

Penerapan Lean untuk Reduksi *Lead Time* dan *Defect* Produk pada Industri Manufaktur

Hari Supriyanto¹, Rindi Kusumawardani², Ega Rizkiyah³

¹ Departemen Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

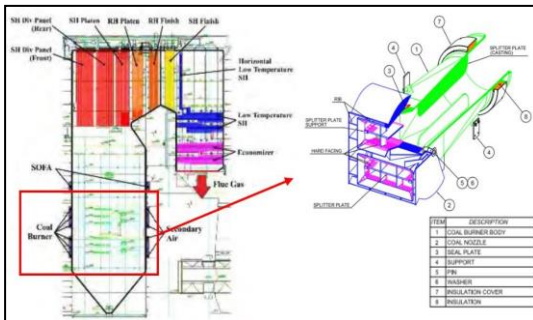
hariqive@ie.its.ac.id¹, rindi@its.ac.id², egarizkiyah@gmail.com³

Abstract— *Coal nozzle burner* adalah salah satu komponen penting untuk pemeliharaan PLTU. Permintaan komponen ini cukup tinggi, dengan *lead time* yang pendek; menuntut perusahaan untuk dapat menghasilkan produk dengan pengiriman yang tepat waktu. Untuk itu, perusahaan selalu berupaya untuk melakukan perbaikan proses agar dapat berproduksi secara lebih efektif dan efisien melalui pendekatan *Lean*. Konsep ini dapat mengidentifikasi dan mengeliminasi pemborosan atau kegiatan yang tidak bernilai tambah. *Paper* ini menyuguhkan kegiatan identifikasi aktivitas yang mengandung pemborosan (*waste*) berdasarkan 9 tipe *waste*. Identifikasi dimulai dengan memetakan proses berdasarkan pada *value stream mapping* dan *process activity mapping*. Untuk menentukan ranking *waste* dipakai pendekatan metode *Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)*. Berdasarkan metode FAHP, ranking *waste* tertinggi adalah *defect* dan ranking *waste* terendah adalah *inventory*. Untuk merancang rekomendasi perbaikan dipakai *Lean tools Poka Yoke*. Hasil dari rekomendasi perbaikan adalah perancangan *Jig- fixture* dalam proses *welding* untuk mengurangi *defect waste*. Rekomendasi berikutnya adalah penggunaan mesin *CNC laser cutting* untuk menghindari *waste defect* pada proses *cutting material*, dan sertifikasi *welder* untuk mengurangi *defect* pada proses *welding*. Dengan rekomendasi perbaikan maka terjadi penurunan prosentase *defect* sampai 30 %, sehingga terjadi penurunan waktu proses produksi dan penurunan total *lead time*.

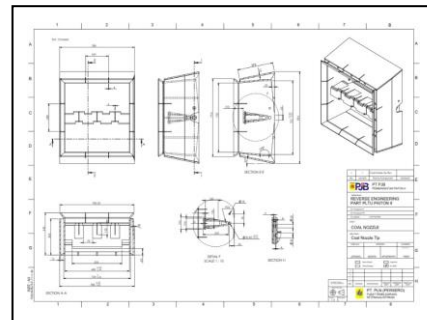
Keywords—*coal nozzle burner, lean manufacturing, VSM, FAHP, jig and fixture*

I. PENDAHULUAN

Coal nozzle burner [1] adalah komponen dari salah satu jenis pembakaran yaitu *Pulverized Coal Combustion (PCC)* yang di gunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), seperti terlihat di Gambar 1 dan Gambar 2



Gambar 1. *Coal Nozzle Burner* pada *Boiler* PLTU



Gambar 2. *Drawing* Produk *Coal Nozzle Burner*

Dalam 1 (satu) unit *boiler* PLTU kapasitas 1x660 MW [2], terdapat komponen *coal nozzle burner* sebanyak 24 (dua puluh empat) buah [3]. Komponen ini beroperasi pada suhu tinggi, yang menyebabkan *lifetime* dari *coal nozzle burner* menjadi pendek; sehingga penggantian komponen *coal nozzle burner* adalah berulang dan cepat [4].

