

# PENGUNAAN METODE *RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE* UNTUK MENJAGA KEHANDALAN MATERIAL *BELT CONVEYOR*

**Djoeli Satrijo**

Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
djoeli\_satrijo@yahoo.com

**Agus Suprihanto**

Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
agusm90@lecturer.undip.ac.id

**Ojo Kurdi**

Departemen Teknik Mesin,  
Fakultas Teknik,  
Universitas Diponegoro  
ojokurdi@ft.undip.ac.id

**Dwi Basuki Wibowo**

Departemen Teknik Mesin,  
Fakultas Teknik,  
Universitas Diponegoro  
dwibasukiwibowo@lecturer.undip.ac.id

**Gunawan Dwi Haryadi**

Departemen Teknik Mesin,  
Fakultas Teknik,  
Universitas Diponegoro  
gunawandwiharyadi@lecturer.undip.ac.id

**Yusuf Umardani**

Departemen Teknik Mesin,  
Fakultas Teknik,  
Universitas Diponegoro  
yusufumardani@lecturer.undip.ac.id

**Khoiri Rozi**

Departemen Teknik Mesin,  
Fakultas Teknik,  
Universitas Diponegoro  
khoiri.rozi@yahoo.com

**Muhammad Fakhri Aji Pratomo**

Departemen Teknik Mesin,  
Fakultas Teknik,  
Universitas Diponegoro  
ajikun0707@yahoo.com

## ABSTRAK

Alat transportasi berperan penting dalam mengangkut material konsentrat untuk diolah dalam pabrik *smelter* secara kontinyu. Peralatan tersebut dijaga agar selalu beroperasi tanpa ada kerusakan. Kerusakan alat dapat mengakibatkan terhentinya proses produksi. Oleh karena itu manajemen peralatan pabrik sangat penting, dengan melakukan *maintenance* secara berkala untuk menghindari kejadian yang tidak diinginkan. Permasalahan yang sering terjadi pada salah satu alat yaitu *belt conveyor* adalah adanya tumpahan material ketika beroperasi. Penelitian ini menerapkan metode *Reliability Centered Maintenance* untuk mengetahui solusi yang tepat atas permasalahan sehingga material *belt conveyor* memiliki kehandalan yang tinggi dan umur pakainya meningkat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *failure mode* yang terjadi pada *belt conveyor* merupakan kategori C dan memiliki persentase terbesar sehingga dampak kerugian ekonominya relatif kecil. Namun tetap demikian kemungkinan terjadinya *outage* pada *plant* tetap harus diperhatikan.

**Kata kunci:** alat transportasi, konveyor sabuk, perawatan, *Reliability-Centered Maintenance*, RCM.

## PENDAHULUAN

Dalam pabrik industri terdapat sejumlah bangunan dan instalasi yang beroperasi dalam menghasilkan produk-produk yang akan dikirim untuk dapat diproses oleh masing-masing instalasi. Alat transportasi berperan penting dalam

pengangkutan material konsentrat untuk diolah dalam pabrik *smelter*, oleh karena itu alat transportasi harus dijaga agar selalu beroperasi tanpa ada kerusakan yang dapat mengakibatkan terhentinya proses produksi. Kesalahan atau *failure* dalam proses transportasi konsentrat dapat mengakibatkan terhambatnya pabrik.

Operasi *maintenance* secara berkala dilakukan untuk menjaga peralatan pabrik beroperasi dengan baik dan menghindari kejadian yang tidak diinginkan. Di pabrik industri terdapat *shutdown* yang terjadwal secara mingguan, bulanan, dan *bi-annual* (dua tahun sekali) untuk menjaga operasi berjalan dengan baik.

Salah satu alat transportasi yang digunakan adalah *belt conveyor*. Alat ini dipakai untuk mengangkut konsentrat dengan meletakkan di atas *belt* yang akan bergerak sejauh jarak kedua ujung *pulley* dengan kecepatan konstan dan kontinyu. *Conveyor* merupakan alat transportasi sederhana namun efisien dalam operasi pabrik industri besar yang beroperasi 24 jam non-stop.

