

**PERBANDINGAN PETA KENDALI MIXED EXPONENTIALLY WEIGHTED  
MOVING AVERAGE–CUMULATIVE SUM DENGAN EXPONENTIALLY  
WEIGHTED MOVING AVERAGE DAN CUMULATIVE SUM  
(STUDI KASUS: KADAR FE SLAG NIKEL  
DI PT VALE INDONESIA)**

**NAAIFAH PUTRI RAMADHANI  
H051201059**



**PROGRAM STUDI STATISTIKA DEPARTEMEN STATISTIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**PERBANDINGAN PETA KENDALI MIXED EXPONENTIALLY WEIGHTED  
MOVING AVERAGE–CUMULATIVE SUM DENGAN EXPONENTIALLY  
WEIGHTED MOVING AVERAGE DAN CUMULATIVE SUM  
(STUDI KASUS: KADAR FE SLAG NIKEL  
DI PT VALE INDONESIA)**

NAAIFAH PUTRI RAMADHANI  
H051201059

Skripsi

UNIVERSITAS HASANUDDIN

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Statistika

Program Studi Statistika

pada

**PROGRAM STUDI STATISTIKA  
DEPARTEMEN STATISTIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

SKRIPSI

PERBANDINGAN PETA KENDALI MIXED EXPONENTIALLY WEIGHTED  
MOVING AVERAGE-CUMULATIVE SUM DENGAN EXPONENTIALLY  
WEIGHTED MOVING AVERAGE DAN CUMULATIVE SUM  
(STUDI KASUS: KADAR FE SLAG NIKEL  
DI PT VALE INDONESIA)

NAAIFAH PUTRI RAMADHANI  
H051201059

Skripsi,

telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Sarjana Statistika pada 12 Agustus  
2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Studi Statistika  
Departemen Statistika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Hasanuddin  
Makassar

Mengesahkan:  
Pembimbing tugas akhir,



Dr. Erna Tri Herdiani, S.Si., M.Si.  
NIP. 19750429 200003 2 001

Mengetahui:  
Ketua Program Studi,



Dr. Anna Iskandariyati, S.Si., M.Si.  
NIP. 19740808 200501 2 002

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "Perbandingan Peta Kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum* dengan *Exponentially Weighted Moving Average* dan *Cumulative Sum* (Studi Kasus: Kadar Fe Slag Nikel PT Vale Indonesia)" adalah benar karya saya dengan arahan pembimbing skripsi saya (Dr. Erna Tri Herdiani, S.Si., M.Si.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang 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 skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 12 Agustus 2024



Naaifah Putri Ramadhani  
NIM. H051201059

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* atas segala berkat dan rahmatnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul "**Perbandingan Peta Kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum* dengan *Exponentially Weighted Moving Average* dan *Cumulative Sum* (Studi Kasus: Kadar Fe Slag Nikel PT Vale Indonesia)**". Shalawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada baginda Rasulullah *Shallallahu 'Alaihi Wa Sallam*, yang telah menjadi contoh sekaligus panutan bagi penulis.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Dr. Erna Tri Herdiani, S.Si., M.Si., selaku Pembimbing Utama yang senantiasa meluangkan waktu dalam kesibukannya untuk memberikan kritik dan masukan dalam penyelesaian skripsi ini. Terima kasih kepada Ibu Prof. Dr. Nurtiti Sunusi, S.Si, M.Si. dan Ibu Sitti Sahrinan, S.Si., M.Si., selaku Tim Penguji atas saran dan kritikan yang berharga serta waktu yang telah diberikan kepada penulis. Terima kasih juga kepada Pimpinan Universitas Hasanuddin beserta Jajarannya, Ketua Departemen Statistika, Jajaran Dosen dan Staf Departemen Statistika atas ilmu yang bermanfaat dan fasilitas selama studi penulis.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dua orang yang paling berjasa dalam hidup penulis, Ayahanda Muntaha dan Ibunda Rosnawati yang selalu berjuang dalam mengupayakan yang terbaik, kasih sayang dan dorongan tanpa henti, khususnya sepanjang perjalanan penulisan skripsi ini. Tanpa kehadiran dan doa kalian pencapaian ini tidak mungkin terwujud. Terima kasih kepada saudara penulis, Naufal Ramadhan atas doa dan dukungannya beserta keluarga besar lainnya yang selalu memberikan semangat kepada penulis. Terima kasih juga kepada sahabat penulis, Sahrina Ramadhani yang sudah menjadi *support system* dan tempat berbagi cerita dan selalu bisa diandalkan, baik dalam momen menyenangkan maupun di saat-saat sulit. Kepada teman-teman penulis, Puput, Dela, Ridwan, dan Ainun, terima kasih atas segala bantuan dan kebersamaan yang membuat penulis tidak merasa kesepian selama masa perkuliahan. Kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu terima kasih atas segala kontribusi yang telah diberikan selama proses penulisan skripsi. Dan kepada diri saya sendiri, apresiasi sebesar-besarnya karena telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai. Terima kasih karena terus berusaha dan tidak menyerah, serta menikmati setiap prosesnya yang bisa dibilang tidak mudah.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis memohon maaf. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat untuk berbagai pihak.

Penulis,  
  
Naaifah Putri Ramadhani

## ABSTRAK

NAAIFAH PUTRI RAMADHANI. **Perbandingan Peta Kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum* dengan *Exponentially Weighted Moving Average* dan *Cumulative Sum* (Studi Kasus: Kadar Fe Slag Nikel PT Vale Indonesia)** (dibimbing oleh Dr. Erna Tri Herdiani)

**Latar belakang.** Peta kendali *Cumulative Sum* (CUSUM) merupakan peta kendali yang umum digunakan karena lebih sensitif dalam mendeteksi pergeseran kecil dibandingkan dengan peta kendali Shewhart. Peta kendali *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) juga memiliki kemampuan yang sama dengan peta kendali CUSUM. Untuk meningkatkan sensitivitas peta kendali, peta kendali EWMA dan CUSUM digabungkan menjadi peta kendali *mixed EWMA-CUSUM* (MEC). Dalam peta kendali MEC, nilai statistik  $Z_i$  digunakan untuk menghitung nilai statistik  $M_i$ . **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja peta kendali MEC dengan peta kendali EWMA dan CUSUM berdasarkan nilai *Average Run Length* (ARL), serta menerapkan peta kendali tersebut pada data kadar Fe dalam slag nikel. **Metode.** Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu pemilihan parameter optimal pada peta kendali MEC, EWMA, dan CUSUM menggunakan data simulasi dengan  $0 \leq \delta \leq 2$ . Selanjutnya, parameter optimal pada masing-masing peta kendali digunakan untuk membentuk peta kendali pada data kadar Fe slag nikel periode 3 Mei 2023 – 11 Juni 2023. **Hasil.** Peta kendali MEC ( $0,05 \leq \delta \leq 2$ , parameter  $k^*$  sebesar 0,5, parameter  $h^*$  sebesar 5, dan  $37,42 \leq \lambda_q \leq 0,1$ ) lebih sensitif dalam mendeteksi perubahan proses dibandingkan dengan peta kendali EWMA ( $L$  sebesar 2,824 dan  $\lambda$  sebesar 0,1) dan CUSUM ( $k$  sebesar 0,5 dan sebesar 5) berdasarkan nilai ARL yang lebih kecil. **Kesimpulan.** Berdasarkan parameter optimal maka diperoleh batas kendali optimum ( $-9,72679 \leq MEC \leq 9,72679$ ,  $19,27834 \leq EWMA \leq 20,72166$ ,  $-4,45128 \leq CUSUM \leq 4,45128$ ) untuk data kadar Fe slag nikel.