Berdasarkan pada proses produksi *coal nozzle burner* terdapat banyak aktivitas yang tidak memberikan nilai tambah sehingga menyebabkan *lead time* menjadi panjang. Ketika tahap produksi dan dilakukan *quality control* ditemukan cacat (*defect*) sehingga harus dilakukan proses *repair* dan *rework* [4]. Cacat yang sering ditemukan adalah terjadi perbedaan geometri dimensi dan toleransi yang tidak sesuai dengan rancangan produk. Pada proses pengelasan ditemukan cacat seperti *crack*. Kecacatan ini memerlukan *repair* dan *rework* dan mengakibatkan adanya tambahan pekerjaan, biaya, serta waktu dalam menyelesaikan produk. Dari data diperoleh bahwa rata-rata *defect* selama produksi berkisar 20%.

II. METODOLOGI

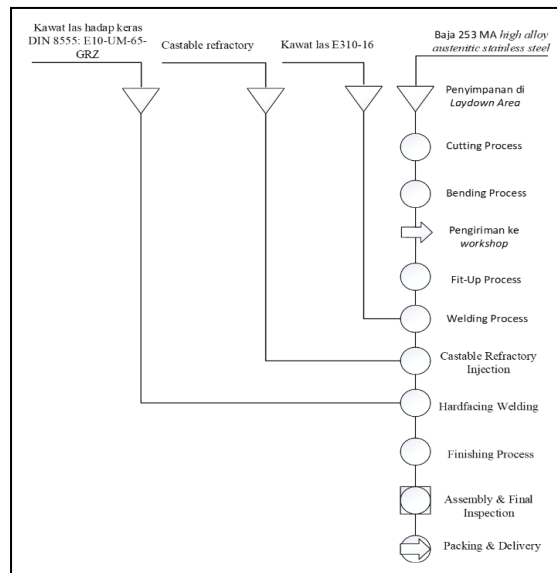
Metodologi dimulai dari tahap pendefinisian, identifikasi dan perumusan masalah, serta identifikasi kondisi existing di produksi. Pengumpulan data dimulai dari *define fase*, mencakup identifikasi cacat pada produk dan komponennya, yang menyebabkan kualitas menjadi buruk. Langkah berikutnya adalah membuat diagram proses operasi untuk melihat alur produksi secara lebih detail [5]. *Measure phase* meliputi langkah-langkah pengukuran cacat produk dengan menggunakan diagram *pareto* dan pengukuran batas kendali atas, batas kendali tengah, dan batas kendali bawah dengan menggunakan peta kendali [6].

Tahap berikutnya adalah tahap analisa yaitu menganalisis akar penyebab cacat dengan menggunakan diagram tulang ikan yang terdiri dari enam aspek yaitu manusia, material, mesin, metode, ukuran, dan lingkungan, serta lima alasan secara berurutan untuk mengidentifikasi akar penyebab kritis. Analisis ini dilanjutkan pada identifikasi lebih detail dengan menggunakan 5 whys [7].

Tahap perbaikan meliputi analisis terhadap potensi kegagalan dan akibat yang ditimbulkannya dengan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA); yang dimulai dari penentuan nilai *severity*, *occurance*, dan *detection* untuk menghitung *risk priority number* (RPN); dilanjutkan dengan Minnetonka alternatif perbaikan berdasarkan nilai RPN tertinggi dan mengusulkan solusi alternatif [8]. Terakhir, *generate* solusi alternatif perbaikan, serta perhitungan dan analisis biaya penerapan solusi alternatif. Pada tahap control akan dijelaskan rancangan *standard operating procedure* (SOP) dari alternatif yang harus dikerjakan berupa pengoperasian *jig and fixture* [9].

III. HASIL

Proses produksi *coal nozzle burner* meliputi proses penerimaan material, proses pemotongan, proses penekukan, proses penyetulan, proses pengelasan, proses pengisian semen tahan api, proses pengerasan permukaan, proses penyelesaian, proses perakitan dan pemeriksaan, serta proses pengepakan dan pengiriman [10], seperti OPC pada Gambar 3.



Gambar 3. Operation Process Chart Coal Nozzle Burner

Proses penerimaan material merupakan proses awal *produksi coal nozzle burner* yang terdiri dari 3 (tiga) tahap yaitu *material handling*, inspeksi dan *material marking*. Ketika material utama telah diterima, bagian produksi akan mengirimkan material (*material handling*) ke area *laydown*. Dimulai dengan *Quality Control* untuk pemeriksaan awal yaitu pemeriksaan *visual*, pengujian komposisi kimia, pengujian sifat mekanik dan pengukuran dimensi material [11].

