2016).....                                                                                                                                                                                                   | 39 |
| <b>Gambar 3.6.</b> Ilustrasi Proses <i>Unsupervised Machine Learning</i> (Dhage dan Raina, 2016) .....                                                                                                                                                                                                | 40 |
| <b>Gambar 3.7.</b> Ilustrasi pengelompokan dendrogram dari lima objek (Earle dan Hurley, 2015).....                                                                                                                                                                                                   | 41 |
| <b>Gambar 3.8.</b> (a) Visualisasi komponen-komponen SOM; (b) contoh perhitungan fungsi keterdekatan (Nimmanterdwong dkk., 2021). .....                                                                                                                                                               | 42 |
| <b>Gambar 3.9.</b> Ilustrasi proses Apriori – <i>Association Rule Learning</i> (Dobilas, 2021).....                                                                                                                                                                                                   | 42 |
| <b>Gambar 3.10.</b> Ilustrasi hasil <i>One-Class Support Vector Machine</i> .....                                                                                                                                                                                                                     | 43 |
| <b>Gambar 3.11.</b> Ilustrasi skematik dari <i>denoising autoencoder</i> (DAE) menggambarkan bahwa data input asli bersifat berdimensi tinggi, berisik, dan tidak lengkap (Peng dkk., 2020) .....                                                                                                     | 43 |
| <b>Gambar 3.12.</b> (A) Ilustrasi PCA menemukan proyeksi ortogonal yang dapat menjelaskan variansi data; (B) V1 yaitu sumbu utama: sebagian besar variansi data; V2 yaitu sumbu kedua: sisa variansi yang tidak dijelaskan oleh V1; (C) V1 dan V2 menjadi sederhana (Kherif dan Latypova, 2019) ..... | 44 |
| <b>Gambar 3.13.</b> Visualisasi hasil UMAP.....                                                                                                                                                                                                                                                       | 44 |
| <b>Gambar 3.14.</b> Alur kerja <i>machine learning</i> (dimodifikasi dari Wang dkk., 2009; Wei dkk., 2019; Zhu dkk., 2025).....                                                                                                                                                                       | 45 |
| <b>Gambar 4.1.</b> Profil stratigrafi batubara daerah penelitian .....                                                                                                                                                                                                                                | 50 |
| <b>Gambar 4.2.</b> Ilustrasi <i>boxplot</i> (Mirzargar dkk., 2014).....                                                                                                                                                                                                                               | 52 |
| <b>Gambar 4.3.</b> Alur pemrosesan data .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 54 |
| <b>Gambar 4.4.</b> Diagram alir penelitian .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 55 |
| <b>Gambar 5.1.</b> Persebaran data variabel REY .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 58 |

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 5.2.</b> Persebaran data variabel Ba.....                                                                                              | 58 |
| <b>Gambar 5.3.</b> Persebaran data variabel Ga.....                                                                                              | 59 |
| <b>Gambar 5.4.</b> Persebaran data variabel Sr.....                                                                                              | 59 |
| <b>Gambar 5.5.</b> Persebaran data variabel Hf.....                                                                                              | 60 |
| <b>Gambar 5.6.</b> Persebaran data variabel Nb .....                                                                                             | 60 |
| <b>Gambar 5.7.</b> Persebaran data variabel Ta .....                                                                                             | 61 |
| <b>Gambar 5.8.</b> Persebaran data variabel U .....                                                                                              | 61 |
| <b>Gambar 5.9.</b> Persebaran data variabel V .....                                                                                              | 62 |
| <b>Gambar 5.10.</b> Persebaran data variabel Zr .....                                                                                            | 62 |
| <b>Gambar 5.11.</b> Persebaran data variabel SiO <sub>2</sub> .....                                                                              | 64 |
| <b>Gambar 5.12.</b> Persebaran data variabel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                                                                | 65 |
| <b>Gambar 5.13.</b> Persebaran data variabel BaO.....                                                                                            | 65 |
| <b>Gambar 5.14.</b> Persebaran data variabel Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                                                                | 66 |