## DASAR TEORI DAN METODE

*Conveyor* merupakan sistem perangkat atau rakitan mekanis yang mengangkut material dengan sedikit usaha. Meskipun ada banyak jenis sistem *conveyor*, sistem ini biasanya terdiri dari kerangka yang menopang rol, roda, atau sabuk, tempat material berpindah dari satu tempat ke tempat lain. *Conveyor* digerakkan oleh motor, gravitasi, atau secara manual. Sistem penanganan material ini tersedia dalam berbagai variasi untuk menyesuaikan dengan produk atau material yang perlu diangkut.

Pemeliharaan atau *maintenance* merupakan aktivitas untuk merawat fasilitas dan peralatan agar senantiasa dalam keadaan siap pakai untuk mendukung produksi secara efektif dan efisien sesuai jadwal. Pemeliharaan membantu usaha mencapai operasi manufaktur dengan keandalan tinggi, memaksimalkan keluaran, serta meminimalkan biaya dan limbah. Hal ini memungkinkan perusahaan mendapatkan hasil maksimal dari aset yang ada dengan: a) mendefinisikan kembali peran pemeliharaan sebagai bagian dari program keandalan pabrik secara total, b) menyediakan infrastruktur dan proses, serta c) keterlibatan karyawan yang meningkatkan hasil dan total harga pokok penjualan yang lebih rendah. Secara khusus akan membawa perubahan seperti menurunkan biaya unit produksi, mengurangi biaya pemeliharaan, meningkatkan stabilitas proses dan sejenisnya [1].

*Maintenance* secara umum terbagi menjadi beberapa jenis yaitu perawatan alat atau fasilitas yang dirawat, sebagai berikut:

1. *Preventive Maintenance* (PM).

Merupakan perawatan yang dilaksanakan secara *periodic* dengan rentang waktu yang sudah ditentukan, untuk mencegah timbulnya kerusakan pada fasilitas produksi dengan mengganti alat-alat yang sudah aus atau tidak layak lagi untuk digunakan pada *belt conveyor*.

2. *Corrective Maintenance* (CM).

Merupakan perawatan berdasarkan kondisi *conveyor* dengan adanya tanda cacat atau *failure* diluar prediksi. *Preventive Maintenance* yang terencana dengan baik akan meminimalkan terjadinya kegagalan mendadak pada *conveyor*.

3. *Breakdown Maintenance*.

Merupakan perawatan yang dilakukan ketika suatu alat atau fasilitas mengalami kerusakan yang mengakibatkan peralatan tersebut tidak dapat beroperasi normal atau berhenti total sehingga tidak bisa di operasikan sebelum diperbaiki. *Breakdown maintenance* harus dihindari karena dapat mengakibatkan kerugian operasional produksi mesin yang berujung tidak tercapainya *output* produksi pada *plant availability*. Apabila terjadi *breakdown maintenance*, maka jadwal *outage maintenance* dialihkan untuk meningkatkan efisiensi produksi.

4. *Outage Maintenance*.

Adalah pemeliharaan yang melakukan *preventive maintenance* secara keseluruhan dengan menghentikan operasi alat dalam waktu yang ditentukan. Kegiatan pemeliharaan pemadaman sangat penting untuk memperpanjang *lifespan* dan keandalan peralatan pabrik seperti *conveyor*.

**Reliability-Centered Maintenance (RCM)**

*Maintenance* berasal dari kata “*to maintain*” yang memiliki arti “merawat” dan setara dengan kata “*to repair*” yang berarti “memperbaiki”.

*Maintenance* adalah tindakan merawat atau memperbaiki suatu komponen agar dapat digunakan kembali dan berumur panjang. Pekerjaan ini dilakukan secara berurutan untuk menjaga atau memperbaiki fasilitas yang ada sehingga sesuai dengan standar [6].