Bahan utama dari *coal nozzle burner* adalah baja 253 MA - *high alloy austenitic stainless steel* [12]. Bahan baja paduan tahan suhu tinggi yang mengandung *kromium* dan *nikel austenitik* yang dicampur dengan *nitrogen* dan *serium*, sehingga memiliki karakteristik yang mampu menahan *korosi-oksidasi* secara terus menerus. Selanjutnya supervisor produksi melakukan proses penandaan bahan utama sekaligus memastikan ketersediaan bahan habis pakai, kelengkapan peralatan, gambar kerja, instruktur kerja dan rencana pemotongan untuk memulai proses kerja fabrikasi selanjutnya.

Terdapat beberapa bagian *coal nozzle burner* yang harus dibengkokkan menggunakan mesin *roll bending* atau *hydraulic bending* [9]. Dalam pelaksanaan proses bending ini umumnya dilakukan di tempat yang sama dengan proses pemotongan plat sebelumnya.

Proses *fit-up* adalah proses penyesuaian dan perakitan material menjadi bentuk jadi. Proses ini menggunakan *spot welding* yang merupakan proses pemasangan sebelum material dirakit secara permanen dengan cara pengelasan [9]. Pengelasan titik ini sangat penting untuk mengunci hasil proses penyelarasan simetris sesuai dengan gambar kerja.

Pada pengelasan produk *coal nozzle burner* menggunakan proses *Shield Metal Arc Welding* (SMAW) dengan kawat las E310-16 [13]. Proses pengelasan dibagi menjadi 3 (tiga) bagian yaitu bagian dalam, luar dan tengah. Proses pengelasan *coal nozzle burner* harus dilengkapi dengan *Welding Map*, *Welding Procedure Specification* (WPS), dan *Procedure Qualification Record* (PQR) yang dibuat oleh *Welding Engineer*.

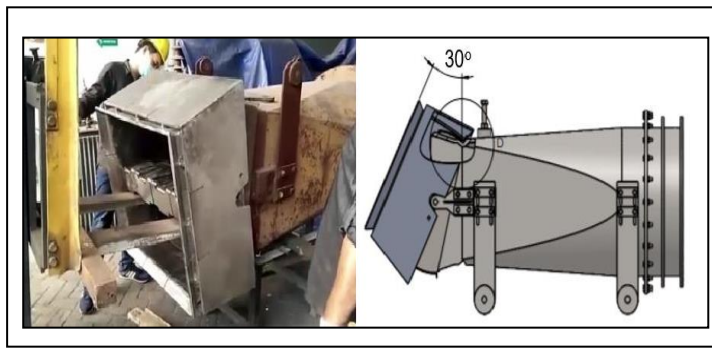
Proses pengerasan permukaan dilakukan dengan pengelasan pada sisi bagian tengah. Hal ini dilakukan karena sering kali pada bagian tengah terjadi abrasi akibat bersentuhan langsung dengan aliran batubara dan udara panas. Proses pengelasan dilakukan dengan menambahkan lapisan ganda menggunakan kawat las DIN 8555: E10-UM-65-GRZ untuk meningkatkan kekerasan permukaan pada bagian tengah.

Proses *finishing* adalah proses penyelesaian atau penyempurnaan akhir dari produksi *coal nozzle burner*. Proses ini terdiri dari 3 (tiga) tahap, yaitu: (1) Pemesinan lubang luar menggunakan mesin bor, digunakan untuk perakitan dengan komponen *housing*. (2)

Proses pembersihan luas permukaan material menggunakan mesin gerinda. (3) Proses penomoran produk menggunakan mesin *punch* atau *dot marking* sebagai identitas produk, seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5.