| <b>Gambar 5.15.</b> Persebaran data variabel MgO.....                                                                                            | 66 |
| <b>Gambar 5.16.</b> Persebaran data variabel MnO.....                                                                                            | 67 |
| <b>Gambar 5.17.</b> Persebaran data variabel Na <sub>2</sub> O .....                                                                             | 67 |
| <b>Gambar 5.18.</b> Persebaran data variabel P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....                                                                 | 68 |
| <b>Gambar 5.19.</b> Persebaran data variabel SrO.....                                                                                            | 68 |
| <b>Gambar 5.20.</b> Persebaran data variabel TiO <sub>2</sub> .....                                                                              | 69 |
| <b>Gambar 5.21.</b> Persebaran data variabel CaO.....                                                                                            | 69 |
| <b>Gambar 5.22.</b> Persebaran data variabel Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                                                                | 70 |
| <b>Gambar 5.23.</b> Persebaran data variabel K <sub>2</sub> O .....                                                                              | 70 |
| <b>Gambar 5.24.</b> Persebaran data variabel <i>Ash Yield</i> .....                                                                              | 72 |
| <b>Gambar 5.25.</b> Persebaran data variabel <i>Volatile Matter</i> .....                                                                        | 73 |
| <b>Gambar 5.26.</b> Persebaran data variabel <i>Fixed Carbon</i> .....                                                                           | 73 |
| <b>Gambar 5.27.</b> Persebaran data variabel <i>Moisture</i> .....                                                                               | 74 |
| <b>Gambar 6.1.</b> Eliminasi/screening parameter unsur jejak (hasil <i>boxplot</i> ) .....                                                       | 75 |
| <b>Gambar 6.2.</b> Eliminasi/screening parameter oksida utama (hasil <i>boxplot</i> ).....                                                       | 76 |
| <b>Gambar 6.3.</b> Eliminasi/screening parameter proksimat (hasil <i>boxplot</i> ).....                                                          | 77 |
| <b>Gambar 6.4.</b> Signifikansi perbedaan antar cekungan berdasarkan unsur jejak<br>(hasil analisis <i>Kruskal Wallis and Dunn Test</i> ) .....  | 78 |
| <b>Gambar 6.5.</b> Signifikansi perbedaan anatar umur berdasarkan unsur jejak (hasil<br>analisis <i>Kruskal Wallis and Dunn Test</i> ) .....     | 79 |
| <b>Gambar 6.6.</b> Signifikansi perbedaan antar cekungan berdasarkan oksida utama<br>(hasil analisis <i>Kruskal Wallis and Dunn Test</i> ) ..... | 80 |
| <b>Gambar 6.7.</b> Signifikansi perbedaan antar umur berdasarkan oksida utama<br>(hasil analisis <i>Kruskal Wallis and Dunn Test</i> ) .....     | 81 |
| <b>Gambar 6.8.</b> Signifikansi perbedaan antar cekungan berdasarkan proksimat<br>(hasil analisis <i>Kruskal Wallis and Dunn Test</i> ) .....    | 82 |
| <b>Gambar 6.9.</b> Signifikansi perbedaan antar umur berdasarkan proksimat (hasil<br>analisis <i>Kruskal Wallis and Dunn Test</i> ) .....        | 83 |
| <b>Gambar 6.10.</b> Karakteristik geokimia berdasarkan unsur jejak (hasil <i>principal<br/>component analysis</i> ) .....                        | 86 |
| <b>Gambar 6.11.</b> Karakteristik geokimia berdasarkan oksida utama (hasil <i>principal<br/>component analysis</i> ) .....                       | 89 |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Gambar 6.12.</b> Karakteristik geokimia berdasarkan proksimat (hasil <i>principal component analysis</i> ) .....     | 90  |
| <b>Gambar 6.13.</b> Karakteristik geokimia berdasarkan unsur jejak (hasil <i>hierarchical cluster analysis</i> ) .....  | 93  |
| <b>Gambar 6.14.</b> Karakteristik geokimia berdasarkan oksida utama (hasil <i>hierarchical cluster analysis</i> ) ..... | 96  |
| <b>Gambar 6.15.</b> Karakteristik geokimia berdasarkan proksimat (hasil <i>hierarchical cluster analysis</i> ) .....    | 98  |
| <b>Gambar 6.16.</b> Karakteristik geokimia (hasil <i>self-organizing map</i> ) .....                                    | 100 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabel 1.1.</b> Peneliti terdahulu.....                                                                  | 21  |
| <b>Tabel 3.1.</b> Keterdapatn unsur jejak ( <i>trace elements</i> ) dalam mineral .....                    | 36  |
| <b>Tabel 3.2.</b> Keterdapatn oksida utama ( <i>major oxides</i> ) dalam mineral .....                     | 36  |
| <b>Tabel 3.4.</b> Klasifikasi <i>supervised machine learning</i> (Ayodele, 2010; Osisanwo dkk., 2017)..... | 38  |
| <b>Tabel 3.5.</b> Klasifikasi <i>unsupervised machine learning</i> (Naeem dkk., 2023) .....                | 40  |
| <b>Tabel 4.1.</b> Ketersedian data penelitian .....                                                        | 49  |
| <b>Tabel 4.2.</b> Alat penelitian .....                                                                    | 51  |
| <b>Tabel 4.3.</b> Jadwal penelitian yang direncanakan oleh penulis.....                                    | 54  |
| <b>Tabel 6.1.</b> Nilai <i>loadings</i> parameter unsur jejak.....                                         | 84  |
| <b>Tabel 6.2.</b> Nilai <i>loadings</i> parameter oksida utama .....                                       | 87  |
| <b>Tabel 6.3.</b> Nilai <i>loadings</i> parameter proksimat .....                                          | 90  |
| <b>Tabel 6.4.</b> Komparasi PCA, HCA, dan SOM dalam Analisis Geokimia Batubara.....                        | 102 |