

ANALISIS EFEKTIVITAS MESIN PRODUKSI GULA UNTUK MINIMALISASI PEMBOROSAN PADA PABRIK GULA PANDJIE SITUBONDO

Yuli Wibowo¹, Siswoyo Soekarno², Siti Hasana¹

^{1,3)} Prodi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember

²⁾ Prodi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember

Email : yuliwibowo.ftp@unej.ac.id

Abstrak, Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas mesin produksi gula dalam rangka meminimalkan pemborosan (*losses*) yang terjadi pada Pabrik Gula Pandjie Situbondo. Analisis efektivitas mencakup perhitungan pemborosan (*losses*), dan memberikan rekomendasi perbaikan untuk mengurangi penyebab *losses* di Pabrik Gula Pandjie Situbondo. Pengukuran efektivitas mesin menggunakan metode *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), perhitungan nilai *losses* menggunakan pendekatan *six big losses*, dan analisis penyebab *losses* dan rekomendasinya menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata nilai OEE pada stasiun gilingan, stasiun pemurnian, stasiun penguapan, stasiun pemasakan, dan stasiun puteran berada pada rentang 60%-84% yang artinya produksi dianggap wajar tetapi menunjukkan ada ruang besar untuk *improvement*. Hasil analisis *six big losses* pada setiap stasiun menunjukkan bahwa faktor *losses* yang paling berpengaruh adalah *reduced speed losses*.

Kata kunci: Fault Tree Analysis, Industri Gula, Kinerja Mesin, Overall Equipment Effectiveness, Six Big Losses

PENDAHULUAN

Gula merupakan komoditas strategis di sektor pertanian dan perkebunan Indonesia yang berperan penting bagi perekonomian nasional (Kusuma et al., 2024). Gula merupakan karbohidrat sederhana sebagai bahan pangan sumber kalori, yang menempati urutan keempat setelah padi-padian, pangan hewani, serta minyak dan lemak (Scapin et al., 2017). Gula secara alami terdapat dalam banyak makanan seperti buah, susu, sayur, dan biji-bijian (Ghanem et al., 2018).

Sebagai salah satu bahan pangan pokok, konsumsi gula selalu mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Permintaan gula akan terus meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk (Sulaiman et al., 2018). Konsumsi gula tebu Indonesia beberapa tahun terakhir menunjukkan perkembangan yang fluktuatif namun relatif menurun dengan rata-rata pertumbuhan per tahun menurun sebesar 3,15%. Konsumsi rumah tangga tebu (gula pasir) untuk tahun 2022 adalah 6,32 kg/kapita/tahun dan pada tahun 2023 konsumsi gula pasir menjadi 5,80 kg/kapita/tahun (Kementan, 2024).

Berdasarkan data ketersediaan gula dalam negeri, konsumsi gula di Indonesia yang cenderung meningkat dari tahun ke tahun tidak diimbangi dengan jumlah produksi gula dalam negeri hasil olahan tebu yang sempat menurun

dari 2015 ke 2018 dan meningkat dari 2018 ke 2020 (Shabia, 2021).

Data Kementerian Perindustrian RI menunjukkan bahwa pada tahun 2021 terdapat 62 pabrik gula berbasis tebu dengan kapasitas terpasang nasional mencapai 316.950 ton tebu per hari. Dengan kapasitas produksi gula tersebut, semestinya kebutuhan konsumsi gula di dalam negeri dapat terpenuhi, apabila seluruh pabrik gula tersebut berproduksi secara optimal dan efisien. Namun, kebutuhan konsumsi gula di Indonesia ternyata tidak terpenuhi seluruhnya. Ada kesenjangan antara jumlah produksi dan kebutuhan konsumsi gula. Kesenjangan ini kemudian berusaha ditutupi oleh impor gula, baik impor gula mentah (*raw sugar*), gula kristal putih, ataupun gula rafinasi (Sinuraya et al., 2024).

Salah satu faktor yang mempengaruhi proses pabrikasi khususnya dalam produksi gula adalah mesin dan peralatan manufaktur (da Silva et al., 2008). Faktor keberhasilan dalam proses produksi adalah penggunaan mesin dan peralatan bantu yang sudah sesuai dengan standar dan siap untuk digunakan (Pratitis & Maryanty, 2024). Seiring dengan bertambahnya umur mesin maupun peningkatan aktivitas produksi yang dilakukan dapat membuat performa mesin semakin menurun. Kegagalan peralatan, pasokan bahan baku yang tidak tepat, dan pemasangan peralatan bantu yang tidak

tepat, merupakan beberapa faktor eksternal yang juga berpengaruh terhadap performa mesin (Tupan et al., 2018).

Proses produksi yang berlangsung pada industri manufaktur hampir semuanya menggunakan mesin dan peralatan. Semakin sering mesin atau peralatan tersebut beroperasi untuk memenuhi target produksi atau bahkan melebihi dari kapasitas produksi suatu perusahaan, menyebabkan penurunan kemampuan beroperasi suatu mesin dan menurunkan umur mesin yang menyebabkan terhambatnya proses produksi suatu produk, sehingga diperlukan perbaikan dan pergantian komponen yang rusak. Pada umumnya penyebab gangguan produksi dapat dikategorikan menjadi tiga, yaitu faktor manusia, mesin dan lingkungan. Faktor terpenting dari kondisi tersebut adalah *performance* mesin yang digunakan (Hapsari et al., 2012).

Pabrik Gula (PG) Pandjie Situbondo merupakan salah satu unit usaha yang berada dibawah naungan PTPN XI yang bergerak dalam bidang pengolahan tebu dengan hasil produk gula kristal putih. Dalam proses produksinya, PG Pandjie melibatkan peralatan yang besar dengan kapasitas produksi juga dalam jumlah yang besar. Pada proses produksi di PG Pandjie dibagi menjadi 5 stasiun kerja, yaitu stasiun gilingan, pemurnian, penguapan, masakan, dan puteran. Pada setiap stasiun tersebut melibatkan mesin dan peralatan yang besar untuk kegiatan produksinya dan beroperasi 24 jam selama masa giling berlangsung. Pengukuran kinerja terutama pada mesin-mesin produksi perlu dilakukan untuk mengetahui penyebab dari permasalahan yang terjadi, sehingga dapat dilakukan langkah perbaikan yang tepat agar produktivitas mesin menjadi meningkat dan optimal. Salah satu cara untuk menyelesaikan permasalahan pada saat proses produksi dan untuk meningkatkan produktivitas mesin produksi adalah dengan dilakukan evaluasi dan pemeliharaan secara intensif, sehingga proses produksi dapat berjalan secara optimal (Roysen et al., 2024).

Konsep *Total Productive Maintenance* (TPM) memberikan pengukuran kuantifikasi untuk menghitung kinerja dari peralatan atau mesin dalam hal efektivitas yaitu dengan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) (Ahuja & Khamba, 2008; Ljungberg, 1998; Wolska et al., 2023). OEE adalah metode untuk memantau

dan meningkatkan efisiensi proses manufaktur (Prakash et al., 2019; Sandy & Wathoni, 2022). OEE adalah pengukuran komprehensif yang secara teoritis menentukan tingkat produktivitas mesin berdasarkan kinerja mesin untuk mengetahui area *bottleneck* pada mesin dan menghilangkan aspek-aspek yang mempengaruhi efektivitas yang disebut dengan *six big losses* (Dewi et al., 2024; Dipa et al., 2022; Wibowo & Padilah, 2023). Tujuan dari penelitian ini adalah mengukur tingkat efektivitas mesin pada PG Pandjie, menganalisis *losses*, dan memberikan rekomendasi perbaikan untuk mengurangi penyebab *losses*.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pabrik Gula PTPN XI Nusantara Pandjie yang berlokasi di Jl. Raya Panji, Mimbaan Timur, Mimbaan, Kecamatan Situbondo, Kabupaten Situbondo, Jawa Timur.