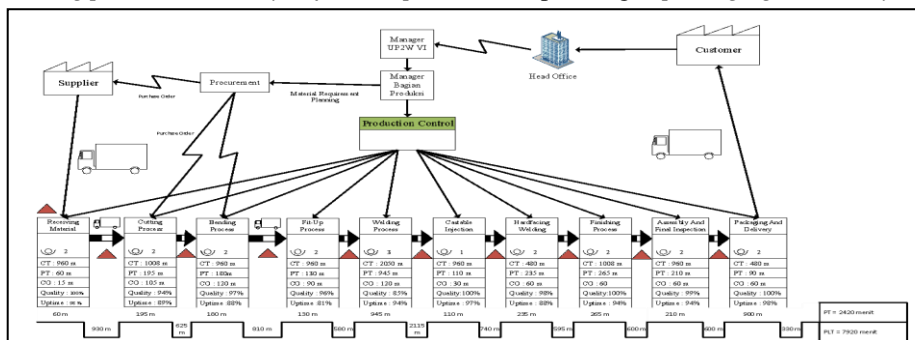
Gambar 4. Proses *Machining, Grinding, dan Marking*



Gambar 5. *Assembly Coal Nozzle Burner dan Housing*

Proses perakitan merupakan proses penggabungan komponen dari *coal nozzle burner* dengan komponen *housing*. Penggabungan dilakukan untuk menguji pergerakan sudut kemiringan saat menyesuaikan pengoperasian *boiler*. Setelah proses perakitan, dilakukan pemeriksaan akhir, yang terdiri dari 3 (tiga) tahap, yaitu: (1) Pengukuran akhir Dimensi Geometri dan Toleransi produk menggunakan *3D Scanner*, (2) Pengecekan ulang komposisi kimia, dan (3) Uji Tidak Rusak (NDT) menggunakan Uji Penetran (PT) dan Uji *Ultrasonik* (UT). Setelah ketiga proses tersebut selesai dilakukan, pembersihan dan pemolesan dilakukan dengan menggunakan *topcoat & clear* sebagai lapisan terakhir untuk memberikan kilau dan menghilangkan cacat kecil pada permukaan, seperti Gambar 5.

Available Time adalah waktu kerja bersih yang tersedia dan benar-benar digunakan untuk kegiatan produksi adalah 8 jam kerja sehari (480 menit), dan jam kerja tersebut di tambah waktu istirahat dan waktu-waktu non- produktif lainnya selama 1 jam (60 menit). *Available time* lini produksi *coal nozzle burner* yang ditetapkan rata-rata dalam 1 bulan sebesar 20 hari kerja. Maka *available time* per tahun sebesar 240 hari kerja atau 1920 jam. Dalam menentukan waktu keseluruhan proses digunakan *Process Lead Time* (PLT) pada aliran *end to end* berdasarkan pada VSM. Data yang diambil dari keseluruhan proses produksi *coal nozzle burner* mulai dari proses *receiving material, cutting process, bending process, fit-up process, welding process, castable refractory injection, hardfacing welding, finishing process, assembly & final inspection*, sampai dengan *packaging & delivery*.



Gambar 6. *Value Stream Mapping (VSM) Produksi Coal Nozzle Burner*

Value Stream Mapping digunakan untuk melihat aliran informasi material dan proses fisik pada proses produksi *Coal Nozzle Burner* [14]. Setelah keseluruhan data terkumpul selanjutnya dibuat *current state map*. *Current state map* ini menunjukkan kondisi aktual yang terjadi pada lini produksi *Coal Nozzle Burner*, seperti pada Gambar 6. Berdasarkan VSM dapat dilihat bahwa *total cycle time* (TC) produksi *coal nozzle burner* adalah 2420 menit sedangkan *Process Lead Time* (TLT) produksi *Coal Nozzle Burner* adalah 17 hari kerja atau 7920 menit. Perhitungan *takt time* berhubungan dengan target waktu, sehingga besaran *takt time* dapat berubah-ubah sesuai permintaan (*order*) pelanggan. Diketahui bahwa pada proses produksi *coal nozzle burner* adalah *nonvalue added (NVA)* sebesar 41%, *necessary nonvalue added (NNVA)* sebesar 39%, dan aktivitas *value added (VA)* sebesar 20%.