**Kata kunci:** *Average Run Length, Cumulative Sum, Exponentially Weighted Moving Average, Mixed Exponentially Weighted Moving Average-Cumulative Sum, Peta Kendali.*

## ABSTRACT

NAAIFAH PUTRI RAMADHANI. **Comparison of Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum Control Charts with Exponentially Weighted Moving Average and Cumulative Sum (Case Study: Fe Content in Nickel Slag at PT Vale Indonesia)** (supervised by Dr. Erna Tri Herdiani)

**Introduction.** The Cumulative Sum (CUSUM) control map is a commonly used control map because it is more sensitive in detecting small shifts than the Shewhart control map. The Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) control map also has the same capability as the CUSUM control map. To increase the sensitivity of the control map, the EWMA and CUSUM control maps are combined into a mixed EWMA-CUSUM (MEC) control map. In the MEC control map, the value of the  $Z_i$  statistic is used to calculate the value of the  $M_i$  statistic. **Objective.** This study aims to compare the performance of the MEC control map with the EWMA and CUSUM control maps based on the Average Run Length (ARL) value, and apply the control map to the Fe content data in nickel slag. **Methods.** This research was conducted through several stages, including the selection of optimal parameters on the MEC, EWMA, and CUSUM control maps using simulated data with  $0 \leq \delta \leq 2$ . Furthermore, the optimal parameters on each control map were used to form a control map for the nickel slag Fe content data for the period May 3, 2023 - June 11, 2023. **Results.** The MEC control map ( $0.05 \leq \delta \leq 2$ , parameter  $k^*$  of 0,5, parameter  $h^*$  of 5, and  $37,42,0,75 \leq \lambda_q \leq 0,1$ ) was more sensitive in detecting process changes than the EWMA ( $L$  of 2.824 and  $\lambda$  of 0,1) and CUSUM ( $k$  of 0,5 and of 5) control maps, as indicated by smaller ARL values. **Conclusion.** Based on the optimal parameters, the optimum control limits ( $-9,72679 \leq MEC \leq 9,72679$ ,  $19.27834 \leq EWMA \leq 20.72166$ ,  $-4.45128 \leq CUSUM \leq 4.45128$ ) for nickel slag Fe content data were obtained.

**Keywords:** Average Run Length, Control Chart, Cumulative Sum, Exponentially Weighted Moving Average, Mixed Exponentially Weighted Moving Average-Cumulative Sum.

## DAFTAR ISTILAH

Istilah	Arti dan Penjelasan
<i>Average Run Length</i>	Rata-rata jumlah sampel yang diambil sebelum sebuah peta kendali mendeteksi kondisi <i>out of control</i> .
<i>Cumulative Sum</i>	Teknik pengendalian proses statistik untuk mendeteksi pergeseran kecil dalam proses dengan menjumlahkan perbedaan dari nilai target secara kumulatif.
<i>Exponentially Weighted Moving Average</i>	Metode statistik yang digunakan dalam pengendalian proses dengan memberikan bobot yang lebih besar pada data yang lebih baru untuk mengidentifikasi perubahan yang lebih cepat.
<i>In Control</i>	Kondisi di mana proses berjalan sesuai dengan batas-batas kendali yang telah ditetapkan.
Konstanta	Nilai tetap atau nilai yang tidak berubah.
<i>Mean</i>	Nilai tengah dari sekumpulan data yang diperoleh dengan menjumlahkan semua nilai dan membaginya dengan jumlah data tersebut.
Metalurgi	Ilmu dan teknologi yang mempelajari proses ekstraksi logam dari bijihnya.
<i>Out of Control</i>	Kondisi di mana proses melampaui batas kendali yang telah ditetapkan.
Parameter	Nilai yang mewakili karakteristik tertentu dari populasi yang digunakan dalam model statistik untuk menjelaskan fenomena atau proses.
Pembobot	Faktor yang digunakan dalam perhitungan untuk memberikan nilai atau bobot tertentu pada data yang berbeda berdasarkan kepentingannya.
Peta Kendali	Alat dalam pengendalian kualitas yang digunakan untuk memantau dan menganalisis variabilitas proses melalui grafik yang menunjukkan data sampel terhadap batas kendali yang telah ditetapkan.
<i>Slag</i>	Produk samping yang dihasilkan selama proses peleburan logam, terdiri dari campuran bahan-bahan yang tidak diinginkan yang dipisahkan dari logam murni.
Standar Deviasi	Ukuran statistik yang menunjukkan seberapa banyak variasi atau penyebaran dalam suatu data.
Varians	Ukuran statistik yang menunjukkan seberapa jauh setiap nilai dalam set data menyimpang dari rata-rata data tersebut.

## DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Lambang/singkatan	Arti dan Penjelasan
$\lambda$	(lambda)/Faktor bobot peta kendali EWMA
$Z_i$	Nilai statistik EWMA pada titik ke-i
$n$	Jumlah observasi data sampel
$\mu_0$	(mu nol)/Nilai mean atau rata-rata target proses yang diharapkan.
$L$	Lebar batas kendali dalam peta kendali EWMA.
$\sigma$	(sigma)/ Standar deviasi dari proses.
$C_i$	Nilai statistik CUSUM pada titik ke-i.
$C_i^+$	Nilai statistik CUSUM positif pada titik ke-i
$C_i^-$	Nilai statistik CUSUM negatif pada titik ke-i
$K$	Nilai referensi CUSUM
$k$	Parameter yang digunakan untuk menentukan sensitivitas peta kendali CUSUM
$h$	Parameter untuk menentukan Interval keputusan CUSUM
$M_i^+$	Nilai statistik MEC positif pada titik ke-i
$M_i^-$	Nilai statistik MEC negatif pada titik ke-i
$\lambda_q$	(lambda)/Pembobot dari MEC
$K_z$	Nilai referensi yang dipengaruhi varians dari EWMA
$k^*$	Setara dengan nilai parameter k pada CUSUM
$h^*$	Setara dengan nilai parameter h pada CUSUM
ARL	<i>Average Run Length</i>
$ARL_0$	<i>Average Run Length</i> saat proses dalam kendali
$ARL_1$	<i>Average Run Length</i> saat proses tidak dalam kendali
$\alpha$	(alpha)/Probabilitas kesalahan tipe I
$\beta$	(beta)/Probabilitas kesalahan tipe II
$\delta$	(delta)/Perubahan yang diharapkan terdeteksi oleh peta kendali.
EWMA	<i>Exponentially Weighted Moving Average</i>
CUSUM	<i>Cumulative Sum Control Chart</i>
MEC	<i>Mixed Exponentially Weighted Moving Average-Cumulative Sum Control Chart</i>
BKA	Batas Kendali Atas
BKB	Batas Kendali Bawah
Fe	Simbol kimia untuk besi
PT	Perseroan Terbatas
Tbk	Terbuka

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGANTAR.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	v
UCAPAN TERIMA KASIH .....	vi
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Batasan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Teori .....	3
BAB II METODOLOGI PENELITIAN.....	12
2.1 Sumber Data .....	12
2.2 Variabel Penelitian.....	12
2.3 Metode Analisis .....	12
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN .....	14
3.1 Peta Kendali <i>Mixed Exponentially Weighted Moving Average-Cumulative Sum</i> .....	14
3.2 Uji Asumsi Normalitas .....	17
3.3 <i>Average Run Length</i> .....	18
3.4 Peta Kendali <i>Exponentially Weighted Moving Average</i> pada Data Kadar Fe Slag Nikel .....	20
3.5 Peta Kendali <i>Cumulative Sum</i> pada Data Kadar Fe Slag Nikel .....	23
3.6 Peta Kendali <i>Mixed Exponentially Weighted Moving Average - Cumulative Sum</i> pada Data Kadar Fe Slag Nikel.....	29
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN .....	35
4.1 Kesimpulan .....	35
4.2 Saran.....	35
DAFTAR PUSTAKA .....	36
LAMPIRAN .....	39

**DAFTAR TABEL**

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
1. Perbandingan ARL CUSUM ( $k = 0,5, h = 5$ ), EWMA ( $\lambda = 0,1, L = 2,824$ ) dan MEC ( $\lambda_q = 0,1, h^* = 37,42$ ).....	18

**DAFTAR GAMBAR**

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
1. Peta kendali EWMA fase I iterasi ke-1 .....	21
2. Peta kendali EWMA fase I iterasi ke-2 .....	22
3. Peta kendali EWMA fase II .....	23
4. Peta kendali CUSUM Fase I Iterasi ke-1 .....	25
5. Peta kendali CUSUM Fase I Iterasi ke-2 .....	26
6. Peta kendali CUSUM Fase I Iterasi ke-3 .....	28
7. Peta kendali CUSUM fase II .....	29
8. Peta kendali MEC fase I iterasi ke-1 .....	31
9. Peta kendali MEC fase I iterasi ke-2 .....	33
10. Peta kendali MEC fase II .....	34

**DAFTAR LAMPIRAN**

<b>Lampiran</b>	<b>Halaman</b>
1. Data Kadar Fe pada Slag Nikel Periode 3 Mei 2023 – 11 Juni 2023.....	40
2. Uji Normalitas.....	41
3. <i>Average Run Length Exponentially Weighted Moving Average</i> .....	42
4. <i>Average Run Length Cumulative Sum</i> .....	44
5. <i>Average Run Length Mixed Exponentially Weighted Moving Average- Cumulative Sum</i> .....	45
6. Peta kendali EWMA fase I.....	50
7. Peta kendali EWMA fase II.....	56
8. Peta kendali CUSUM fase I.....	58
9. Peta kendali CUSUM fase II.....	64
10. Peta Kendali MEC Fase I.....	67
11. Peta Kendali MEC Fase II.....	71
12. Riwayat Hidup Penulis .....	74

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam bidang industri, menjaga kualitas sangat penting untuk mempertahankan reputasi perusahaan. Oleh karena itu, perusahaan yang berfokus pada kualitas cenderung lebih berhasil dalam membangun hubungan yang baik dengan konsumen dan meningkatkan efisiensi operasional yang dapat memperkuat reputasi perusahaan di pasar global maupun internasional. Dengan demikian, perusahaan perlu memastikan bahwa produknya memenuhi ekspektasi konsumen dan standar kualitas yang ditetapkan. Evaluasi dan pengawasan rutin terhadap kualitas produk sangat penting untuk mengidentifikasi dan mengatasi masalah yang timbul dari produk yang dihasilkan. Dengan cara ini, perusahaan dapat mengambil tindakan pencegahan sebelum masalah tersebut mempengaruhi kualitas produk.

PT Vale Indonesia Tbk merupakan salah satu perusahaan yang bergerak dalam bidang industri pertambangan khususnya pada pengolahan nikel. Perusahaan ini didirikan pada 25 juli 1968 dengan pabrik pengolahan terletak di Sorowako, Luwu Timur, Sulawesi Selatan. PT Vale Indonesia Tbk berkontribusi positif terhadap pembangunan Indonesia yang berkelanjutan melalui peningkatan kapasitas produksi untuk memenuhi kebutuhan konsumen. Tingginya permintaan akan kebutuhan nikel mendorong PT Vale Indonesia Tbk untuk selalu meningkatkan kualitas sesuai standar yang telah ditetapkan. Peningkatan produksi nikel di Indonesia akan berdampak pada bertambahnya jumlah limbah (*tailing*) dari pengolahan nikel. Salah satu jenis limbah yang dihasilkan adalah limbah padat (*slag*). *Slag* nikel adalah bongkahan limbah industri nikel yang memiliki bobot besar dengan warna coklat tua dan terdiri dari unsur Ni, Co, Cu, Si, S dan Fe yang memiliki kandungan unsur paling dominan yaitu 47,3% (Huang et al., 2015). Pengendalian kualitas yang dilakukan PT Vale Indonesia Tbk dengan menggunakan *control chart* untuk mengidentifikasi data yang tidak sesuai dengan standar yang ditetapkan. Tujuannya adalah agar ketika terjadi penyimpangan yang tidak diinginkan dalam data, dapat dilakukan perbaikan lebih lanjut untuk mencapai keseragaman kualitas. Oleh karena itu, diperlukan alat yang mampu untuk mendeteksi penyimpangan selama proses produksi berlangsung, untuk meningkatkan kualitas proses yang dilakukan.

