

Analisa Keprofesionalan dan K3 dalam Manajemen Waste pada Proyek Konstruksi Rumah Tinggal di Surabaya

Daniel Mulyono Kresnadi, Surya Hermawan, Susmarsongko Budi Prasetyo
Prodi Pendidikan Profesi Insinyur, Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto no. 121-131, Surabaya
danielmk_2@yahoo.com
shermawan@petra.ac.id
susmarsongko@yahoo.com

Abstract— Reinforced steel is one of the materials that is frequently utilized in construction projects. Unefficient material management will result in wastage of material and excessive waste material, which will result in increased project costs and become waste for the environment which can endanger the Occupational Health and Safety (OHS) of construction workers. This research optimizes the waste and pay attention to OHS. The waste of reinforced steel is optimizing with the integer linear programming method using the MATLAB program. The data used is a two-storey residential construction project in Surabaya. The results of the optimization process are 31 cutting patterns used to reduce waste from the 112 cutting patterns produced. The used of reinforced steel of 10 mm can be saved by 5 bars or 4.032% with a waste of 10.09 m. The effort to maintain OHS are to use Personal Protective Equipment (PPE) and pay attention to the placement of waste so that it does not endanger workers. This research succeeded in optimizing the cutting of reinforcement by reducing waste by 4.032% while still paying attention to K3.

Intisari— Salah satu material dalam proyek konstruksi yang sering digunakan adalah besi beton bertulang. Pengelolaan material yang kurang efisien dalam proyek konstruksi akan menimbulkan pemborosan material dan timbunan waste material yang berlebihan sehingga menyebabkan naiknya biaya proyek dan dapat membahayakan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) para pekerja konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis upaya untuk meminimalkan waste dari pemotongan tulangan dengan tetap memperhatikan K3. Upaya untuk meminimalkan waste besi beton bertulang adalah dengan melakukan optimasi dengan metode integer linear programming dengan bantuan program MATLAB. Data yang digunakan adalah Proyek Konstruksi rumah tinggal dua lantai di Surabaya. Hasil dari proses optimasi adalah 31 pola pemotongan yang digunakan untuk mengurangi waste dari 112 pola pemotongan yang dihasilkan. Penggunaan besi beton bertulang diameter 10 mm dapat dihemat sebanyak 5 lonjor atau 4,032% dengan waste sebesar 10,09 m. Upaya untuk menjaga K3 adalah dengan menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) dan memperhatikan peletakkan waste agar tidak membahayakan pekerja. Penelitian ini berhasil mengoptimasi pemotongan tulangan dengan mengurangi waste sebesar 4,032% dengan tetap memperhatikan K3.

Kata Kunci — waste, keselamatan dan kesehatan kerja, optimasi, bar bending schedule, integer linear programming.

I. PENDAHULUAN

Industri konstruksi seperti bangunan komersial dan industri, rumah, infrastruktur, dan bangunan lainnya. masih menjadi pilar industri di negara berkembang, termasuk Indonesia. Mayoritas dari bangunan-bangunan ini terbuat dari struktur utama beton bertulang dan memerlukan bahan seperti besi tulangan dengan berbagai panjang, beton, dan bahan lainnya.

Berbagai masalah yang terjadi pada proyek konstruksi dapat menyebabkan pemborosan material dan keterlambatan penyelesaian proyek. Beberapa masalah yang dapat terjadi termasuk desain proyek yang berubah, pekerja yang tidak sesuai, kerjasama yang buruk antar pihak yang terlibat, penggunaan metode kerja konstruksi yang salah, dan kurangnya perencanaan dan pengawasan lapangan yang efektif.

Sisa material konstruksi merupakan sebuah masalah serius karena dapat berdampak besar terhadap anggaran proyek dan berdampak pada lingkungan sehingga berpengaruh pada Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Material besi beton bertulang (*reinforced steel*) adalah

material struktur beton bertulang yang memakan biaya paling besar sekitar 20-30 % keseluruhan biaya proyek [1]. Sehingga dibutuhkan perhitungan yang tepat dan teliti untuk menghitung kebutuhan bahan yang akan digunakan dengan tidak melupakan aspek K3 agar sisa material berupa besi beton bertulang menjadi lebih sedikit dalam suatu konstruksi.