*Reliability Centered Maintenance* (RCM) merupakan metode analisis pemeliharaan yang digunakan untuk memperbaiki sistem pemeliharaan dengan fokus untuk meningkatkan keandalan. Pendekatan pemeliharaan menggabungkan praktek dan strategi PM dan CM untuk memaksimalkan umur (*life time*) dan fungsi asset, sistem atau *equipment* dengan biaya minimal. Konsep dari RCM adalah bahwa semua komponen memiliki batas umur. Jumlah kegagalan yang umum terjadi mengikuti kurva bak mandi (*bathtub curve*). Kurva ini menggambarkan umur pakai suatu alat, dimana semakin lama pemakaian, semakin tinggi biaya perawatannya.

Metode RCM sudah lama dipakai di berbagai sektor industri. Pada umumnya perangkat lunak komputer (*software*) untuk RCM merupakan perangkat lunak berlisensi dan hanya bisa bekerja untuk satu komputer saja. Pengembangan RCM berbasis *web* saat ini merupakan sistem informasi yang mendukung perawatan dan dapat bekerja dalam jaringan intranet atau internet. Perangkat lunak ini berlisensi *Free Open Source Software* (FOSS) atau GPL (*General Public License*), memungkinkan pengguna untuk melakukan duplikasi serta mengubah jika diperlukan pada perangkat lunak tersebut (*free software*) [2].

RCM memiliki metode tujuh langkah. Metode ini menjamin dokumentasi yang tercatat dengan tepat bagaimana tugas pemeliharaan dipilih dan mengapa ini adalah pilihan terbaik di antara sejumlah alternatif yang bersaing. Tujuh langkah ini meliputi [3]:

1. Pemilihan Sistem dan Pengumpulan Data.

Pemilihan sistem dapat didasarkan pada beberapa aspek kriteria seperti sistem dengan jumlah *corrective maintenance*, biaya pengeluaran dan jumlah *preventive maintenance* yang tinggi atau sistem yang paling berkontribusi terhadap terjadinya pemberhentian operasi pabrik [3].

2. Definisi Batasan Sistem.

Identifikasi suatu sistem bergantung pada berbagai factor yaitu kompleksitas pabrik, peraturan dan batasan pemerintah, praktik industri lokal atau unik, struktur keuangan perusahaan, dan lain-lain. Meski definisi dan batasan sistem bruto telah diidentifikasi untuk kasus-kasus tertentu dan dapat digunakan untuk efek yang baik di langkah pertama namun tidak cukup untuk analisis lebih lanjut. Oleh karenanya identifikasi batas yang terperinci dan tepat, sangat penting [3].

3. Deskripsi Sistem dan Diagram Blok Fungsional. Deskripsi sistem dan diagram blok merupakan representasi dari fungsi-fungsi utama sistem lewat

simbol blok. Simbol ini berisi fungsi–fungsi setiap sub sistem yang menyusun sistem tersebut [3].

#### 4. System Function dan Kegagalan Fungsional.

Fungsi merupakan kinerja yang diharapkan oleh suatu sistem untuk dapat beroperasi. *Functional failure* (FF) merupakan ketidakmampuan suatu komponen atau sistem dalam memenuhi standar prestasi yang diharapkan [3].

#### 5. Failure Mode and Effective Analysis (FMEA)

FMEA disusun berdasarkan fungsi komponen dan laporan perawatan sehingga dapat ditentukan penyebab kegagalan fungsi serta dampak yang diakibatkan dari kegagalan tersebut. Penilaian dilakukan dengan tiga variabel yaitu *severity*, *occurrence* dan *detection*. Persamaan untuk menghitung *risk priority number* (RPN) adalah sebagai berikut [4]:

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

dimana S adalah *severity*, O adalah *occurrence*, dan D adalah *detection*. Variabel S merupakan penilaian tingkat keseriusan suatu efek atau akibat dari potensi kegagalan pada proses yang dianalisis [7]. Dampak dinyatakan dengan *rating* mulai dari skala 1 sampai 10. Skala 1 merupakan dampak paling ringan sedangkan 10 adalah dampak terburuk [4]. Detail *rating severity* tertera pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Skala tingkat kerusakan (*Severity*)