Salah satu alat statistik yang biasa digunakan untuk memonitoring kualitas produk adalah peta kendali. Peta kendali pertama kali diperkenalkan oleh Shewhart pada tahun 1924. Namun, peta kendali tersebut kurang efektif dalam mendeteksi pergeseran rata-rata yang kecil, sehingga kesalahan kecil dalam proses yang dapat menurunkan produksi sering kali tidak dapat dideteksi. Kelemahan ini memicu perkembangan peta kendali Cumulative Sum (CUSUM) dan peta kendali *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) (Montgomery, 2012).

Peta kendali *Cumulative Sum* (CUSUM) diperkenalkan oleh Page pada tahun 1954 dan *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) diperkenalkan

oleh Robert pada tahun 1959. Peta kendali CUSUM digunakan sebagai alternatif terhadap peta kendali Shewart untuk memonitor rata-rata proses. Peta kendali ini menggunakan jumlah kumulatif penyimpangan dari nilai target. Beberapa penelitian sebelumnya mengenai peta kendali CUSUM dikaji lagi oleh beberapa peneliti diantaranya, Hawkins (1998), Koshti (2011), dan Novoa (2020) menyatakan bahwa peta kendali CUSUM lebih baik mendeteksi perubahan yang lebih kecil dibandingkan dengan peta kendali Shewhart. Selain peta kendali CUSUM, alternatif lain untuk mengatasi peta kendali Shewhart adalah peta kendali EWMA. Beberapa penelitian sebelumnya mengenai peta kendali EWMA diantaranya, Crowder (1989), Lucas (1990), dan Braimah (2014) memberikan informasi bahwa peta kendali EWMA memberikan gambaran yang lebih jelas pada perubahan yang lebih kecil dibandingkan dengan peta kendali Shewhart. Untuk meningkatkan kemampuan deteksi dari peta kendali, para peneliti telah menyarankan rangkaian dan modifikasi tertentu. Pada tahun 2013 Abbas menggabungkan rangkaian peta kendali EWMA dan CUSUM menjadi peta kendali baru yaitu *Mixed* EWMA-CUSUM (MEC). Penggabungan dua peta kendali EWMA dan CUSUM akan membuat peta kendali lebih sensitif terhadap pergeseran rata-rata proses yang kecil jika dibandingkan dengan peta kendali EWMA atau CUSUM (Abbas et al., 2013).

Peta kendali *Mixed* EWMA-CUSUM yang dikembangkan oleh Abbas (2013) merupakan kombinasi probabilitas yang melibatkan parameter statistik dari peta kendali EWMA dan peta kendali CUSUM dalam satu struktur. Tujuan dari kombinasi kedua peta kendali ini adalah untuk meningkatkan sensitivitas dari kedua peta kendali tersebut, khususnya untuk proses yang memiliki perubahan kecil, sehingga peta kendali MEC dapat memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan kedua peta kendali tersebut secara terpisah. Peta kendali ini tidak hanya mengandalkan pengamatan saat ini, tetapi juga mengumpulkan informasi dari pengamatan sebelumnya, sehingga memberikan deteksi yang lebih cepat ketika proses berada dalam kondisi *out of control*. Resti (2021) melalui penelitiannya mengemukakan bahwa peta kendali *Mixed* EWMA-CUSUM dengan menggunakan data dengan ukuran subgrup  $n > 1$  memiliki kinerja yang baik dalam mendeteksi perubahan kecil pada proses. Ajadi (2017) mengembangkan peta kendali MEC dengan menggunakan tambahan fitur *Headstart*, Riaz (2019) mengembangkan peta kendali MEC dengan pendekatan multivariat, dan Noor-UI-Amin (2022) menggunakan peta kendali MEC dengan mempertimbangkan kesalahan pengukuran (*measurement error*).

Pada tugas akhir ini, akan membandingkan peta kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum* (MEC), peta kendali *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) dan peta kendali *Cumulative Sum* (CUSUM) sebagai alat untuk mendeteksi pergeseran rata-rata proses yang lebih kecil pada data kadar unsur *slag* nikel. Sehingga, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul **"Perbandingan Peta Kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum* dengan *Exponentially Weighted Moving Average* dan *Cumulative Sum* (Studi Kasus: Kadar Fe *Slag* Nikel PT Vale Indonesia)"**.

## 1.2 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder yang diperoleh dari PT Vale Indonesia, yaitu data kadar unsur Fe dalam *slag* nikel periode 3 Mei 2023 – 11 Juli 2023.
2. Data yang digunakan dalam penelitian ini berdistribusi normal.
3. Nilai rata-rata target kadar Fe ( $\mu_0$ ) yang diharapkan adalah sebesar 20.
4. Penelitian ini menggunakan nilai parameter  $k = 0,5$  dan  $h = 5$ .

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Membandingkan kinerja peta kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum*, peta kendali *Exponentially Weighted Moving Average* dan peta kendali *Cumulative Sum* dengan menggunakan nilai *Average Run Length*.
2. Menerapkan peta kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum*, *Exponentially Weighted Moving Average* dan *Cumulative Sum* pada data kadar Fe dalam *slag* nikel.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi mahasiswa, penelitian ini dapat memperluas pemahaman teoritis dan praktis mengenai metode statistik yang dapat digunakan dalam pengendalian kualitas dengan menggunakan peta kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average – Cumulative Sum*, *Exponentially Weighted Moving Average* dan *Cumulative Sum*.
2. Bagi PT Vale Indonesia, sebagai bahan pertimbangan kepada pihak Perusahaan dalam menentukan strategi pengendalian kualitas.

## 1.5 Teori

### 1.5.1 Kualitas

Kualitas produk yang dihasilkan perusahaan baik berupa barang ataupun jasa merupakan faktor yang menentukan kualitas perusahaan tersebut baik atau buruk dimata konsumen. Menjaga kualitas barang yang dihasilkan merupakan cara untuk menjaga nama baik perusahaan. Definisi kualitas adalah sesuatu yang berbeda dan tergantung pada waktu dan tempat, atau sesuai dengan tujuan (Elliot, 1993). Terdapat dua aspek secara umum dari kesesuaian dalam penggunaan, yaitu kualitas

desain dan kualitas kesesuaian. Aspek tersebut memiliki hubungan erat dengan variabilitas, terutama pada aspek kualitas desain. Kualitas desain merupakan bentuk variabilitas yang disengaja, sedangkan kualitas kesesuaian adalah faktor – faktor yang mendukung kualitas desain tersebut. Kualitas kesesuaian dipengaruhi oleh sejumlah faktor, yaitu *manufacturing process*, pelatihan dan pengawasan tenaga kerja, jenis pemilihan pengendalian proses, pengujian, dan motivasi tenaga kerja (Montgomery, 2012).