Salah satu metode optimasi pemotongan tulangan ialah dengan metode *linear programming* yang dilakukan oleh Matviyishyn & Janiak [2]. Ada tiga jenis panjang tulangan yang digunakan sebagai sumber data penelitian tersebut.

Oleh karena itu, dalam penelitian bertujuan untuk melakukan optimasi pemotongan tulangan dengan sumber data dari proyek dimana memiliki berbagai macam panjang tulangan menggunakan metode *integer linear programming*. Pada penelitian ini, data yang digunakan adalah pembangunan rumah tinggal dua lantai di Surabaya. Pada penelitian ini akan membahas efisiensi optimasi tercapai dan K3 juga tercapai.

II. LANDASAN TEORI

A. Material Konstruksi

Material konstruksi merupakan inti utama dalam proses pembangunan sebuah proyek konstruksi. Material yang digunakan dalam konstruksi menyerap lebih dari separuh biaya proyek [3]. Ervianto [4] membedakan jenis material dalam tiga kelompok, yaitu:

1. *Engineered materials*, yaitu material yang dirancang khusus berdasarkan perhitungan teknis dan perencanaan. Pada gambar yang digunakan selama proyek berlangsung membahas secara khusus material ini. Penundaan dapat mempengaruhi waktu penyelesaian proyek.
2. *Bulk materials*, yaitu material yang dibuat sesuai dengan standar industri tertentu. Material ini sulit diperkirakan karena memiliki berbagai macam jenisnya seperti pipa, kabel. .
3. *Fabricated materials*, yaitu material yang melakukan perakitan di luar lokasi proyek seperti rangka baja, kusen..

Gavilan dan Bernold [5] menggolongkan material yang digunakan dalam proses pembangunan konstruksi menjadi 2 bagian besar yaitu:

1. *Consumable material*, merupakan material konstruksi yang akan diproses menjadi komponen struktur fisik bangunan, seperti semen, pasir, batu pecah, besi beton, batu bata, keramik, cat.
2. *Non-consumable material*, merupakan material penunjang dalam proses konstruksi, dan tidak menjadi bagian dari struktur fisik bangunan, biasanya material ini dapat dipakai kembali dan pada akhir proyek akan menjadi sisa material juga, seperti: bekisting, perancah, dinding penahan sementara, dan lainnya.

B. Sisa Material Konstruksi

Sisa Material Konstruksi adalah sampah yang berupa sisa material dan sampah konstruksi lainnya yang berasal dari aktivitas pelaksanaan konstruksi, pembongkaran dan pembersihan lahan pada awal pelaksanaan proyek. Penggunaan material di lapangan sering menyisakan material yang cukup besar, sehingga upaya untuk meminimalkan sisa material sangat penting untuk diterapkan, karena selain mempengaruhi biaya proyek juga akan menimbulkan limbah yang mengganggu lingkungan sekitarnya. Sisa material konstruksi dapat dikategorikan menjadi dua bagian [6] yaitu:

1. *Demolition waste* adalah sisa material konstruksi yang dihasilkan dari penghancuran atau pembongkaran bangunan lama.
2. *Construction waste* adalah sisa material konstruksi yang dihasilkan dari pembangunan atau renovasi bangunan pribadi, komersil dan struktur lainnya, seperti sampah yang terdiri dari beton, batu bata, plesteran, kayu, sirap, pipa dan komponen listrik.

Sisa material dapat disebabkan oleh satu atau kombinasi dari berbagai sumber penyebabnya. Menurut Gavilan dan Bernold [5], berbagai sumber penyebab terjadinya sisa material konstruksi dikelompokkan menjadi enam kategori, yaitu desain, pengadaan material, penanganan material, pelaksanaan, residual.