Pengumpulan Data

Jenis data yang diperlukan dalam penelitian ini diperoleh dari data primer dan data sekunder. Data primer merupakan suatu data yang diperoleh dari pengamatan dan pengukuran secara langsung pada objek penelitian dan juga diperoleh berdasarkan hasil wawancara langsung di lapangan. Kriteria informan yang terkait adalah memiliki pengetahuan terkait objek penelitian. Informan adalah pihak-pihak yang berhubungan langsung dengan proses didalamnya, diantaranya direktur perusahaan, mandor produksi, dan bagian admin perusahaan. Data primer yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah informasi mengenai produk yang dihasilkan, tahapan produksi, kondisi lingkungan kerja, dan faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas.

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari sumber lain, yaitu perusahaan. Data yang diperlukan adalah data internal perusahaan, yang meliputi: data gambaran umum perusahaan, data proses produksi perusahaan, data *downtime* mesin, data jumlah produksi gula kristal putih, dan data waktu kerja mesin produksi.

Perhitungan Efektivitas Mesin

Perhitungan efektivitas dilakukan menggunakan metode OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) untuk mengetahui tingkat

efektivitas mesin produksi gula selama proses produksi berlangsung. Langkah-langkah dalam perhitungan nilai OEE adalah dengan menentukan nilai *availability rate*, *performance rate*, dan *quality rate* (Kirana & Widiasih, 2024). Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai OEE yang didapatkan dari hari nilai ketiga faktor tersebut.

Availability Rate

Availability rate merupakan tingkat efektivitas beroperasinya suatu mesin atau peralatan yang diperoleh dari hasil perbandingan antara waktu operasi (*operation time*) dengan waktu persiapan (*loading time*). Perhitungan nilai *availability* dapat menggunakan rumus sebagai berikut (Raju et al., 2022):

$$\% \text{ Availability} = \frac{\text{operation time}}{\text{loading time}} \times 100\%$$

Operation time merupakan nilai yang dapat diperoleh dari hasil selisih *loading time* dengan downtime mesin. *Downtime* merupakan terbuangnya waktu akibat adanya gangguan pada mesin dan mengakibatkan tidak adanya *output* yang dihasilkan. *Loading time* merupakan waktu yang tersedia untuk melakukan produksi.

Performance Rate

Performance rate merupakan tolak ukur dari efisiensi suatu kinerja mesin dalam menjalankan proses produksi sehingga dapat menghasilkan suatu produk (Siboro & Liquidanu, 2024; Taufik et al., 2023). Perhitungan nilai *performance* dapat diperoleh dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Raju et al., 2022):

$$\% \text{ Performance} = \frac{\text{output} \times \text{ICT}}{\text{operating time}} \times 100\%$$

dimana,

ICT = *Ideal Cycle Time*/ waktu siklus ideal

Output = Jumlah produk yang dihasilkan

Quality Rate

Quality rate merupakan kemampuan dalam menghasilkan produk yang sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Perhitungan nilai *quality* dilakukan untuk mengetahui rasio antara produk yang sesuai dengan standar dengan spesifikasi kualitas yang telah ditetapkan terhadap jumlah produk yang diproses. Rumus yang dapat digunakan untuk perhitungan *quality rate* adalah sebagai berikut (Raju et al., 2022):

$$\% \text{ Quality} = \frac{\text{output} - \text{defect}}{\text{processed amount}} \times 100\%$$

dimana,

Output = Jumlah produk yang dihasilkan

Defect = Jumlah produk cacat

Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Overall Equipment Effectiveness (OEE) merupakan metode pengukuran efektivitas penggunaan peralatan. Metode ini dikenal sebagai penerapan program Total Productive Maintenance (TPM) (Sayuti et al., 2019). OEE merupakan metrik yang digunakan untuk mengukur efektivitas dan kinerja proses produksi atau setiap peralatan. Metrik ini memberikan wawasan tentang seberapa baik peralatan digunakan dan seberapa efisien peralatan tersebut beroperasi dalam memproduksi barang atau memberikan layanan (Zehra et al., 2024).

Nilai OEE diperoleh dari hasil perkalian tiga faktor pengukuran OEE, yaitu *avalability*, *perfomance*, dan *quality*. Hubungan antara ketiga faktor pengukuran tersebut dapat dilihat pada rumus sebagai berikut (Raju et al., 2022):

$$OEE = \% \text{Availability} \times \% \text{Performance} \times \% \text{Quality}$$

Ketiga komponen tersebut tidak sepenuhnya berjalan 100%, sehingga ditetapkan standar kinerja OEE minimum sebesar 85%, nilai *availability* 90%, nilai *performance* 95%, dan nilai *quality* 99,9% oleh *world class* (Nakajima, 1988). Penetapan standar nilai OEE berdasarkan *world class* tersebut dilakukan oleh JPIM (*Japan Institute of Plant Maintenance*). Berikut adalah standar nilai OEE yang telah ditetapkan oleh JPIM:

- Jika OEE = 100%, maka produksi dianggap sempurna. Sebuah perusahaan hanya memproduksi produk tanpa cacat, bekerja dalam *performance* yang cepat, dan tidak ada downtime.
- Jika OEE = 85% - 99%, maka produksi dianggap kelas dunia. Bagi banyak perusahaan, skor ini merupakan skor yang cocok untuk dijadikan goal jangka panjang.
- Jika OEE = 60% - 84%, maka produksi dianggap wajar, tetapi menunjukkan ada ruang besar untuk *improvement*.
- Jika OEE < 60%, maka produksi dianggap memiliki skor yang rendah, tetapi dalam kebanyakan kasus dapat dengan mudah di-*improve* melalui pengukuran langsung (misalnya dengan melakukan penelusuran alasan-alasan downtime dan menanganinya

sumber-sumber penyebab downtime secara satu per satu).

Perhitungan Losses

Perhitungan *six big losses* dilakukan untuk mengetahui besarnya nilai faktor kegagalan yang mempengaruhi efektivitas mesin peralatan dan berpengaruh penting terhadap tingkat keberhasilan proses produksi (Dewi et al., 2024).

Breakdown Losses, Setup and Adjustment, Idling and Minor Stoppages, Reduced Speed Losses, Reduced Yield, Defect in Process

Breakdown Losses merupakan kerugian yang disebabkan karena adanya kerusakan mesin dan peralatan sehingga diperlukan perbaikan. Kerugian tersebut dapat diketahui dengan melakukan pengukuran terhadap lamanya waktu kerusakan hingga perbaikan selesai. Perhitungan dapat dilakukan dengan rumus (Nazar et al., 2023):

$$\text{Breakdown losses} = \frac{\text{downtime}}{\text{loading time}} \times 100\%$$

Setup and Adjustment

Setup and adjustment merupakan waktu yang terambil untuk melakukan penyetelan, pemasangan, dan penyesuaian parameter untuk mendapatkan spesifikasi yang sesuai dengan ketentuan awal. Kerugian karena *setup and adjustment* adalah saat semua waktu *setup* termasuk waktu penyesuaian dan juga waktu yang dibutuhkan untuk mengganti suatu jenis produk. Perhitungan dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut (Nazar et al., 2023):

$$\text{Setup and} = \frac{\text{setup time}}{\text{loading time}} \times 100\%$$