Kualitas dan variabilitas merupakan suatu hal yang berbanding terbalik. Jika variabilitas dari karakteristik utama suatu produk menurun, maka kualitas produk akan meningkat. Secara umum dimensi kualitas memiliki delapan dimensi kualitas yang digunakan untuk menganalisis karakteristik suatu barang. Delapan dimensi kualitas yang biasa digunakan tersebut adalah *performance* (performa), *reliability* (keandalan), *durability* (daya tahan), *serviceability* (kemampuan pelayanan), *aesthetics* (estetika), *features* (keistimewaan), *perceived quality* (kualitas rasa yang dipersepsikan), dan *conformance to standards* (kesesuaian terhadap spesifikasi). Berdasarkan kedelapan dimensi tersebut dapat dilihat bahwa kualitas merupakan suatu perwujudan yang beragam (Montgomery, 2012).

### 1.5.2 Pengendalian Kualitas Statistik

Pengendalian kualitas statistik merupakan teknik penyelesaian masalah yang digunakan untuk memonitor, mengendalikan, menganalisis, mengelola dan memperbaiki produk dan proses menggunakan metode-metode statistik. Konsep terpenting dalam pengendalian kualitas statistik adalah variabilitas, dimana semua prosedur pengendalian kualitas statistik membuat keputusan berdasar sampel yang diambil dari populasi yang lebih besar. Variabilitas yang dimaksud adalah variabilitas antar sampel (misalnya rata-rata atau nilai tengah) dan variabilitas dalam sampel misalnya range atau standar deviasi (Montgomery, 2012).

Pada dasarnya pengendalian kualitas statistik merupakan teknik penyelesaian masalah yang digunakan untuk memonitor, mengendalikan, menganalisis, mengelola, dan memperbaiki produk dan proses menggunakan metode-metode statistik. Tujuan utama pengendalian kualitas statistik adalah pengurangan variabilitas secara sistemik dalam karakteristik kunci produk itu (Montgomery, 2012). Pengendalian kualitas statistik adalah salah satu perkembangan teknologi terbaik dalam abad ke-20 karena didasari oleh prinsip-prinsip mendasar, mudah dipakai, mempunyai dampak yang signifikan, dan bisa diterapkan dalam berbagai macam proses. 7 alat pengendalian kualitas paling umum yang biasa disebut *The Magnificent Seven*, antara lain (Montgomery, 2012):

1. Histogram
2. *Check Sheet*
3. Diagram Pareto
4. Diagram sebab-akibat
5. Diagram pemusatan kecacatan
6. Diagram Scatter

## 7. Peta kendali

Dari 7 alat pengendalian kualitas tersebut, peta kendali lebih sering digunakan. Oleh karena itu, berbagai pengembangan peta kendali telah dilakukan, sehingga muncul beberapa peta kendali yang dapat digunakan pada kondisi-kondisi tertentu.

### 1.5.3 Peta Kendali

Peta kendali adalah salah satu alat pengendalian kualitas yang paling umum dipakai. Peta kendali digunakan untuk memonitor apakah suatu proses dalam keadaan terkendali atau tidak, sehingga dapat dilakukan pemecahan masalah atau langkah-langkah untuk perbaikan kualitas. Beberapa macam peta kendali dapat diterapkan pada proses produksi dan pennggunaannya dapat disesuaikan dengan proses yang diamati dan data yang akan diolah. Masing-masing peta kendali memiliki sensitifitas yang berbeda.

Peta kendali yang dapat mendeteksi data *out of control* lebih banyak atau lebih cepat merupakan peta kendali yang sensitif (Assauri, 1998). Peta kendali secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu (Montgomery, 2012):

#### 1. Peta kendali atribut

Peta kendali atribut atau peta kendali sifat adalah peta kendali untuk karakteristik kualitas hasil produksi yang dikelompokkan ke dalam hasil produk yang rusak atau tidak rusak, baik atau jelek, dan sesuai atau tidak sesuai. Contoh peta kendali atribut yang sering digunakan adalah peta kendali  $p$ ,  $np$ ,  $c$ ,  $u$ .

#### 2. Peta kendali variabel

Peta kendali variabel adalah peta kendali untuk karakteristik kualitas hasil produksi yang dapat diukur dan dinyatakan dalam angka. Data yang dibutuhkan untuk penerapan peta kendali ini adalah seperti berat, ketebalan, panjang volume, diameter. Beberapa peta kendali variabel adalah peta kendali  $\bar{X}$  dan R dan peta kendali  $\bar{X}$  dan S.

### 1.5.4 Uji Normalitas

Uji normalitas adalah pengujian dengan mengasumsikan data berdistribusi normal. Uji normalitas dapat menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov*, dengan hipotesis sebagai berikut (Smirnov, 1939):

$H_0$ : Data berdistribusi normal

$H_1$ : Data tidak berdistribusi normal

Taraf signifikansi:  $\alpha$

Statistik Uji:

$$D = \max |S_n(x) - F_0(x)| \quad (1)$$

dengan

$S_n(x)$ : probabilitas distribusi kumulatif dari data sampel

$F_0(x)$ : probabilitas distribusi kumulatif yang dihipotesiskan berdistribusi normal

Kriteria Uji:

$H_0$  ditolak jika  $D > D_{\alpha;n}$  atau  $p - value < \alpha$

### 1.5.5 Peta Kendali *Exponentially Weighted Moving-Average*

Peta kendali *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) pertama kali diperkenalkan oleh Roberts pada tahun 1959 dan digunakan untuk mendeteksi pergeseran proses yang kecil secara efektif. Peta kendali ini digunakan untuk memonitor data variabel atau data atribut (Montgomery, 2012), berikut adalah rumus untuk titik plot peta kendali EWMA:

$$Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda)Z_{i-1} \quad (2)$$

$Z_i$  merupakan nilai EWMA dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  dengan  $m$  merupakan banyaknya subgrup,  $\lambda$  adalah faktor bobot dari EWMA dengan nilai  $0 < \lambda \leq 1$ . Jika besar sampel adalah  $n > 1$ , maka nilai  $X_i$  diganti dengan rata-rata subgrup yang dinotasikan dengan  $\bar{X}_i$  (Montgomery, 2012).

$$Z_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad (3)$$

$n$  merupakan besar sampel dalam satu kali pengamatan dengan  $j = 1, 2, 3, \dots, n$  dan  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ,