TABEL I. AKTIFITAS PRODUKI COAL NOZZEL BURNER BERDASARKAN TIPE AKTIFITAS

No	Tipe Aktivitas	Jumlah	Waktu (menit)	Persentase
1	<i>Operation</i>	41	3725	47%
2	<i>Inspection</i>	18	1380	17%
3	<i>Transportation</i>	11	645	8%
4	<i>Delay</i>	21	1620	20%
5	<i>Storage</i>	4	540	7%
Total		95	7920	100%

Berdasarkan aktifitas produksi *coal nozzle burner*, dari tabel 1 diatas aktivitas terbanyak adalah *operation* (47%), selanjutnya adalah *delay* (20%), *inspection* (17%), *transportation* (8%), dan *storage* (7%). Aktivitas *operation*, *inspection*, dan *delay* termasuk dalam aktivitas yang *nonvalue added* dan harus dieliminasi [14]. Terlihat bahwa proses produksi *coal nozzle burner* masih banyak ditemukan *waste defect* sehingga belum memenuhi dengan standar kualitas yang ditentukan. Parameter utama inspeksi *coal nozzle burner* adalah *Geometri Dimensi & Toleransi* (GDT) yang digunakan sebagai sistem untuk mendefinisikan toleransi teknik. Hal ini mendefinisikan tingkat akurasi, presisi dan fungsi yang digunakan untuk menentukan batasan yang diperbolehkan sesuai spesifikasi teknis. *Defect waste* terjadi pada saat proses *cutting*, proses *bending*, proses *fit-up*, proses *welding* dan proses *assembly* dan *final inspection*. Bahwa *defect* yang paling banyak ditemukan adalah pada *welding process* dengan persentase sebesar 15%, selanjutnya *cutting process* karena dimensi tidak sesuai dengan toleransi *shop drawing* dengan persentase sebesar 6% [6].

Excess processing waste merupakan aktifitas berlebihan yang seharusnya tidak perlu dilakukan. Karena proses yang berlebihan tersebut maka akan menambah waktu produksi [15]. Salah satu dari *waste* kategori ini dikarenakan hasil dari proses produksi tidak sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Selanjutnya terdapat aktivitas inspeksi *coal nozzle burner* yang dilakukan berulang dan menyita waktu lama (*overinspection*). Proses ini dikategorikan sebagai *waste* karena pada setiap tahapan pengerjaan dilakukan inspeksi dan tidak ada perhitungan *standard time*. Kemudian terdapat proses pembersihan sisa proses sebelumnya (*clean up*), hal ini perlu dilakukan karena banyaknya sisa hasil kerja dan implementasi penanganan sisa material belum maksimal. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan metode *fuzzy AHP* [16] *ranking 9 waste* dapat di lihat pada Tabel II berikut.

TABEL II. RANKING AKTIFITAS DENGAN 9 WASTE

Ranking	Waste	Bobot
1	<i>Defect</i>	0.322311
2	<i>Waiting</i>	0.125973
3	<i>Motion</i>	0.114188
4	<i>Transportation</i>	0.111758
5	<i>Overproduction</i>	0.088354
6	<i>Environmental, Healthy, and Safety</i>	0.064669
7	<i>Excess Processing</i>	0.062174
8	<i>Not Utilizing Employees Knowledge, Skills and Abilities</i>	0.058602
9	<i>Inventory</i>	0.051972

Tiga aktifitas yang mempunyai *ranking waste* tertinggi adalah *defect waste*, *waiting waste* dan *motion waste*. Dengan demikian jelas terlihat bahwa permasalahan yang muncul adalah karena ketiga *waste* ini [17]. Dengan ditemukannya *waste* utama maka identifikasi berikutnya adalah mencari akar permasalahannya.

Salah satu *waste* kritis dalam lini produksi *coal nozzle burner* adalah *waste defect*, dimana produk *coal nozzle burner* belum memenuhi standar kualitas yang telah ditentukan [1]. Parameter utama inspeksi *coal nozzle burner* adalah *Geometri Dimensi & Toleransi* (GDT) yang digunakan sebagai sistem untuk mendefinisikan toleransi teknik [18]. Untuk menelusuri *defect* ini maka dipakai 5 *whys*, seperti pada tabel III.