Idling and Minor Stoppages

Idling and minor stoppages merupakan kerugian yang disebabkan oleh berhentinya peralatan karena adanya permasalahan sementara dikarenakan material yang datang terlambat ke stasiun kerja atau karena tidak adanya operator. Perhitungan dapat dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut (Nazar et al., 2023):

$$\text{Idling \& minor} = \frac{\text{non productive time}}{\text{loading time}} \times 100\%$$

Reduced Speed Losses

Reduced speed losses merupakan kerugian yang disebabkan karena adanya mesin

dan peralatan yang dioperasikan tidak sesuai dengan standar yang sudah ditetapkan. Pengukuran pada kerugian ini dilakukan dengan membandingkan kapasitas ideal dengan beban kerja aktual menggunakan rumus sebagai berikut (Nazar et al., 2023):

$$\text{Reduced} = \frac{\text{operation time} - (\text{ICT} \times \text{output})}{\text{loading time}} \times 100\%$$

dimana,

ICT = *Ideal Cycle Time*/ waktu siklus ideal

Reduced Yield

Reduced yield merupakan kerugian waktu dan material yang terjadi selama proses produksi untuk menghasilkan produk baru dengan kualitas produk sesuai dengan yang diharapkan. Besarnya presentase efektivitas mesin yang terjadi akibat kerugian ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Nazar et al., 2023):

$$\text{Reduced yield} = \frac{\text{ICT} \times \text{scrap}}{\text{loading time}} \times 100\%$$

dimana,

ICT = *Ideal Cycle Time*/ waktu siklus ideal

Defect in Process

Defect in process merupakan kerugian yang disebabkan oleh fungsi dari mesin produksi sehingga menyebabkan kecacatan material, turunnya jumlah produksi, dan meningkatnya biaya untuk pengerjaan ulang (Psarommatis et al., 2024). Perhitungan kerugian tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Dipa et al., 2022):

$$\text{Defect} = \frac{(\text{defect} + \text{scrap}) \times \text{ICT}}{\text{loading time}} \times 100\%$$

dimana,

ICT = *Ideal Cycle Time*/ waktu siklus ideal

Rekomendasi Perbaikan

Hasil dari analisis yang dilakukan pada perhitungan *six big losses*, selanjutnya dilakukan pembuatan *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk mengetahui penyebab terjadinya *losses* tersebut. *Fault Tree Analysis* (FTA) dapat dideskripsikan sebagai analisis teknis analitis, menganalisis lingkungan dan operasi untuk menemukan jalan atau solusi dari masalah-masalah yang muncul yang merupakan model grafik dari variasi paralel dan kombinasi kesalahan yang muncul sebagai hasil dari pendefinisian masalah yang ada (Suliantoro et

al., 2017). Dalam pembuatan FTA terdapat dua gerbang, yaitu gerbang "AND" dan gerbang "OR". Gerbang OR digunakan untuk menunjukkan bahwa *event output* akan muncul jika salah satu atau lebih *event input* muncul. Gerbang AND digunakan untuk menunjukkan bahwa *output* akan muncul jika semua *input* terjadi. Pembuatan FTA dapat dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut (Pan et al., 2022):

1. Menetapkan kejadian puncak (*top event*) yang telah ditentukan sebelumnya.
2. Menentukan *intermediate event* tingkat pertama terhadap kejadian puncak.
3. Menentukan hubungan *intermediate event* tingkat pertama terhadap *top event* dengan menggunakan gerbang logika "OR" atau "AND".
4. Menentukan *intermediate event* tingkat/ level kedua.
5. Menentukan hubungan *intermediate event* tingkat pertama dengan menggunakan gerbang logika "OR" atau "AND".
6. Melanjutkan langkah diatas sampai ke *basic event*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Data Hasil Produksi

Data yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Pada data

sekunder diperoleh dari perusahaan sebagai objek penelitian. Pengumpulan data sekunder dilakukan melalui pengambilan data yang dimiliki perusahaan mengenai data produksi gula kristal putih selama 5 (lima) periode tahun pengukuran. Berikut merupakan hasil pengumpulan data produksi yang terdiri dari data hasil produksi, data downtime mesin, dan data waktu kerja proses produksi.

Pada data hasil produksi terdiri dari data jumlah produk yang dihasilkan (*processed amount*) dan data jumlah produk cacat (*defect amount*). Jumlah produk cacat yang terjadi pada Pabrik Gula Pandjie disebabkan karena hasil produk gula yang tidak sesuai dengan parameter ICUMSA yang telah ditetapkan. Data waktu kerja proses produksi gula kristal putih merupakan data waktu produksi pada setiap stasiun kerja. Waktu proses produksi berlangsung selama 24 jam pada masa giling. Data *downtime* mesin merupakan waktu dimana mesin berhenti produksi karena permasalahan yang tidak terduga. Pada Pabrik Gula Pandjie, data downtime dapat terdiri dari perbaikan mesin, keterlambatan bahan baku, dan gangguan lain saat proses produksi berlangsung. Data *non productive time* merupakan data *downtime* akibat keterlambatan bahan baku pada Pabrik Gula Pandjie. Pada Tabel 1 disajikan data hasil produksi dan waktu kerja proses produksi. Pada Tabel 2 disajikan data *downtime* mesin setiap stasiun.

Tabel 1. Data hasil produksi dan waktu kerja proses produksi

Tahun	Scheduled Time (menit)	Planned Shutdown (menit)	Loading Time (menit)	Processed Amount (kuintal)	Defect Amount (kuintal)
2017	223.200,00	4.320,00	218.880,00	193.089,50	3.675,62
2018	236.160,00	4.320,00	231.840,00	196.984,00	1.006,94
2019	167.040,00	4.320,00	162.720,00	148.268,00	0,00
2020	148.320,00	4.320,00	144.000,00	122.762,00	0,00
2021	152.640,00	4.320,00	148.320,00	99.259,00	2.645,00

Sumber: PG Pandjie

Tabel 2. Data *downtime* mesin setiap stasiun

Tahun	St. Gilingan (menit)	St. Pemurnian (menit)	St. Penguapan (menit)	St. Masakan (menit)	St. Puteran (menit)	Non Productive Time (menit)
2017	967,20	1.550,40	469,20	25,20	0,00	109,80
2018	3.553,20	916,80	6.285,00	271,20	37,80	76,20
2019	3.949,80	96,00	234,00	40,20	0,00	214,80
2020	1.045,80	54,00	0,00	217,20	0,00	390,00
2021	1.281,00	0,00	1.096,80	0,00	0,00	2.172,00

Sumber: PG Pandjie

Hasil Analisis Perhitungan Efektivitas

Analisis perhitungan efektivitas dilakukan menggunakan metode OEE yang bertujuan untuk mengetahui area yang perlu ditingkatkan produktivitas ataupun efisiensi mesin dan peralatan. Nilai OEE diperoleh dari

hasil perkalian ketiga faktor yang mempengaruhi pengukuran OEE. Berikut merupakan hasil perhitungan nilai OEE pada stasiun gilingan, stasiun pemurnian, stasiun penguapan, stasiun masakan, dan stasiun puteran.