Jika disubsitusikan ke Persamaan (2), maka plot EWMA menjadi:

$$Z_i = \lambda \bar{X}_i + (1 - \lambda)Z_{i-1} \quad (4)$$

$Z_0$  adalah nilai awal EWMA yang dapat diperoleh dan rata-rata proses yang diamati

$$Z_0 = \mu_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{x}_i}{m} \quad (5)$$

Peta kendali EWMA memiliki batas kontrol dan garis tengah sebagai berikut:

$$BKA_i = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda} (1 - (1 - \lambda)^{2i})} \quad (6)$$

$$GT = \mu_0 \quad (7)$$

$$BKB_i = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda} (1 - (1 - \lambda)^{2i})} \quad (8)$$

dengan  $L$  merupakan lebar batas kendali yang nilainya mengacu pada Lucas & Saccucci (1990) dan  $\sigma$  adalah simpangan baku suatu proses. BKA merupakan batas kendali atas peta kendali dan BKB adalah batas kendali bawah peta kendali. Jika nilai EWMA berada di atas BKA atau berada di bawah BKB maka dapat dikatakan nilai tersebut *out of control*.

### 1.5.6 Peta Kendali *Cumulative Sum*

Peta kendali *Cumulative Sum* (CUSUM) pertama kali ditemukan oleh Page pada tahun 1954. Yang membedakan peta kendali CUSUM dengan peta kendali  $\bar{X} - S$  dan  $\bar{X} - R$  adalah peta kendali ini menghimpun titik-titik sebelumnya untuk dijadikan titik

pengamatan. Misalkan sampel berukuran  $n > 1$  maka  $\bar{X}_i$  merupakan rata-rata dari subgroup ke- $i$ . Nilai CUSUM didefinisikan sebagai berikut (Montgomery, 2012):

$$C_i = \sum_{i=1}^m (\bar{X}_i - \mu_0) \quad (9)$$

dengan  $\bar{X}_i$  didefinisikan oleh  $\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n}$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, n$  dan  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ . Nilai  $\mu_0$  diperoleh dari  $\hat{\mu}_0 = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{m}$ . Peta kendali CUSUM dapat dikerjakan menggunakan dua cara, yaitu dengan menggunakan tabular CUSUM atau *V-mask* CUSUM. Namun dari kedua cara tersebut tabular CUSUM lebih disarankan (Montgomery, 2012). Selanjutnya adalah mendefinisikan nilai statistik  $C_i^+$  dan  $C_i^-$  dari CUSUM sebagai berikut:

$$C_i^+ = \max [0, (X_i - \mu_0) - K + C_{i-1}^+] \quad (10)$$

$$C_i^- = \max [0, -(X_i - \mu_0) - K + C_{i-1}^-] \quad (11)$$

dengan

$$C_0^+ = C_0^- = 0$$

$C_i^+$  = sisi atas plot data ke- $i$

$C_i^-$  = sisi bawah plot data- $i$

$\mu_0$  = nilai rata-rata proses.

$K$  = *reference value*

Dalam hal ini nilai  $K$  adalah nilai referensi yang umumnya diperoleh dari rumus berikut:

$$K = k\sigma \quad (12)$$

Batas kendali CUSUM dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$BKA = H = h\sigma \quad (13)$$

$$BKB = -H = -h\sigma \quad (14)$$

dengan  $\sigma$  adalah standar deviasi sampel,  $h$  dan  $k$  merupakan parameter. Untuk mendapatkan plot dari CUSUM dan batas kendali CUSUM dibutuhkan nilai parameter  $k$  dan  $h$ . Nilai parameter  $k$  dan  $h$  direkomendasikan bernilai 0,5 dan 5 karena dapat membuat peta kendali CUSUM bekerja baik (Montgomery, 2012). Jika nilai  $C_i^+$  berada di atas batas kendali atau nilai  $C_i^-$  berada dibawah batas kendali, maka proses tersebut dikatakan *out of control*.

Jika  $n > 1$  maka nilai CUSUM yang didapatkan pada Persamaan (10) dan (11) dapat diubah menjadi:

$$C_i^+ = \max [0, (\bar{X}_i - \hat{\mu}_0) - K + C_{i-1}^+] \quad (15)$$

$$C_i^- = \max [0, -(\bar{X}_i - \hat{\mu}_0) - K + C_{i-1}^-] \quad (16)$$

### 1.5.7 Peta Kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average-Cumulative Sum*

Peta kendali *Mixed Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) dan *Cumulative Sum* (CUSUM) atau bisa disingkat menjadi peta kendali MEC adalah kombinasi dari peta kendali EWMA dengan struktur peta kendali CUSUM. Peta kendali CUSUM digunakan sebagai alternatif terhadap peta kendali *Shewart* untuk memonitor rata-rata proses. Peta kendali ini menghitung deviasi kumulatif dari nilai sampel terhadap nilai target. Sedangkan peta kendali EWMA sangat efektif dalam menyelidiki pergeseran yang kecil. Abbas (2013) merekomendasikan peta kendali *Mixed* EWMA-CUSUM yang merupakan peta kendali yang menggabungkan peta kendali pengendali EWMA dan grafik pengendali CUSUM untuk mendeteksi pergeseran rata-rata yang kecil. Nilai MEC diperoleh dari  $M_i^+$  dan  $M_i^-$  dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  ( $m$  merupakan banyaknya subgroup) dari peta kendali CUSUM yang nilai awalnya ditetapkan adalah nol ( $M_0^+ = M_0^- = 0$ ) dan nilai lainnya bergantung pada nilai  $Z_i$  dari peta kendali EWMA pada Persamaan (2), nilai MEC didefinisikan sebagai berikut (Abbas et al., 2013):

$$M_i^+ = \max [0, (Z_i - \mu_0) - K_z + M_{i-1}^+] \quad (17)$$

$$M_i^- = \max [0, -(Z_i - \mu_0) - K_z + M_{i-1}^-] \quad (18)$$

dimana nilai  $K_z$  dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$K_z = k^* \sqrt{\text{var}(Z_i)} \quad (19)$$

$$K_z = k^* \sigma_x \sqrt{\frac{\lambda_q}{2 - \lambda_q} (1 - (1 - \lambda_q)^{2i})} \quad (20)$$

dengan  $k^*$  seperti parameter  $k$  pada peta kendali CUSUM. Abbas (2013) merekomendasikan  $k^* = 0,5$  karena nilai tersebut akan menyebabkan struktur CUSUM lebih sensitif terhadap pergeseran yang kecil. Parameter  $\lambda_q$  merupakan pembobot  $\lambda$  terpilih dari EWMA  $0 < \lambda_q < 1$  dan nilai awal dari  $Z_i$  ditetapkan sama dengan mean  $Z_0 = \mu_0$ .