TABEL III. IDENTIFIKASI 5 WHY PADA DEFECT WASTE

Defect	Why 1	Why 2	Why 3	Why 4	Why 5
Dimensi potong-tekok plat tidak sesuai	Mesin tidak akurat	Setting mesin tidak optimal	Cutting process tidak tepat		
	Operator salah melakukan proses produksi	Drawing dan cutting process tidak tepat	Tidak ada mal atau profil potong-tekok		
Ditemukan cacat hasil pengelasan	Inspeksi NDT	Paramater pengelasan belum terpenuhi	Pengelasan tidak berjalan sesuai dengan prosedur	Pekerja belum sesuai WPS	Welder dan Welding Inspector belum tersertifikasi
Dimensi assembly hasil pengelasan tidak sesuai	Inspeksi dilakukan secaravisual	Proses fit-up belum optimal	Belum ada alat pemegang benda kerja (jig-fixture)		

Berdasarkan analisis 5 *why's* dapat di ketahui bahwa terdapat beberapa *defect*, yaitu dimensi potong-tekok plat tidak sesuai toleransi, cacat hasil pengelasan, dan dimensi *assembly* hasil pengelasan tidak sesuai toleransi. *Defect* dari dimensi potong-tekok plat tidak sesuai toleransi disebabkan oleh belum adanya mal atau profil potong tekuk dan penggunaan mesin *cutting oxy flame* masih secara manual. Untuk menghindari *defect* ini maka perlu melakukan penggantian pada mesin CNC *cutting* sehingga proses produksi melalui proses komputerisasi *numerical code* sehingga hasil produksi *cutting* tidak memiliki *defect* [19]. *Defect* cacat hasil pengelasan ditemukan setelah di lakukan inspeksi *Non-Destructive Test* (NDT) menggunakan *Penetrant Test* (PT).

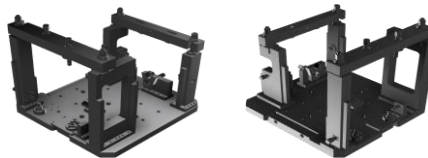


Gambar 7. Proses *Fit-up* Pengelasan

Cacat yang di temukan berupa *cracking* pada hasil pengelasan, dan terdapat kemiringan serta deformasi, sehingga harus di lakukan *rework* terhadap hasil pengelasan [20]. Cacat *cracking* umumnya di sebabkan oleh area *welding* yang terkontaminasi dan kecepatan *welding* yang tidak stabil serta arus mesin *welding* yang tidak stabil sehingga menyebabkan cacat *cracking*, seperti pada Gambar 7. Cacat *cracking* ini tidak dapat di hindari 100% dikarenakan faktor penyebabnya yang sangat bervariasi, namun terdapat tindakan pencegahan yang dapat menghindari cacat ini yaitu sebagai berikut: (1) melakukan *welding* pada lokasi yang tertutup serta dilakukan pembersihan dari kontaminasi pada benda kerja secara berkala, (2) Untuk menanggulagi penyebab kecepatan *welding* yang tidak stabil maka operator harus mengikuti sertifikasi welder, sehingga kualitas hasil welder akan menjadi lebih baik.

Untuk *defect* dimensi *assembly* hasil pengelasan tidak sesuai toleransi di sebabkan oleh belum adanya *jig fixture* dalam proses *fit-up* dengan *spot welding* dan juga saat pengelasan *assembly*, seperti Gambar 8. Dengan tidak adanya pemegang komponen dan penepat alat potong maka petugas mekanik hanya mengandalkan titik penanda yang telah diukur sebelumnya [21].

Untuk mengatasi *defect* ini maka perlu di rancang *Jig-fixture* untuk memegang, mengunci dan menepatkan posisi plat sebelum di lakukan *spot welding* [4], [21], seperti pada Gambar 8 Perancangan *Jig-fixture* diawali dengan kalibrasi posisi *locator pin* sesuai dengan spesifikasi dari *coal nozzle burner*. Setelah *Jig-fixture* dikalibrasi, material plat baja yang akan di las di letakan sesuai dengan *locator pin*, seperti pada gambar 8, sehingga posisi dari plat baja yang dilas akan sesuai dengan spesifikasi produk dan tidak akan bergeser selama proses pengelasan dilakukan.



Gambar 8. Rancangan *Jig-fixture*

Untuk mengetahui investasi *jig and fixture* adalah menguntungkan maka beberapa dipakai *benefit-cost* (B/C) rasio, *net present value* (NPV) dan *payback periode* [1], seperti terlihat pada tabel IV.

TABEL IV. PERHITUNGAN FINANSIAL DARI INVESTAASI *JIG AND FIXTURE*.