Tabel 3. Hasil Perhitungan OEE pada St. Gilingan

Tahun	Availability Rate (%)	Performance Rate (%)	Quality Rate (%)	OEE (%)
2017	99,56%	79,75%	100,00%	79,40%
2018	98,47%	77,66%	100,00%	76,47%
2019	97,57%	84,05%	100,00%	82,01%
2020	99,27%	77,29%	100,00%	76,73%
2021	99,14%	60,75%	100,00%	60,23%
Rata-rata				74,97%

Tabel 4. Hasil Perhitungan OEE pada St. Pemurnian

Tahun	Availability Rate (%)	Performance Rate (%)	Quality Rate (%)	OEE (%)
2017	99,29%	79,96%	98,10%	77,88%
2018	99,60%	76,77%	99,49%	76,08%
2019	99,94%	82,06%	100,00%	82,01%
2020	99,96%	76,76%	100,00%	76,73%
2021	100,00%	60,23%	97,34%	58,63%
Rata-rata				74,26%

Tabel 5. Hasil Perhitungan OEE pada St. Penguapan

Tahun	Availability Rate (%)	Performance Rate (%)	Quality Rate (%)	OEE (%)
2017	99,79%	79,57%	100,00%	79,40%
2018	97,29%	78,60%	100,00%	76,47%
2019	99,86%	82,12%	100,00%	82,01%
2020	100,00%	76,73%	100,00%	76,73%
2021	99,26%	60,68%	100,00%	60,23%
Rata-rata				74,97%

Tabel 6. Hasil Perhitungan OEE pada St. Masakan

Tahun	Availability Rate (%)	Performance Rate (%)	Quality Rate (%)	OEE (%)
2017	99,99%	79,40%	100,00%	79,40%
2018	99,88%	76,56%	100,00%	76,47%
2019	99,98%	82,03%	100,00%	82,01%
2020	99,85%	76,84%	100,00%	76,73%
2021	100,00%	60,23%	100,00%	60,23%
Rata-rata				74,97%

Tabel 7. Hasil Perhitungan OEE pada St. Puteran

Tahun	Availability Rate (%)	Performance Rate (%)	Quality Rate (%)	OEE (%)
2017	100,00%	79,40%	100,00%	79,40%
2018	99,98%	76,48%	100,00%	76,47%
2019	100,00%	82,01%	100,00%	82,01%
2020	100,00%	76,73%	100,00%	76,73%
2021	100,00%	60,23%	100,00%	60,23%
Rata-rata				74,97%

Hasil perhitungan nilai OEE pada setiap stasiun periode tahun 2017 hingga 2021, diperoleh rata-rata pada stasiun gilingan 74,97%, stasiun pemurnian 74,26%, stasiun

penguapan 74,97%, stasiun masakan 74,97%, dan stasiun puteran 74,97%. Berdasarkan standar *world class* oleh JPIM, nilai OEE yang harus dicapai minimal adalah 85% sehingga

kondisi tersebut bisa disebut ideal atau nilai variabel baik. Hasil perhitungan menunjukkan setiap stasiun belum mencapai batas presentase minimal tersebut. Hasil perhitungan rata-rata nilai OEE pada setiap stasiun berada pada rentang 60%-84%. Berdasarkan ketentuan yang ditetapkan *world class*, dimana nilai OEE pada rentang tersebut produksi disebut wajar dan dapat diterima dengan adanya perbaikan yang dilakukan untuk peningkatan kedepannya.

Analisis Perhitungan Losses

Perhitungan *six big losses* dilakukan untuk mengetahui faktor apa saja yang mungkin menjadi penyebab dari rendahnya nilai efektivitas dari suatu mesin atau peralatan. Pada analisis *six big losses* dilakukan rekapitulasi nilai *six big losses* dengan cara mengalikan presentase kerugian dengan *loading time*. Perhitungan tersebut bertujuan untuk mengetahui jumlah waktu hilang pada masing-masing *losses*. Berikut merupakan hasil analisis dari masing-masing *losses* pada setiap stasiun di Pabrik Gula Pandjie..

Tabel 8. Analisis Six Big Losses St. Gilingan

No.	Six Big Losses	Total Time Losses (menit)	Presentase	Kumulatif Presentase
1.	Breakdown Losses	2159,4	4,81%	4,81%
2.	Setup and Adjustment	0	0,00%	4,81%
3.	Idling and Minor Stopppges	592,56	1,32%	6,13%
4.	Reduced Speed Losses	42127,35	93,87%	100,00%
5.	Reduced Yield	0	0,00%	100,00%
6.	Defect In Process	0	0,00%	100,00%
	TOTAL	44879,31	100,00%	

Tabel 9. Analisis Six Big Losses St. Pemurnian

No.	Six Big Losses	Total Time Losses (menit)	Presentase	Kumulatif Presentase
1.	Breakdown Losses	523,44	1,13%	1,13%
2.	Setup and Adjustment	0	0,00%	1,13%
3.	Idling and Minor Stopppges	592,56	1,28%	2,42%
4.	Reduced Speed Losses	43763,31	94,73%	97,14%
5.	Reduced Yield	0	0,00%	97,14%
6.	Defect In Process	1318,96	2,86%	100,00%
	TOTAL	46198,27	100,00%	

Tabel 10. Analisis Six Big Losses St. Penguapan

No.	Six Big Losses	Total Time Losses (menit)	Presentase	Kumulatif Presentase
1.	Breakdown Losses	1617	3,60%	3,60%
2.	Setup and Adjustment	0	0,00%	3,60%
3.	Idling and Minor Stopppges	592,56	1,32%	4,92%
4.	Reduced Speed Losses	42669,75	95,08%	100,00%
5.	Reduced Yield	0	0,00%	100,00%
6.	Defect In Process	0	0,00%	100,00%
	TOTAL	44879,31	100,00%	

Tabel 11. Analisis Six Big Losses St. Masakan

No.	Six Big Losses	Total Time Losses (menit)	Presentase	Kumulatif Presentase
1.	Breakdown Losses	110,76	0,25%	0,25%
2.	Setup and Adjustment	0	0,00%	0,25%
3.	Idling and Minor Stopppges	592,56	1,32%	1,57%
4.	Reduced Speed Losses	44175,99	98,43%	100,00%
5.	Reduced Yield	0	0,00%	100,00%
6.	Defect In Process	0	0,00%	100,00%
	TOTAL	44879,31	100,00%	

Tabel 12. Analisis Six Big Losses St. Puteran

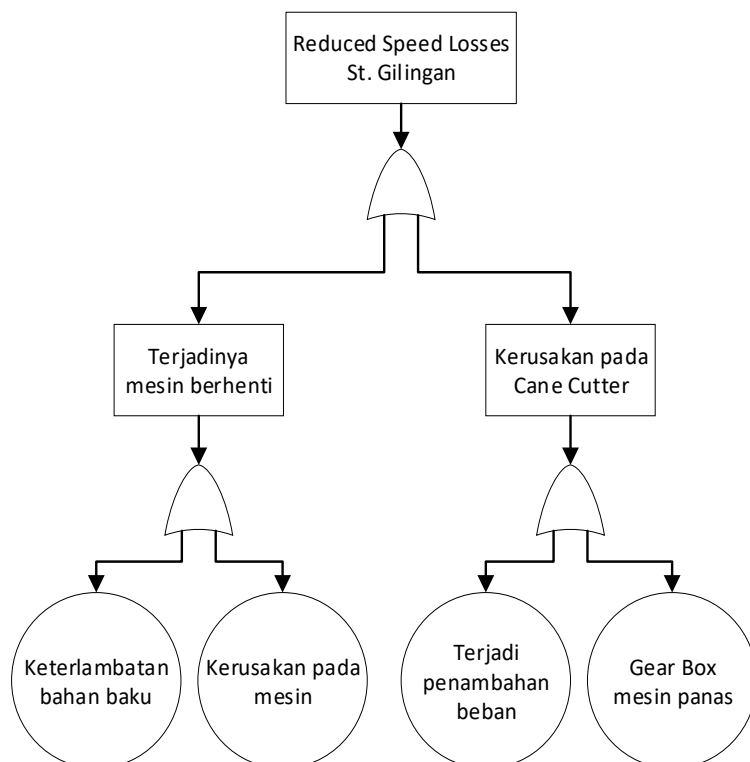
No.	Six Big Losses	Total Time Losses (menit)	Presentase	Kumulatif Presentase
1.	Breakdown Losses	7,56	0,02%	0,02%
2.	Setup and Adjustment	0	0,00%	0,02%
3.	Idling and Minor Stopppges	592,56	1,32%	1,34%
4.	Reduced Speed Losses	44279,19	98,66%	100,00%
5.	Reduced Yield	0	0,00%	100,00%
6.	Defect In Process	0	0,00%	100,00%
	TOTAL	44879,31	100,00%	