C. Bar Bending Schedule

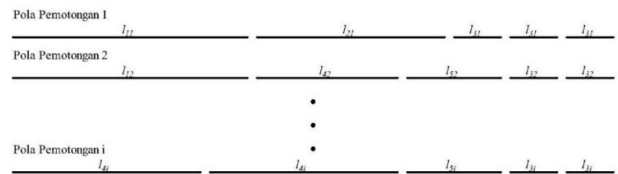
Bar bending schedule adalah sebuah data yang merepresentasi pola pembengkokan tulangan sesuai gambar struktur yang mencakup bentuk, diameter (*d*), panjang dan jumlah pemotongan besi tulangan. Panjang pemotongan besi tulangan memiliki notasi *l_j* dan jumlah kebutuhan potongan besi tulangan memiliki notasi *D_j*. Pembuatan *cutting pattern* atau variasi pola pemotongan tulangan menggunakan data dari *bar bending schedule*. Contoh tabel *bar bending schedule* dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL I
BAR BENDING SCHEDULE

No	Bentuk Tulangan	d (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	l _j (m)	D _j
1		13	4	0	0	4	15
2		13	4	0,5	0	4,5	20
3		13	4	0,5	0,5	5	25

D. Variabel Optimasi Waste Pemotongan Besi Beton Bertulang

Variabel dalam proses optimasi *waste* pemotongan besi beton bertulang adalah *cutting pattern* atau variasi pola pemotongan tulangan [7]. Gambaran dari *cutting pattern* seperti Gambar 1.



Gambar. 1. Gambaran *Cutting Pattern*

di mana:

l_{1i} = Panjang pemotongan tulangan ke-1 pada *cutting pattern* ke-*i*

l_{2i} = Panjang pemotongan tulangan ke-2 pada *cutting pattern* ke-*i*

l_{ji} = Panjang pemotongan tulangan jenis ke-*j* pada *cutting pattern* ke-*i*

Setiap pemotongan tulangan didefinisikan sebagai *l_{ji}*. *j* sebagai variasi panjang pemotongan tulangan dan *i* adalah nomor pola pemotongan tulangan. Variabel *X₁*, *X₂*, ..., dan *X_i* adalah variabel jumlah pemotongan untuk masing masing pola pemotongan.

Terdapat batas atas (*upper bound*) dan batas bawah (*lower bound*) yang digunakan untuk membatasi panjang variabel pola yang dihasilkan. Batas atas adalah Nilai

maksimum dari variabel pola yang dihasilkan. Batas bawah adalah nilai minimum dari variabel pola yang dihasilkan. *Lower bound* dalam proses optimasi *waste* pemotongan tulangan adalah 0. Rumus *upper bound* dalam proses optimasi *waste* pemotongan tulangan dibuat sebagai berikut:

$$\sum_{j=1}^j \frac{D_j \cdot l_j}{L_s} \quad (1)$$

di mana:

D_j = kuantitas *demand*/jumlah.pemotongan tulangan. l_j

l_j =.Panjang tulangan.ke- j

L_s =.Panjang tulangan.utuh yaitu 12m

E. Batasan Optimasi Waste Pemotongan Besi Beton Bertulang

Constraint atau batasan yang diperlukan dalam proses optimasi *waste* pembesian beton bertulang berupa jumlah *demand* untuk tiap panjang tulangan (D_1, D_2, \dots, D_j). Batasan optimasi diperlukan agar jumlah *supply* untuk tiap panjang tulangan (S_1, S_2, \dots, S_j) dapat memenuhi jumlah *demand* yang dibutuhkan.

$$D_1 - S_1 \leq 0 \quad (2)$$

$$D_2 - S_2 \leq 0$$

.

.

$$D_j - S_j \leq 0$$

F. Fungsi Objektif Optimasi Waste Pemotongan Besi Beton Bertulang

Fungsi objektif atau *objective function* adalah fungsi untuk menunjukkan nilai tujuan dari proses optimasi. Fungsi objektif mencari nilai optimal (maksimum/minimum) dari permasalahan yang dihadapi. Fungsi objektif penelitian ini adalah optimasi *waste* pemotongan besi beton bertulang untuk mendapatkan *waste* tulangan yang minimum. Rumus *objective function* dibuat sebagai berikut:

$$f(X) = \left(\sum_{i=1}^i (L_s \cdot X_i - C_i \cdot X_i) + \sum_{j=1}^j |S_j - D_j| \cdot l_j \right) \quad (3)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^i X_i \cdot n_{ji} \quad (4)$$

di mana:

$f(x)$ = Fungsi objektif

L_s = Panjang tulangan standart, yaitu 12m

C_i = Panjang total tulangan dari pola pemotongan ke- i ($l_{1i} + l_{2i} + \dots + l_{ji}$)

X_i = Jumlah kali pemotongan untuk pola pemotongan ke- i

S_j = Jumlah *supply* untuk panjang tulangan ke- j (l_j)

D_j = Jumlah *demand* untuk panjang tulangan ke- j (l_j)

l_j = Panjang tulangan ke- j

n_{ji} =.Banyaknya panjang.tulangan ke- j untuk pola pemotongan ke- i

Final objective function adalah fungsi yang digunakan untuk menyeleksi hasil yang tidak memenuhi Batasan/*constraint* yang telah ditentukan. Rumus *final objective function* dibuat sebagai berikut:

$$F(X) = f(X) + \sum_{j=1}^j \max\{0, (D_j - S_j) \cdot C\} \quad (5)$$

di mana:

$F(X)$ = *Penalty Function*

$f(X)$ = Fungsi objektif

S_j =.Jumlah *supply*.untuk panjang.tulangan ke- j .(l_j)

D_j =.Jumlah *demand*.untuk panjang.tulangan ke- j .(l_j)

C = Konstanta *penalty*

G. Linear Programming

Gilmore dan Gomory [8] adalah mengusulkan metode penyelesaian masalah menggunakan *linear programming*, dengan menggunakan persamaan atau pertidaksamaan linear yang memiliki banyak penyelesaian dengan mempertimbangkan syarat yang ada untuk memperoleh penyelesaian yang optimal (maksimum/minimum). *Linear programming* memiliki tiga komponen dasar yaitu fungsi tujuan (*Objective Function*), fungsi batasan (*Constraint Function*), dan variabel keputusan.

Bentuk umum *linear programming* adalah sebagai berikut:

$$\text{Fungsi Tujuan, } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n \quad (6)$$

$$\text{Fungsi Kendala, } \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq, =, \geq b_i \quad (7)$$

$$\text{Syarat nonnegative, } x_j \geq 0 \quad (8)$$

Untuk $i = 1, 2, \dots, m$ dan $j = 1, 2, \dots, n$

di.mana:

Z =.Fungsi.tujuan.yang.dicari.nilai.optimalnya.(maksimum. atau.minimum)

C_j =.Koefisien.harga.variabel.pengambil.keputusan.dalam fungsi.tujuan,.atau.parameter.yang.dijadikan.kriteria optimasi

X_j =.Variabel.pengambil.keputusan.yang.harus.dicari.atau variabel.aktivitas.(*output*)

a_{ij} =.Konstanta.variabel.aktivitas.ke- j .dalam pembatas/kendala.ke i

b_i =.Kapasitas.sumber. i (yang.berlebih.atau.terbatas) yang tersedia.untuk.dialokasikan.ke.setiap.unit.kegiatan

H. Integer Linear Programming

Integer linear programming atau program linear bilangan bulat adalah *linear programming* dengan variabel keputusannya berupa bilangan bulat (*integer*) tidak negatif. Bentuk umum *integer linear programming* dalam upaya optimasi memaksimalkan/meminimumkan adalah sebagai berikut:

$$\text{Memaksimalkan } z = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \quad (9)$$

$$\text{Fungsi kendala, } \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i \quad (10)$$

$$x_j \geq 0, \text{ integer untuk setiap } x_j$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

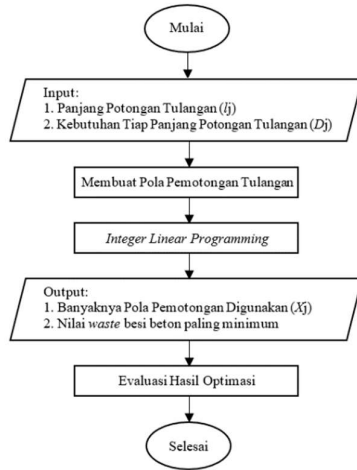
I. Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Istilah Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) sudah dikenal luas sejak tahun 1970-an ketika pemerintah Indonesia mengeluarkan Undang-Undang Nomor 1 tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja. Menurut Peraturan Pemerintah No. 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja, K3 mengatur segala kegiatan untuk melindungi dan menjamin keselamatan tenaga kerja. Penerapannya dilakukan melalui upaya pencegahan kecelakaan kerja dan penyakit akibat pekerjaan yang dijalani.