Parameter populasi  $\mu_0$  dan  $\sigma_x$  bisa diestimasi dari sampel awal. Statistik  $M_i^+$  dan  $M_i^-$  diplotkan terhadap batas kontrol. Proses dikatakan terkendali jika nilai-nilai  $M_i^+$  dan  $M_i^-$  berada di dalam batas kontrol dan proses tidak terkendali jika nilai-nilai  $M_i^+$  dan  $M_i^-$  berada di luar batas kontrol. Nilai batas kendali peta kendali MEC didefinisikan oleh Persamaan berikut:

$$BKA_i = h^* \sqrt{\text{var}(Z_i)} \quad (21)$$

$$BKA_i = h^* \sigma_x \sqrt{\frac{\lambda_q}{2 - \lambda_q} (1 - (1 - \lambda_q)^{2i})} \quad (22)$$

$$BKB_i = -h^* \sqrt{\text{var}(Z_i)} \quad (23)$$

$$BKB_i = -h^* \sigma_x \sqrt{\frac{\lambda_q}{2 - \lambda_q} (1 - (1 - \lambda_q)^{2i})} \quad (24)$$

dimana BKA adalah Batas Kendali Atas dan BKB adalah Batas Kendali Bawah dengan  $h^*$  setara dengan nilai parameter  $h$  pada peta kendali CUSUM. Untuk nilai  $h^*$  dapat dipilih dari nilai yang direkomendasikan oleh Abbas (2013). Statistik  $M_t^+$  dan  $M_t^-$  diplotkan terhadap BKA dan BKB.

### 1.5.8 Average Run Length

*Average Run Length* (ARL) adalah rata-rata jumlah titik pengukuran yang harus diplot sebelum suatu titik menandai terjadinya kondisi tidak terkendali (Montgomery, 2012). *Average Run Length* (ARL) merupakan salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengukur kinerja sebuah peta kendali. Kriteria yang digunakan untuk mengukur kinerja peta kendali ialah dengan mengukur seberapa cepat peta kendali tersebut mampu menangkap sinyal *out of control*. Peta kendali yang dapat mendeteksi sinyal *out of control* lebih cepat maka peta kendali tersebut disebut lebih sensitif terhadap perubahan proses.

Terdapat 2 jenis ARL, notasi  $ARL_0$  untuk keadaan *in control* dan  $ARL_1$  untuk keadaan *out of control* yang dinyatakan sebagai berikut:

$$ARL_0 = \frac{1}{P(\text{tolak } H_0 | H_0 \text{ benar})} = \frac{1}{\alpha} \quad (25)$$

$$ARL_1 = \frac{1}{P(\text{terima } H_0 | H_0 \text{ benar})} = \frac{1}{1 - \beta} \quad (26)$$

dengan

$\alpha$  : Error tipe I

$\beta$  : Error tipe II

Adapun  $\alpha$  dan  $\beta$  dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Kesalahan statistik tipe I atau  $\alpha$  (menolak  $H_0$  padahal hipotesis tersebut benar) yang berarti proses berada pada kondisi tidak terkendali padahal dalam kenyataannya proses berada dalam kondisi terkendali.
2. Kesalahan statistik tipe II atau  $\beta$  (menerima  $H_0$  padahal hipotesis tersebut salah) yang berarti proses berada pada kondisi terkendali padahal dalam kenyataannya proses berada dalam kondisi tidak terkendali.

$ARL_0$  merupakan nilai atau banyaknya titik sampel pada saat proses *in control* sedangkan  $ARL_1$  merupakan nilai atau titik sampel pada saat proses *out of control*. Nilai  $ARL_0$  yang diharapkan adalah sebesar mungkin untuk mengurangi kemungkinan peta kendali menunjukkan keadaan tidak terkendali. Untuk nilai  $ARL_1$  yang diharapkan adalah sekecil mungkin agar peta kendali dapat mendeteksi proses secepat mungkin.

Untuk mengevaluasi performa ARL untuk peta kendali, akan digunakan simulasi Monte Carlo. Berikut algoritma perhitungan nilai ARL:

1. Data dibangkitkan sebanyak  $m$  berdasarkan distribusi normal dengan parameter spesifik, yang diasumsikan dalam keadaan terkendali.
2. Menghitung parameter dan batas pengendali dari  $m$  data.
3. Menentukan data terkendali atau tidak berdasarkan kriteria peta kendali

4. Melakukan pergeseran batas kendali sebesar  $\delta$ . Menghitung sampel yang berada dalam keadaan terkendali, lalu nilai tersebut digunakan sebagai nilai *Run Length* untuk simulasi ke-*i*.
5. Melakukan langkah 1-4 untuk *N* simulasi.
6. Menghitung nilai rata-rata dari *Run Length*.

### 1.5.9 PT Vale Indonesia

PT Vale Indonesia Tbk merupakan anak perusahaan dari Vale, sebuah perusahaan pertambangan global yang berkantor pusat di Brasilia. PT Vale Indonesia mengoperasikan tambang nikel open pit dan pabrik peleburan nikel di Sorowako, Sulawesi Selatan, sejak tahun 1978. Saat ini, PT Vale Indonesia menjadi salah satu produsen nikel terbesar di Indonesia dan menyumbang sekitar 5% pasokan nikel dunia. Bijih yang ditambang di PT Vale Indonesia ini adalah bijih nikel laterit, kemudian diolah menjadi nikel *matte*. Proses produksi nikel tentunya membutuhkan tingkat ketelitian yang tinggi, analisis yang mendalam guna menghindari terjadinya penurunan kualitas dan memastikan setiap produk memenuhi standar kualitas yang telah ditentukan (Tanjung et al., 2022)

Pada proses produksi nikel ada beberapa tahapan yang perlu dilakukan, secara umum proses pengolahan bijih nikel laterit pada PT Vale Indonesia meliputi proses pengeringan (*drying*), kalsinasi, peleburan (*smelting*), dan *converting*. Dari hasil peleburan akan terbentuk nikel dalam *matte* dan terak (*slag*). *Slag* adalah salah satu limbah (*tailing*) yang dihasilkan dari pengolahan nikel. Dalam bidang industri pertambangan, limbah (*tailing*) sering dianggap tidak bermanfaat dan merupakan limbah yang berbahaya, namun faktanya *tailing* memiliki banyak manfaat apabila dilakukan pengolahan yang sesuai. Dalam pengolahannya nikel menghasilkan *tailing* padat (*slag*) dan *tailing* cair (*slurry*). *Slag* nikel cukup banyak dimanfaatkan, karena *slag* nikel secara kimiawi mengandung logam-logam berharga seperti nikel, besi, tembaga dan kobalt (Tanjung et al., 2022).