Berdasarkan hasil analisis *six big losses* pada setiap stasiun, dapat diketahui faktor yang paling mempengaruhi dengan melihat nilai *total time losses* terbesar. Faktor yang paling mempengaruhi terhadap kerugian yang terjadi adalah *reduced speed losses*. Nilai *total time losses* pada setiap stasiun, yaitu: stasiun gilingan adalah 42127,35 menit atau 702,12 jam dan presentase yang dihasilkan adalah 93,87%; stasiun pemurniaan adalah 43763,31 menit atau 729,38 jam dan presentasi yang dihasilkan adalah 94,73%; stasiun penguapan adalah 42669,75 menit atau 711,16 jam dan presentasi yang dihasilkan adalah 95,08%; stasiun masakan adalah 44175,99 menit atau 736,26 jam dan presentasi yang dihasilkan adalah 98,43%; dan stasiun puteran adalah 44279,19 menit atau

737,98 jam dan presentasi yang dihasilkan adalah 98,66%.

Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan hasil perhitungan nilai OEE, diketahui bahwa faktor yang mempengaruhi terhadap rendahnya nilai OEE adalah *performance rate*. Pada hasil perhitungan *six big losses*, diketahui bahwa salah satu faktor kerugian atau kegagalan terbesar yang berpengaruh pada setiap stasiun adalah nilai *reduced speed losses*. Selanjutnya dilakukan pembuatan *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk mengetahui penyebab terjadinya *losses* tersebut pada setiap stasiun. Hasil dari analisis FTA pada setiap stasiun adalah sebagai berikut.



Gambar 1. Anlisis FTA pada stasiun gilingan

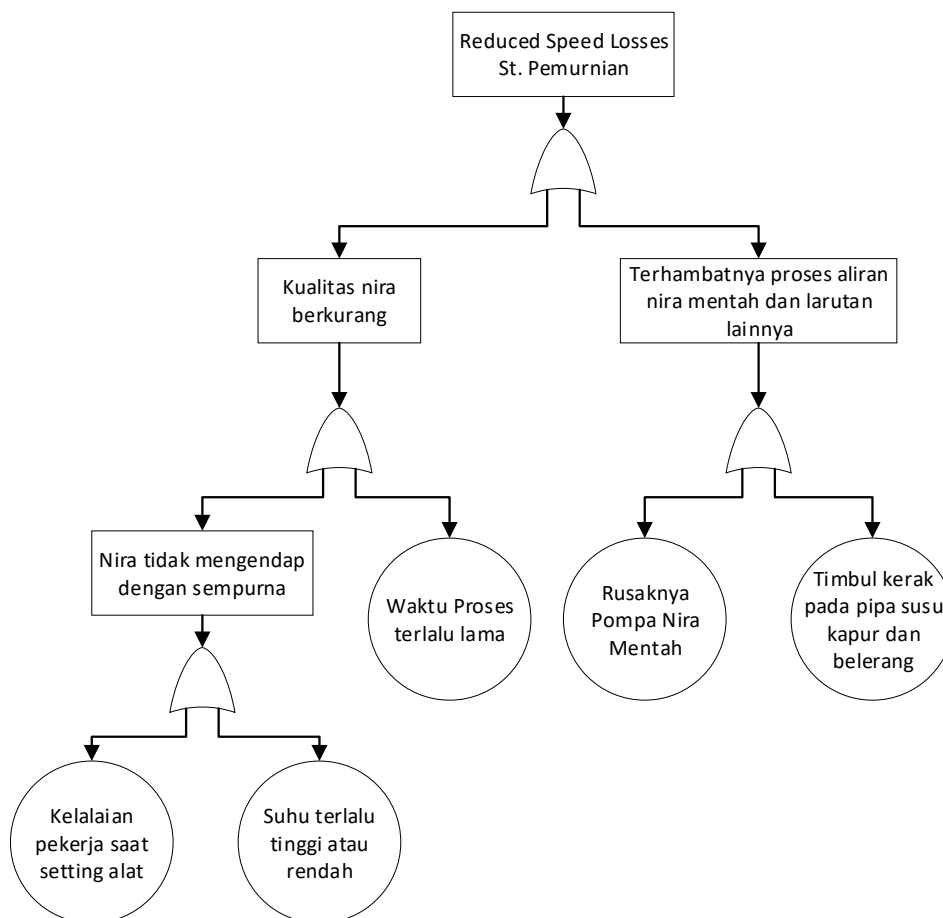
Stasiun Gilingan

Faktor tertinggi yang mempengaruhi efektivitas mesin pada PG Pandjie adalah *reduced speed losses*, sehingga faktor tersebut menjadi *top event*. *Event* yang mempengaruhi adalah terjadinya mesin berhenti atau kerusakan pada cane cutter. Kedua *event* tersebut dihubungkan dengan OR gate, karena apabila salah satu *event* terjadi akan menimbulkan *top event*. *Event* pertama adalah terjadinya mesin berhenti yang disebabkan karena adanya keterlambatan bahan baku atau kerusakan pada komponen mesin. *Event* kedua adalah kerusakan pada cane cutter yang disebabkan oleh terjadinya penambahan beban atau gear box mesin panas. Kedua *event* tersebut dihubungkan dengan OR gate. Hasil analisis FTA pada stasiun gilingan disajikan pada Gambar 1.

Stasiun Pemurnian

Faktor tertinggi yang mempengaruhi tingkat efektivitas mesin pada Pabrik Gula

Pandjie adalah *reduced spees losses*, sehingga faktor tersebut dijadikan sebagai *top event*. *Event* yang mempengaruhi adalah kualitas nira berkurang atau terhambatnya proses aliran nira mentah dan bahan larutan lainnya. Kedua *event* tersebut dihubungkan dengan OR gate, karena apabila salah satu *event* terjadi akan menimbulkan *top event*. *Event* pertama adalah terjadinya kualitas nira berkurang yang disebabkan oleh pengendapan nir yang tdk sempurna atau waktu proses terlalu lama. *Event* nira tidak mengendap dengan sempurna disebabkan oleh kelalaian pekerja saat men-setting alat atau suhu terlalu tinggi atau rendah. *Event* kedua yaitu terhambatnya proses aliran nira mentah dan bahan larutan lainnya yang disebabkan oleh rusaknya pompa nira mentah atau timbul kerak pada pipa susu kapur dan belerang. Hasil analisis FTA pada stasiun pemurnian disajikan pada Gambar 2.