Level	Severity	Deskripsi
1	Tidak ada efek	tidak ada efek
2	Sangat kecil	efek yang diabaikan pada kinerja sistem
3	kecil	sedikit berpengaruh pada kinerja sistem
4	sangat rendah	efek yang kecil pada performa sistem
5	rendah	mengalami penurunan kinerja secara bertahap
6	sedang	sistem yang beroperasi mengalami penurunan performa yang mempengaruhi output
7	tinggi	sistem beroperasi namun tidak dapat dijalan secara penuh
8	sangat tinggi	sistem tidak beroperasi
9	berbahaya dengan peringatan	kegagalan sistem yang menghasilkan efek berbahaya
10	berbahaya tanpa peringatan	kegagalan sistem yang menghasilkan efek sangat berbahaya

*Occurrence* merupakan *rating* yang mengacu kepada frekuensi terjadinya cacat pada produk. Frekuensi kegagalan menunjukkan adanya ulangan suatu masalah yang terjadi akibat *potential cause* [4]. Nilai yang menjabarkan penentuan *occurrence rating* tertera pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2 Skala frekuensi kerusakan (*Occurrence*)

Level	Occurrence	Intensitas Kerusakan
1	Tidak ada efek	Hampir tidak ada kegagalan
2	Rendah	Sangat kecil terjadi kegagalan
3		
4	Sedang	Jarang terjadi kegagalan
5		
6		
7	Tinggi	Kegagalan yang berulang
8		
9	Sangat Tinggi	Sering gagal
10		

*Detection* adalah sebuah kontrol proses yang mendeteksi secara spesifik akar penyebab kegagalan [4]. Pengukuran untuk pengendalian kegagalan dilakukan dengan skala pada Tabel 3.

Tabel 3 Skala Tingkat Deteksi (*Detection*)

Level	Tingkat Deteksi	Kriteria
1	Hampir Pasti	Pemeriksaan selalu mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
2	Sangat Tinggi	Pemeriksaan memiliki kemungkinan sangat tinggi untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
3	Tinggi	Pemeriksaan memiliki kemungkinan tinggi untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
4	Menengah Keatas	Pemeriksaan memiliki kemungkinan <i>moderately high</i> untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
5	Sedang	Pemeriksaan memiliki kemungkinan <i>moderate</i> untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
6	Rendah	Pemeriksaan memiliki kemungkinan rendah untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
7	Sangat Rendah	Pemeriksaan memiliki kemungkinan sangat rendah untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
8	Kecil	Pemeriksaan memiliki kemungkinan kecil untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
9	Sangat Kecil	Pemeriksaan memiliki kemungkinan sangat kecil untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan
10	Tidak Pasti	Pemeriksaan selalu tidak mampu mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme dan mode kegagalan

#### 6. Logic or Decision Tree Analysis (LTA)

LTA bertujuan untuk memprioritaskan lebih lanjut sumber daya yang akan digunakan pada setiap

mode kegagalan. Hal ini dilakukan karena dampak setiap mode kegagalan terhadap keseluruhan *plant* tidak sama. Skema logis apapun dapat diadopsi untuk melakukan pemeringkatan ini. RCM memproses logika tiga pertanyaan sederhana dan intuitif dari struktur keputusan sehingga memungkinkan pengguna, dengan sedikit usaha, untuk menempatkan setiap mode kegagalan ke dalam salah satu dari empat kategori. Setiap pertanyaan dijawab ya atau tidak. Setiap kategori yang dikenal sebagai *bin* membentuk pemisahan alami dari *item* dengan kepentingan masing-masing. Pada skema ini terdapat tiga kategori dan satu katogeri D yang merupakan *hidden failure*, menjelaskan apakah operator sadar apakah kegagalan ini diketahui saat bertugas? Jika tidak maka dilanjutkan ke kategori A yang merupakan masalah keamanan atau *safety issue*, menjelaskan apakah kegagalan tersebut berhubungan dengan keselamatan pekerja? Selanjutnya diakhiri dengan kategori B dan C. Kategori B berhubungan dengan terjadinya *outage issue* atau pemadaman pabrik. Kategori C merupakan masalah *minor* dan dengan dampak kerugian ekonomi yang relatif kecil.