<i>Expected Benefits Calculation</i>							
<i>Description</i>	<i>Periods</i>						TOTAL
	0	1	2	3	4	5	
<i>investasi Jig and Fixture</i>	45.411.430						
Total pengeluaran		27.255.155	-28.345.362	29.479.176	-30.658.343	31.884.677	
<i>Profit</i>		77.396.845	76.306.638	75.172.824	73.993.657	72.767.323	
<i>Cash Flow</i>	45.411.430	31.985.415	108.292.053	183.464.877	257.458.534	330.225.857	
<i>Present Value</i>		74.420.043	70.549.777	66.828.367	63.250.088	59.809.435	334,446,280

Selanjutnya dapat dihitung *benefit-cost ratio* adalah 7.37 artinya lebih dari 1. Ini menunjukkan bahwa alternatif solusi pemakaian *jig and fixture* adalah menguntungkan. Dengan pemakaian *Microsoft Excel* maka dapat dihitung *Net Present Value*, NPV = 334,446,280 (positive). Nilai ini menunjukkan bahwa alternatif solusi pemakaian *jig and fixture* adalah menguntungkan. Demikian pula perhitungan *payback period* diperoleh nilai 0.586734902 bila dikonversikan ke dalam waktu adalah 7 bulan; yang berarti bahwa investasi untuk pemakaian *jig and fixture* akan kembali setelah 1 tahun. Dengan pemakaian *jig and fixture* terjadi penurunan prosentase *defect* sampai 30 %, dan terjadi penurunan waktu proses produksi dan penurunan total waktu *delay*, seperti pada table V.

TABEL V. PERBEDAAN KONDISI *EXISTING* DAN *IMPROVEMENT* PRODUKSI COAL NOZZEL BURNER

Parameter	<i>Existing</i> (menit)	<i>improvement</i> (menit)	Selisih (menit)
Total waktu proses produksi	2420	2020	400
Total <i>delay</i> / <i>waiting</i>	1620	1200	420

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Berikut adalah kesimpulan dari serangkaian proses penelitian.

1. Ranging *waste* pada proses produksi *coal nozzle burner* yaitu *Defect, Overproduction, Waiting, Transportation, Motion, Environmental, Healthy, and Safety, Excess Processing, Not Utilizing Employees Knowledge, Skills and Abilities, dan Inventory*.
2. Berdasarkan analisa maka persentase jumlah *defect* tertinggi berada di proses produksi *welding* dengan presentase sebesar 15% dan pada proses *cutting* dengan presentase 6%.
3. Rekomendasi Perbaikan berdasarkan adalah penggunaan mesin CNC *laser cutting* dalam proses pemotongan plat, penggunaan ruangan tertutup dalam proses *welding*, dan dilakukan sertifikasi bagi *welder*, serta penggunaan *Jig-fixture* dalam proses *fitting*.
4. Terjadi penurunan prosentase *defect* sampai 30 %, terjadi penurunan waktu proses produksi dan penurunan total waktu *delay*.

Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya berdasarkan hasil analisis dari penelitian yang telah dilaksanakan yaitu untuk penilaian terhadap alternatif rekomendasi perbaikan, sebaiknya dapat diaplikasikan dan dilakukan proses *control*. Dengan demikian, hasil implementasi dapat dievaluasi sehingga perusahaan dapat melakukan perbaikan yang berkelanjutan untuk menghilangkan semua *waste* yang ada. Penelitian diharapkan dapat mengidentifikasi dan merancang rekomendasi untuk proses produksi komponen lainnya.