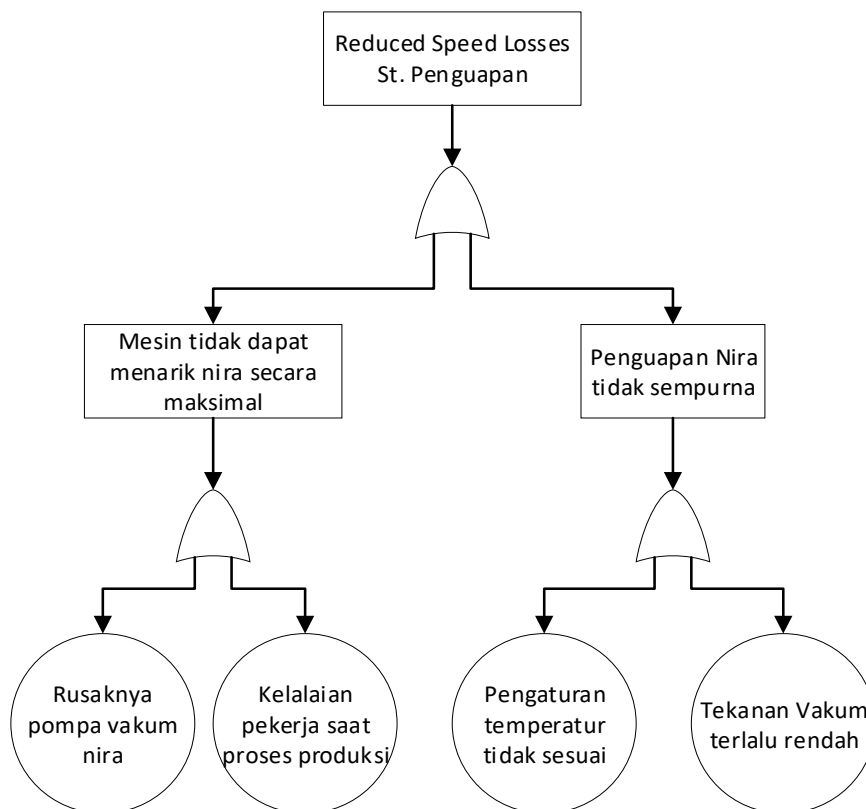


Gambar 2. Analisis FTA pada stasiun pemurnian

Stasiun Penguapan

Faktor tertinggi yang mempengaruhi efektivitas mesin pada PG Pandjie adalah *reduced speed losses*, sehingga faktor tersebut dijadikan sebagai *top event*. Event yang mempengaruhi mesin tidak dapat menarik nira secara maksimal atau penguapan nira tidak sempurna. Kedua event tersebut dihubungkan dengan OR gate, karena apabila salah satu event terjadi akan menimbulkan *top event*. Event pertama adalah mesin tidak dapat menarik nira secara maksimal yang disebabkan oleh rusaknya

pompa vakum nira atau kelalaian pekerja saat proses produksi. Event kedua yaitu terjadinya penguapan nira yang tidak sempurna yang disebabkan oleh mesin tidak dapat menarik nira secara maksimal atau tekanan vakum terlalu rendah. Event mesin tidak dapat menarik nira secara maksimal disebabkan oleh *basic event* rusaknya pompa vakum nira atau kelalaian pekerja saat proses produksi. *Basic event* tersebut dihubungkan dengan OR gate. Hasil analisis FTA pada stasiun penguapan disajikan pada Gambar 3.

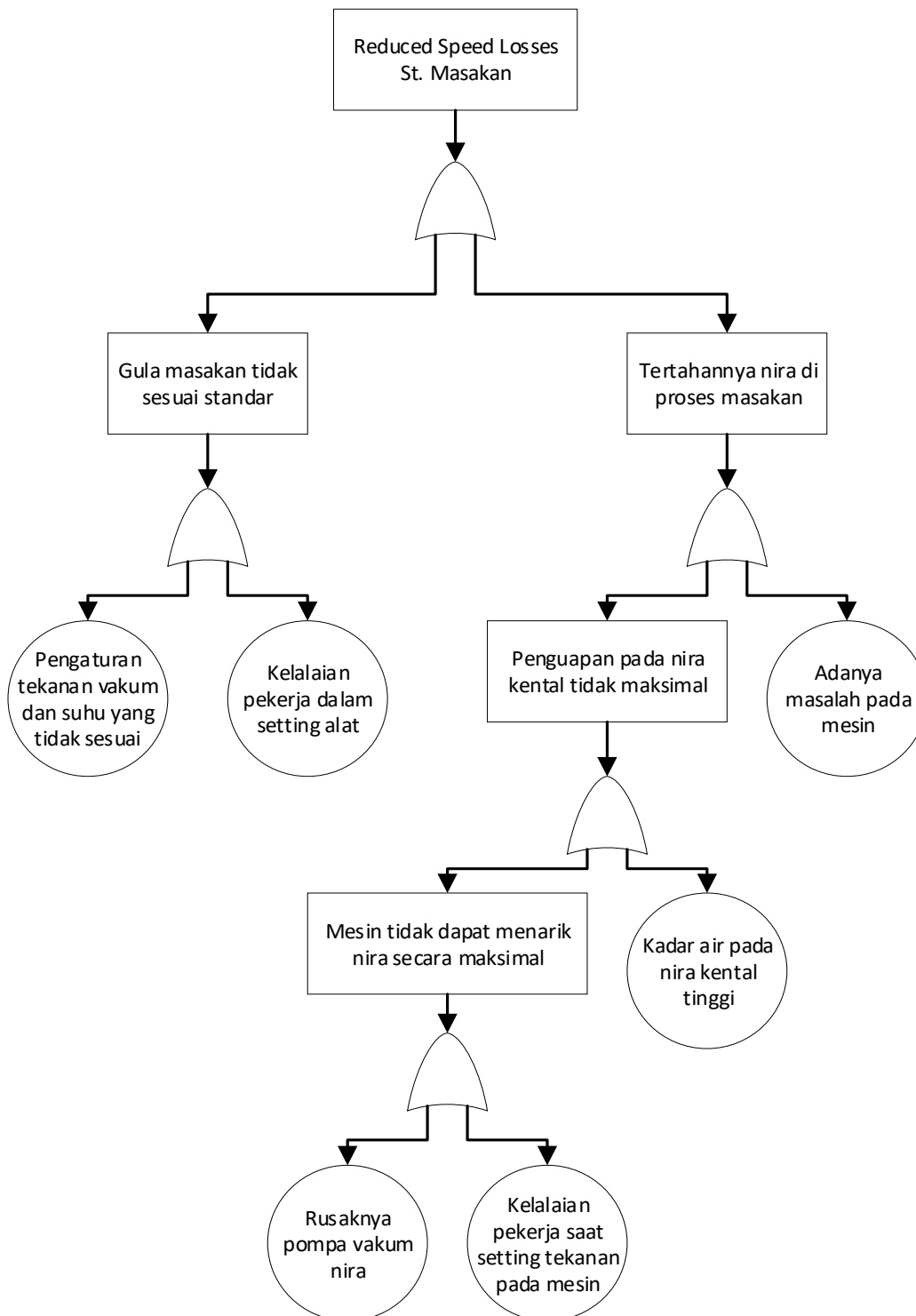


Gambar 3. Analisis FTA pada stasiun penguapan

Stasiun Masakan

Faktor tertinggi yang mempengaruhi efektivitas mesin pada PG Pandjie adalah *reduced speed losses*, sehingga faktor tersebut dijadikan sebagai *top event*. event yang mempengaruhi adalah gula masakan tidak sesuai standar atau tertahannya nira di proses masakan. Kedua event tersebut dihubungkan dengan OR gate, karena apabila salah satu event terjadi akan menimbulkan top event. Event pertama adalah gula masakan tidak sesuai standar yang disebabkan oleh pengaturan tekanan vakum dan suhu yang tidak sesuai atau kelalaian pekerja saat setting alat. Event kedua yaitu tertahannya

nira di proses masakan disebabkan oleh adanya masalah/ gangguan pada mesin atau penguapan pada nira kental tidak maksimal. Event tersebut dihubungkan dengan OR gate. Event penguapan pada nira kental tidak maksimal disebabkan karena mesin tidak dapat menarik nira secara maksimal atau kadar air pada nira nira kental tinggi. Kedua basic event tersebut juga dihubungkan dengan OR gate. Pada mesin tidak dapat menarik nira secara maksimal disebabkan karena rusaknya pompa vakum nira atau kelalaian pekerja saat men-setting tekanan pada mesin. Hasil analisis FTA pada stasiun masakan disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Analisis FTA pada stasiun masakan