Mekanisme ini membuat suatu alat masuk dalam kategori A, B, C, D/A, D/B atau D/C. Untuk skema prioritas, A dan B memiliki prioritas lebih tinggi daripada C dalam hal alokasi sumber daya yang langka, selain itu A diberi prioritas lebih tinggi dari B [3].

#### 7. Pemilihan Tindakan

Pemilihan tindakan adalah langkah terakhir pada metode analisa menggunakan RCM. Tiap mode kerusakan dibuat daftar tindakan yang mungkin untuk dilakukan dan selanjutnya memilih tindakan yang paling efektif. Diagram alir pemilihan tindakan tertera pada [5]. Dalam pelaksanaannya

pemilihan tindakan dapat dilakukan dengan empat cara, yaitu:

##### a. *Time Directed* (TD)

Tindakan pencegahan langsung terhadap sumber kerusakan peralatan berdasarkan waktu atau umur komponen.

##### b. *Condition Directed* (TD)

Tindakan mendeteksi kerusakan dengan memeriksa alat. Apabila ditemukan gejala-gejala kerusakan maka dilanjutkan dengan perbaikan atau penggantian komponen.

##### c. *Failure Finding* (FF)

Tindakan untuk menemukan kerusakan peralatan yang tersembunyi dengan pemeriksaan berkala.

##### d. *Run to Failure* (RTF)

Suatu tindakan menggunakan peralatan sampai rusak, karena tidak ada tindakan ekonomis lain yang dapat dilakukan untuk mencegah kerusakan.

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Hasil dari analisis menunjukkan bahwa *belt conveyor* memiliki fungsi sistem dan kegagalan fungsional sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 *System function and functional failure*

Nama Alat	Fungsi	Kegagalan Fungsi
<i>Wet Conc Belt Conveyor</i>	Alat transportasi konsentrat tembaga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Material Spillage</i></li> <li>• <i>Component Damage</i></li> <li>• <i>Belt Damage</i></li> <li>• <i>Structure Damage</i></li> </ul>

#### 1. *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan *Failure Mode and Effect Analysis*.

Tabel 5 *Failure Mode and Effect Analysis*

Name	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	SEV	Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure	Occur	Detect	RPN	RPN%
<i>Wet conc belt conveyor</i>	<i>Material spillage / carry back</i>	<i>Material spillage</i>	6	<i>Rule Zero, idlers miring</i>	7	2	84	11,4
	<i>Belt Loading Not Central (vibrating Feeder)</i>	<i>Material spillage</i>	4	<i>Gravity</i>	5	2	40	5,44
	<i>Extreme weather</i>	<i>Material spillage</i>	6	<i>Strong wind, rain causing slippage, etc</i>	6	5	180	24,5
	<i>Not enough belt tension</i>	<i>Belt damage</i>	5	<i>Belt memuai, built up tension, material aus</i>	3	6	90	12,2
	<i>Roller Seized or Uneven</i>	<i>Structure damage</i>	5	<i>Belt Miss track</i>	3	3	45	6,12
	<i>Belt chamber</i>	<i>Belt damage</i>	2	<i>belt storage management</i>	2	2	8	1,09
	<i>Wear on Parts</i>	<i>Componenet damage</i>	6	<i>Pelumasan, kontaminasi lingkungan.</i>	8	6	288	39,2
					Total		735	100

2. *Logic or Decision Tree Analysis (LTA)*

Tabel 6 menunjukkan hasil analisis LTA yaitu tahapan setelah perhitungan FMEA.