REFERENCES

- [1] J. Singh and H. Singh, "Erosion behavior of pulverized coal burner nozzle material hardfaced by solid wire and flux cored wire electrode," *Mater. Sci. Forum*, vol. 808, no. December 2014, pp. 1–9, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.808.1.
- [2] T. J. Rosfjord, "Staged combustor evaluation of low rank coal fuels," *Proc. ASME Turbo Expo*, vol. 3, 1988, doi: 10.1115/88-GT-91.
- [3] M. J. Kim and J. H. Park, "New estimation method of limit pressures for thick curved pipes under internal pressure applicable to various bend angles," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e14709, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14709.
- [4] A. Khanlari, K. Mohammadi, and B. Sohrabi, "Prioritizing equipments for preventive maintenance (PM) activities using fuzzy rules," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 54, no. 2, pp. 169–184, 2008, doi: 10.1016/j.cie.2007.07.002.
- [5] C. V. Vasconcellos de Magalhaes Castro and J. B. De Camargo Junior, "The benefits and challenges of a continuous improvement area in a manufacturing plant," *Quaestum*, vol. 1, pp. 1–6, 2020, doi: 10.22167/2675-441x-20200528.
- [6] V. Gupta, R. Jain, M. L. Meena, and G. S. Dangayach, "Six-sigma application in tire-manufacturing company: a case study," *J. Ind. Eng. Int.*, vol. 14, no. 3, pp. 511–520, 2018, doi: 10.1007/s40092-017-0234-6.
- [7] J. Bhattacharya, M. P. Pharmaceuticals, M. B. A. Hrm, and M. P. Management, "Root Cause Analysis – A Practice to Understanding and Control the Failure Management in Manufacturing Industry," *Int. J. Bus. Manag. Invent.*, vol. 3, no. 10, pp. 12–20, 2014.
- [8] S. Sachin and J. Dileplal, "Six Sigma Methodology for Improving Manufacturing Process in a Foundry Industry," vol. 6495, no. 5, 2017.
- [9] K. Venkataraman, "Design of Jigs, Fixtures and Press Tools," *Des. Jigs, Fixtures Press Tools*, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-76533-0.
- [10] H. Al Haiany, *Reliability Centered Maintenance Different Implementation Approaches*. 2016.
- [11] P. Harikumar and P. G. Saleehya, "Integrating FMEA, QFD and Lean for Risk management in hospitals," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 577, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/577/1/012040.
- [12] N. Ramasamy and D. Jeyasimman, "Performance Analysis of Chromium Carbide Overlay in Coal Nozzle Tip for Utility Boilers," *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 2122–2127, 2020, doi: 10.35940/ijitee.c8743.019320.
- [13] A. Islam, H. Roy, and M. M. Rahman, "Energy efficiency study of household natural gas burner using pot-bottom shield and modified pot arrangement," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 12871–12885, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.09.136.
- [14] G. S. S. Goyal, "Improvement in Productivity of Leaf Spring Manufacturing Through Value Stream Mapping: A Case Study," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 7, no. 5, pp. 844–847, 2018, doi: 10.21275/ART20182559.
- [15] K. Siregar and Elvira, "Quality control analysis to reduce defect product and increase production speed using lean six sigma method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 801, no. 1, pp. 0–8, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/801/1/012104.
- [16] T. Laosirihongthong, D. Adebajo, P. Samaranayake, N. Subramanian, and S. Boon-itt, "Prioritizing warehouse performance measures in contemporary supply chains," *Int. J. Product. Perform. Manag.*, vol. 67, no. 9, pp. 1703–1726, 2018, doi: 10.1108/IJPPM-03-2018-0105.
- [17] V. Dorokhov, G. Kuznetsov, and G. Nyashina, "Combustion of Coal and Coal Slime in Steam-Air Environment and in Slurry Form," *Energies*, vol. 15, no. 24, 2022, doi: 10.3390/en15249591.
- [18] T. G. Dan, "Konfigurasi permukaan," *Univ. Pancasila*, p. 12, 2012, [Online]. Available: <https://laskarteknik.co.id/wp-content/uploads/2012/12/konfigurasi-permukaan.pdf>.
- [19] A. M. H. Pereira, M. R. Silva, M. A. G. Domingues, and J. C. Sá, "Lean six sigma approach to improve the production process in the mould industry: A case study," *Qual. Innov. Prosper.*, vol. 23, no. 3, pp. 103–121, 2019, doi: 10.12776/QIP.V23I3.1334.
- [20] R. J. Eleftheriadis and O. Myklebust, "A guideline of quality steps towards zero defect manufacturing in industry," *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag.*, pp. 332–340, 2016.
- [21] H. Supriyanto, M. L. Reyfasha, and M. F. R. Supriyanto, "Increasing the Sigma Level and Customer Value in the Manufacturing Industry: A Case Study of Cover Components," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 26–34, 2024, doi: 10.18178/ijmerr.13.1.26-34.