Stasiun Puteran

Faktor tertinggi yang mempengaruhi efektivitas mesin pada Pabrik Gula Pandjie adalah *reduced speed losses*, sehingga faktor tersebut dijadikan sebagai *top event*. Event yang mempengaruhi adalah warna kristal gula pekat atau proses penyaringan kristal gula tidak

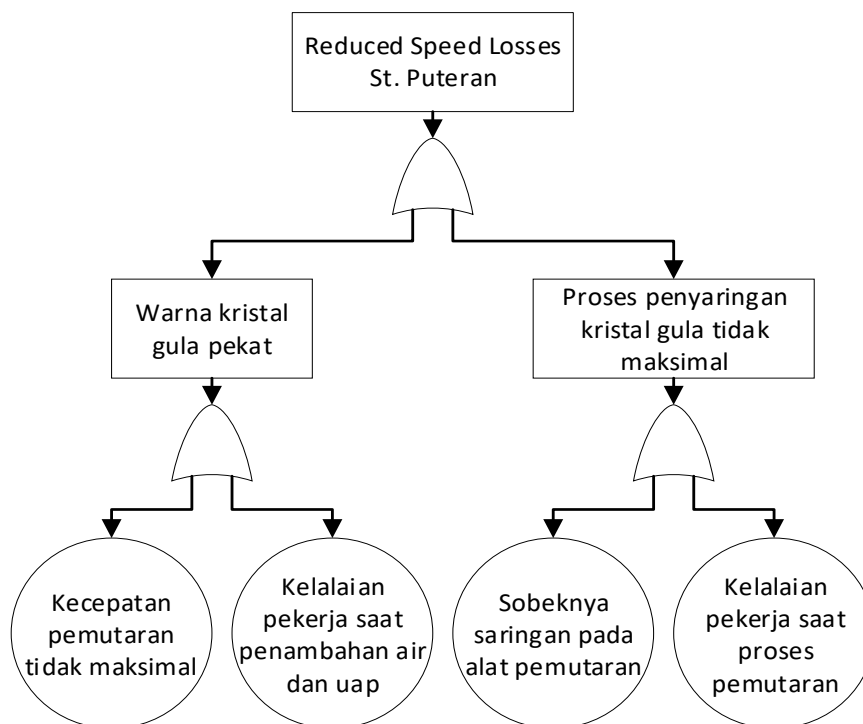
maksimal. Kedua event tersebut dihubungkan dengan OR gate, karena apabila salah satu event terjadi akan menimbulkan top event. Event pertama adalah warna kristal gula pekat disebabkan oleh kecepatan putaran tidak maksimal atau kelalaian pekerja saat penambahan air dan uap saat proses putaran.

Event kedua adalah proses penyaringan kristal gula tidak maksimal disebabkan karena sobeknya saringan pada alat pemutaran atau kelalaian pekerja saat proses pemutaran. Kedua event tersebut dihubungkan dengan OR gate. Hasil analisis FTA pada stasiun puteran disajikan pada Gambar 5.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dengan pembuatan *Fault Tree Analysis* (FTA) diketahui beberapa penyebab dari *losses* yang terjadi. *Losses* tertinggi yang menjadi faktor yang mempengaruhi tingkat efektivitas mesin di Pabrik Gula Pandjie adalah *reduced speed losses*, dimana kerugian tersebut disebabkan karena mesin dan peralatan tidak dioperasikan sesuai dengan standar yang sudah ditetapkan. Berdasarkan hasil tersebut, perbaikan yang dapat dilakukan pada Pabrik Gula Pandjie untuk meningkatkan efektivitas mesin dan peralatan diantaranya adalah pencatatan setiap kerusakan, perbaikan, dan penyebab kerusakan yang terjadi pada mesin. Edukasi dan pelatihan pada para pekerja khususnya untuk pekerja yang baru juga perlu dilakukan untuk dapat membentuk formasi pekerja yang memiliki *skill* dan menguasai

teknik dalam produksi, sehingga mengurangi kesalahan saat kegiatan produksi berlangsung.

Berdasarkan analisis FTA, diketahui sebagian besar penyebab terjadinya *losses* adalah mesin berhenti bekerja karena adanya kerusakan mesin atau perbaikan mesin, sehingga perlu dilakukan pengecekan rutin pada mesin dan perawatan mandiri mesin dan alat yang digunakan sebagai upaya preventatif maintenance yang diharapkan dapat mencegah sebelum adanya kerusakan yang terjadi. Penyebab lain terjadinya mesin berhenti adalah karena adanya keterlambatan bahan baku yang diakibatkan kurangnya lahan untuk budidaya tebu. Perbaikan yang dapat dilakukan adalah perusahaan dapat melakukan budidaya bibit tebu dengan kualitas baik. Penyebab dasar lain yang berpengaruh terhadap efektivitas mesin juga dapat dilakukan perbaikan dengan melakukan perawatan mesin yang dipakai dengan pengecekan rutin komponen alat dan melakukan perawatan korektif yaitu tindakan perbaikan yang dilakukan saat terjadi kerusakan pada mesin.