Tabel 6. *Logic or Decision Tree Analysis.*

Nama	Failure Mode	Failure Effect			Category
		Evident	Safety	Outage	
Wet Conc Belt Conveyor	Material Spillage / Carry Back	Y	Y	N	C
	Extreme Weather	N	Y	N	D/C
	Not Enough Belt Tension	Y	Y	N	C
	Roller Seized or Uneven	Y	Y	Y	B
	Belt Chamber	Y	Y	N	C
	Wear on Parts	Y	Y	Y	B
	Belt Loading Not Central	N	Y	N	D/C

Tabel 6 tersebut berisi data hasil analisis mengenai keseluruhan bagian *belt conveyor*. Dapat disimpulkan bahwa *failure mode* kategori A sebesar 0%, kategori B 28,6%, kategori C 42,8%, dan kategori D 28,6%.

3. *Pemilihan Tindakan*

Pemilihan tindakan kerusakan (TD, CD, FF dan RTF) ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7 *Pemilihan Tindakan Kerusakan*

Nama Alat	Failure mode	Usulan tindakan	Saran
Wet Conc Belt Conveyor	Material Spillage / Carry Back	CD	Adjustment pada <i>Scraper</i> agar tidak ada material yang menempel saat <i>carry back</i> .
	Extreme Weather	CD	Pemberian <i>cover</i> pada <i>belt conveyor</i> untuk menjaga dari angin dan hujan.
	Not Enough Belt Tension	TD	Pemeriksaan berkala pada <i>belt tension</i> .
	Roller Seized or Uneven	TD	Pemeriksaan berkala pada <i>roller</i> .
	Belt Chamber	FF	Pemeriksaan berkala kualitas dan <i>storage management</i> yang sesuai.
	Wear on Parts	TD	Pemeriksaan berkala pada <i>parts conveyor</i> .
	Belt Loading Not Central	FF	Pemeriksaan berkala visual kondisi <i>feeder</i> .

**KESIMPULAN**

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Masalah utama pada *belt conveyor* yaitu material jatuh dari *belt* saat diangkut merupakan kegagalan minor karena nilai *risk priority number (RPN)* rendah yaitu 11,4%.
2. Data *Failure Mode and Effective Analysis (FMEA)* menunjukkan tujuh penyebab potensi kegagalan. Potensi kegagalan tertinggi terlihat dari persentase RPN yaitu 39,2%. Hal ini mengindikasikan salah satu *part* yang aus yaitu *bearing* karena kontaminasi lingkungan.
3. *Logic Tree Analysis (LTA)* menunjukkan adanya empat kategori *failure mode*, dengan kategori A, B, C dan D masing – masing sebesar 0%, 28,6%, 42,8%, dan 28,6%.
4. *Failure mode* yang terjadi pada *belt conveyor* merupakan kategori C karena memiliki persentase terbesar dengan dampak kerugian ekonomi yang relatif kecil. Kemungkinan terjadinya *outage* pada *plant* tetap harus diperhatikan.
5. Untuk mencegah terjadinya mode kegagalan kategori C, perlu dilakukan perawatan rutin (PM) dan inspeksi secara berkala.
6. Metode perawatan RCM akan meningkatkan kehandalan material *belt conveyor* dengan berkurangnya keausan pada komponen *conveyor* tersebut.

**REFERENSI**

1. Keith, M. R., Higgins, L. R., Wikoff, D. J., 2008, *Maintenance Engineering Handbook 7th Edition*. Mc-GrawHill Co., Inc.
2. Tahril, M. A., Suprawhardana, M. S., Pudji, T. P., 2010, “Penerapan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) Berbasis Web pada Sistem Pendingin Primer di Reaktor Serba Guna GA”, Siwabessy, JFN 4 (1).
3. Siddiqui, A. W. and Ben-Daiya, M., 2009, *Reliability Centered Maintenance*.
4. McDermott, R. E., Mikulak, R. J., Beauregard, M.R., 2009, *The Basic of FMEA 2<sup>nd</sup> Ed.*, Taylor and Francis Group, New York.
5. Moubray, J., 1997, *Reliability-Centered Maintenance*, Industrial Press Inc.
6. Teoh, P. C., Case, K., 2005, “An Evaluation of Failure Modes and Effect Analysis Generation Method for Conceptual Design”, Int. J. Computer Integrated Manufacturing 18 (4), pp. 279-293.