### 1.5.10 Proses Terjadinya *Slag* Nikel

Proses pengolahan nikel dari biji laterit menggunakan salah satu dari metode proses metalurgi : (a). *Hydroetalurgy*, (b). *Vapormetallurgy* dan (c). *Pyrometallurgy*. Terak nikel merupakan *by product* dari hasil pengolahan tambang nikel yang didapatkan dari hasil proses pengolahan nikel sebagai berikut (Permatasari, 2021):

1. Proses Penambangan  
Proses ini mencakup proses eksplorasi dan pengumpulan bahan baku biji laterit dari lokasi penambangan. Kemudian material dikirimkan ke tempat persediaan biji laterit basah setelah sebelumnya disaring dengan saringan ukuran tertentu.
2. Proses Pengeringan dan Pengayakan  
Pada tahap ini kedua proses ini bertujuan untuk mengurangi kadar air dalam biji laterit dan menyediakan bahan yang mempunyai ukuran tertentu dan seragam sehingga memudahkan dalam proses selanjutnya.

3. Proses Reduksi dan Sulfidasi

Tahap reduksi dilakukan dalam tanur putar reduksi (*reduction rotary kiln*) yang merupakan prasyarat untuk proses peleburan didalam tungku listrik.

4. Proses Peleburan

Tahap peleburan merupakan proses lanjutan dari biji nikel yang sudah direduksi di dalam tanur reduksi. Selanjutnya calcine dimasukkan dalam tungku listrik dan dipanaskan sampai melebur. Pada tahap ini *slag* nikel dihasilkan yang kemudian ditampung dan dibuang ke tempat penampungan *slag*.

5. Proses Pemurnian di Konverter

Pada tahap pemurnian, dihasilkan pula *slag* yang terdiri dari dua jenis:

- a. *Slag* dengan kadar nikel  $< 2\%$  disebut *low* nikel *slag* yang tidak diproses lagi atau dibuang.
- b. *Slag* dengan kadar nikel  $> 2\%$  disebut *high* nikel *slag* akan di daur ulang lagi dalam proses pemurnian *converter*.

## BAB II METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Sumber Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari PT Vale Indonesia. Data inspeksi yang digunakan yaitu kadar unsur Fe dalam *slag* nikel dengan total sebanyak 120 sampel. Sampel tersebut dibagi menjadi dua fase, dimana fase 1 menggunakan 96 sampel dan fase 2 menggunakan 24 sampel.

### 2.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah data kadar unsur Fe yang terkandung dalam *slag* nikel, dengan pengambilan sampel dilakukan setiap hari. Pengambilan sampel dilakukan dalam 3 *shift* yang terdiri dari shift A (22.00 – 06.00), shift B (06.00 – 14.00), dan shift C (14.00 – 22.00). Periode data yang digunakan yaitu 3 Mei 2023 – 11 Juni 2023. Data kadar Fe dalam *slag* nikel dapat dilihat pada Lampiran 1.

### 2.3 Metode Analisis

Langkah-langkah analisis ini akan digunakan untuk mencapai tujuan penelitian. Adapun langkah-langkah analisis tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menghitung nilai ARL untuk mengevaluasi sensitivitas peta kendali EWMA, CUSUM dan MEC dengan menggunakan data simulasi.
2. Membandingkan kinerja peta kendali menggunakan *Average Run Length* (ARL) dengan melihat ARL terkecil dari ketiga grafik (EWMA, CUSUM dan MEC).
3. Menguji kenormalan data dengan menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov*.
4. Menerapkan peta kendali EWMA dalam pengendalian kualitas, dengan langkah-langkah sebagai berikut:
  - i. Menentukan parameter pembobot  $\lambda$  bernilai  $0 < \lambda \leq 1$  dan nilai L yang bersesuaian.
  - ii. Menentukan estimasi nilai standar deviasi ( $\hat{\sigma}$ ) dari sampel.
  - iii. Menghitung nilai  $Z_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 120$ ) dengan menggunakan Persamaan (2).
  - iv. Menghitung Batas Kendali Atas (BKA) dengan menggunakan Persamaan (6).
  - v. Menghitung Batas Kendali Atas (BKB) dengan menggunakan Persamaan (8).
  - vi. Menginterpretasikan peta kendali EWMA.
5. Menerapkan peta kendali CUSUM dalam pengendalian kualitas, dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- i. Menetapkan parameter  $k$  dengan nilai 0,5 dan nilai  $h$  sebesar 5.
  - ii. Menentukan estimasi nilai dan standar deviasi ( $\hat{\sigma}$ ) dari sampel.
  - iii. Menghitung nilai referensi  $K$  dengan menggunakan Persamaan (12).
  - iv. Menghitung nilai statistik  $C_i^+$  dan  $C_i^-$  ( $i = 1,2,3, \dots, 120$ ) dengan menggunakan Persamaan (10) dan (11).
  - v. Menghitung Batas Kendali Atas ( $BKA$ ) dengan menggunakan Persamaan (13).
  - vi. Menghitung Batas Kendali Bawah ( $BKB$ ) dengan menggunakan Persamaan (14).
  - vii. Menginterpretasikan peta kendali CUSUM.
6. Menerapkan peta kendali MEC dalam pengendalian kualitas, dengan langkah-langkah sebagai berikut:
- i. Menentukan parameter pembobot  $\lambda$  bernilai  $0 < \lambda \leq 1$ .
  - ii. Menetapkan parameter  $k^*$  dengan nilai 0,5.
  - iii. Menentukan estimasi nilai standar deviasi ( $\hat{\sigma}$ ) dari sampel.
  - iv. Menghitung nilai  $Z_i$  ( $i = 1,2,3, \dots, 120$ ) dengan menggunakan Persamaan (2).
  - v. Menghitung nilai referensi variansi waktu ( $K_z$ ) untuk peta kendali MEC dengan menggunakan Persamaan (20).
  - vi. Menghitung titik plot  $M_i^+$  dan  $M_i^-$  dengan menggunakan Persamaan (17) dan (18).
  - vii. Menghitung Batas Kendali Atas ( $BKA$ ) dengan menggunakan Persamaan (22).
  - viii. Menghitung Batas Kendali Bawah ( $BKB$ ) dengan menggunakan Persamaan (24).
  - ix. Menganalisis ada tidaknya pengamatan yang berada di luar batas kendali.
  - x. Menginterpretasikan peta kendali MEC.