Gambar 5. Analisis FTA pada stasiun puteran

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan OEE menunjukkan setiap stasiun belum mencapai batas presentase minimal 85% yang telah ditetapkan oleh JPIM. Hasil perhitungan rata-rata nilai OEE pada setiap stasiun berada pada rentang 60%-84%. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dengan pembuatan Fault Tree Analysis (FTA) diketahui beberapa penyebab dari losses yang terjadi. Losses tertinggi yang menjadi faktor yang mempengaruhi tingkat efektivitas mesin di Pabrik Gula Pandjie adalah reduced speed losses, dimana kerugian tersebut disebabkan karena mesin dan peralatan tidak dioperasikan sesuai dengan standar yang sudah ditetapkan. Perbaikan untuk meningkatkan kinerja dapat dilakukan dengan pencatatan rutin pada setiap kerusakan yang terjadi, pengecekan rutin mesin dan komponen alat, perawatan mandiri, pelatihan/training pekerja untuk meningkatkan skill, budidaya bibit tebu, dan perawatan korektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(7), 709–756. <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>
- da Silva, C. M. I., Cabrita, C. M. P., & Matias, J. C. de O. (2008). Proactive reliability maintenance: a case study concerning maintenance service costs. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4), 343–355. <https://doi.org/10.1108/13552510810909957>
- Dewi, I. N., Putra, A. R., Kurniawanto, H., Romli, O., & Khaerudin, D. (2024). Implementasi Metode Overall Equipment Effectiveness Dan Six Big Losses Pada Cutting Machine. *Jurnal Riset Ilmu Manajemen Dan Kewirausahaan*, 2(3), 59–71. <https://doi.org/10.61132/maeswara.v2i3>
- Dipa, M., Lestari, F. D., Faisal, M., & Fauzi, M. (2022). ANALISIS OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE) DAN SIX BIG LOSSES PADA MESIN WASHING VIAL DI PT. XYZ. *Jurnal Bayesian: Jurnal Ilmiah Statistika Dan Ekonometrika*, 2(1), 61–74. <https://doi.org/10.46306/bay.v2i1.29>
- Ghanem, M., Harphoush, S., & Zaitoun, M. (2018). Sugars: Types and Their Functional Properties in Food and Human Health. *International Journal of Public Health Research*, 6(4), 93–99. <http://www.openscienceonline.com/journal/ijphr>
- Hapsari, N., Amar, K., & Rahadian Perdana, Y. (2012). Pengukuran Efektivitas Mesin dengan Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE) di PT Setiaji Mandiri. *Spektrum Industri*, 10(2), 108–199.
- Kementan. (2024). *Analisis Kinerja Perdagangan Gula*.
- Ljungberg, Ö. (1998). Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(5), 495–507. <https://doi.org/10.1108/01443579810206334>
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance Preventative Maintenance Series*. Productivity Press.
- Nazar, Y., Astrini, G. Y., & Putri, A. S. (2023). Perhitungan dan Analisis Nilai Overall Equipment Effectiveness (OEE) sebagai Upaya Meningkatkan Produktivitas Mesin AJL Toyota JAT810. *Jurnal Tekstil (JUTE)*, 6(2), 80–88.
- Pan, K., Liu, H., Gou, X., Huang, R., Ye, D., Wang, H., Glowacz, A., & Kong, J. (2022). Towards a Systematic Description of Fault Tree Analysis Studies Using Informetric Mapping. *Sustainability*, 14(18), 11430. <https://doi.org/10.3390/su141811430>
- Prakash, J., Ong, K. S., & Cheah, C. K. (2019). Overall equipment effectiveness (OEE): a review and development of an integrated improvement framework. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJPMQ.2019.10020889>
- Pratitis, A. C. W., & Maryanty, Y. (2024). Evaluasi TPM (Total Productive Maintenance) dan Penerapan AM (Autonomous Maintenance) pada Produksi Susu Kental Manis di Pabrik Dairy. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 10(1), 245–255. <https://doi.org/10.33795/distilat.v10i1.4908>
- Psarommatis, F., May, G., Azamfirei, V., & Konstantinidis, F. (2024). Optimizing efficiency and zero-defect manufacturing with in-process inspection: challenges, benefits, and aerospace application. *Procedia Computer Science*, 232, 2857–2866. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.102>
- Raju, S., Kamble, H. A., Srinivasaiyah, R., & Swamy, D. R. (2022). Anatomization of the overall equipment effectiveness (OEE) for various machines in a tool and die shop. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 3(1), 97–105. <https://doi.org/10.1108/JIMSE-01-2022-0004>
- Royson, U., Jaqin, C., Hasibuan, S., Juniawan, S., Alam, F., & Daruki, D. (2024). Peningkatan Produktivitas Maintenance Menggunakan Metode OEE dan MVSM pada Industri Jasa Penerbangan Nasional. *JISI: Jurnal Integrasi Sistem Industri*, 11(2), 159–170. <https://doi.org/10.24853/jisi.11.2.159-170>
- Sandy, P. M., & Wathoni, N. (2022). Review: Implementation of Overall Equipment

- Effectiveness (OEE) Based on Lean Manufacturing Tools in the Indonesian Pharmaceutical Industry. *Indonesian Journal of Pharmaceutics*, 4(1), 158–167. <https://doi.org/10.24198/idjp.v4i1.38707>
- Sayuti, M., Juliananda, Syarifuddin, & Fatimah. (2019). Analysis of the Overall Equipment Effectiveness (OEE) to Minimize Six Big Losses of Pulp Machine: A Case Study in Pulp and Paper Industries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 536(1), 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012061>
- Scapin, T., Fernandes, A. C., & Proenca, R. P. da C. (2017). Added sugars: Definitions, classifications, metabolism and health implications. *Revista de Nutrição*, 30(5), 663–677. <https://doi.org/10.1590/1678-98652017000500011>
- Shabia, G. N. A. (2021). *Kuasa Korporasi Besar: Kasus Gula Nasional*. <http://www.fao>.
- Siboro, E. N., & Liquiddanu, E. (2024). Analisis Tingkat Efektivitas Mesin Rawmill Untuk Meminimasi Six Big Losses Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness Pada PT. Indocement Tungal Prakarsa Tbk Plant 8 Bogor. *Proceeding Mercu Buana Conference on Industrial Engineering*, 6, 65–74.
- Sinuraya, J. F., Suryana, E. A., Shaffitri, L. R., Suharyono, S. R., & Hermawan, H. R. (2024). Kinerja Industri dan Dinamika Kebijakan Komoditas Gula Kristal Putih Nasional. *Indonesian Sugar Research Journal*, 4(2), 68–79. <https://doi.org/10.54256/isrj.v4i2.129>
- Sulaiman, A. A., Subagyo, K., Soetopo, D., Richana, N., Syukur, M., Hermanto, & Ardana, I. K. (2018). *Menjaring Investasi Meraih Swasembada Beras* (Issue 29). IAARD Press, Sekretariat Kementerian Pertanian.
- Suliantoro, H., Susanto, N., Prastawa, H., & Sihombing, I. (2017). Penerapan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE) dan Fault Tree Analysis (FTA) untuk Mengukur Efektivitas Mesin Reng. *Jurnal Teknik Industri*, 12(2), 105–118.
- Kirana, A. T., & Widiastih, W. (2024). Analisis Perhitungan Overall Equipment Effectiveness (OEE) untuk Meningkatkan Efisiensi Mesin Haloong (Studi Kasus: PT Benteng Api Technic, Gresik). *Jurnal Tekstil (JUTE)*, 7(1), 59–68.
- Taufik, F. M., Puri, G. N., Meidina, M., & Zidan, R. M. (2023). Analisa Pengukuran Efektivitas Mesin pada Proses Filling Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE) & Six Big Losses di PT Sanbe Farma Bandung. *Jurnal Bayesian: Jurnal Ilmiah Statistika Dan Ekonometrika*, 3(1), 28–37. <https://doi.org/10.46306/bay.v3i1>
- Kusuma, T. I., Prihadianto, R. D., & Istiqomah, S. (2024). Evaluasi Target Produksi Gula Kristal Putih PT.X dengan Pendekatan Perencanaan Produksi dan Analisis Investasi dalam Pemenuhan Permintaan Gula Nasional. *Jurnal Flywheel*, 15(1), 8–17. <https://doi.org/10.36040/flywheel.v15i1.9253>
- Tupan, J. M., Simanjuntak, A., & Aditir, L. (2018). Evaluasi Efektivitas Pemeliharaan Menggunakan Alat Reminder Pemeliharaan dengan Penerapan Total Productive Maintenance di PT PL (Persero) Rayon Haruku. *ARIKA*, 12(1), 25–40.
- Wibowo, P. A., & Padilah, I. (2023). Analisis Overall Equipment Effectiveness (OEE) dan Six Big Losses Pada Mesin Length Adjustment Line 3 Departemen Belt Assy PT XYZ. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(2), 439–449. <https://doi.org/10.33379/gtech.v7i2.2236>
- Wolska, M., Gorewoda, T., Roszak, M., & Gajda, L. (2023). Implementation and Improvement of the Total Productive Maintenance Concept in an Organization. *Encyclopedia*, 3(4), 1537–1564. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3040110>
- Zehra, K., Mirjat, N. H., Shakih, S. A., Harijan, K., Kumar, L., & El Haj Assad, M. (2024). Optimizing Auto Manufacturing: A Holistic Approach Integrating Overall Equipment Effectiveness for Enhanced Efficiency and Sustainability. *Sustainability*, 16(7), 2973. <https://doi.org/10.3390/su16072973>