III. METODE PENELITIAN

Untuk Analisa optimasi pemotongan tulangan dilakukan dengan platform pemrograman MATLAB R2017b dan menggunakan metode *integer linear programming*. *Input* parameter serta informasi lainnya tentang pemotongan besi beton bertulang (Variasi panjang potongan tulangan dan kebutuhan tiap panjang potongan tulangan). Variabel dalam penelitian ini berupa semua kemungkinan pola pemotongan (*cutting pattern*).

Constraint berupa kuantitas *demand* sehingga memperoleh *waste* yang paling minimum. *Output* yang dihasilkan berupa hasil optimasi *waste* besi beton yang paling minimum dengan serta memenuhi semua Batasan dan syarat yang telah ditentukan sebelumnya.



Gambar. 2. Diagram Alir Proses Optimasi Pemotongan Besi Beton Bertulang

Untuk Analisa Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), dilakukan dengan mencari berbagai solusi yang dapat diterapkan agar tujuan K3 tercapai saat melakukan penekanan *waste*.

IV. HASIL DAN ANALISIS

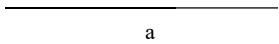
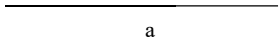
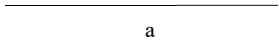
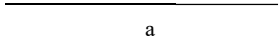
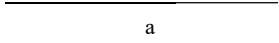
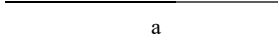
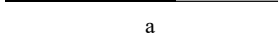
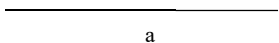
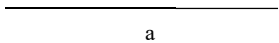
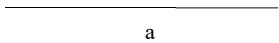
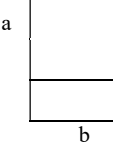
Penelitian ini menganalisa keprofesionalan dan K3 dalam keinsinyuran pada proyek pembangunan rumah tinggal dua lantai di Jl. Baruk Barat XIV/A59, Surabaya, dengan luas tanah 132 m² dan luas bangunan 111,7 m² yang dimulai pada April 2022 sampai Agustus 2022. Untuk K3 dalam keinsinyuran, perlu memperhatikan beberapa detail yang sering terlupakan saat proyek sedang berlangsung.

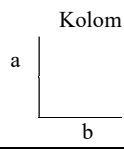
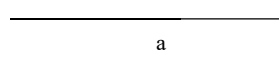
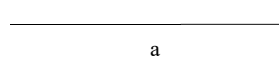
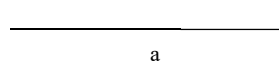
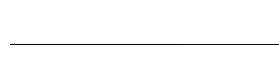
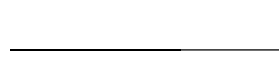
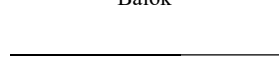
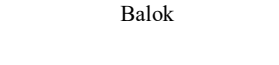
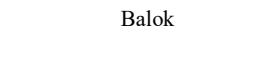
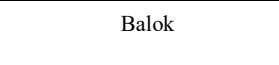
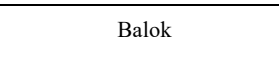
A. Analisa Optimasi

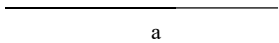
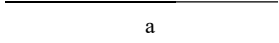
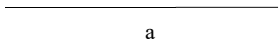
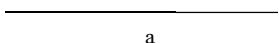
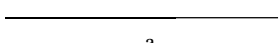
Untuk keprofesionalan dalam keinsinyuran, perlu memperhatikan efisiensi penggunaan material agar tidak menimbulkan *waste* yang berlebihan. Sehingga penelitian ini melakukan optimasi dengan metode *integer linear programming* berdasarkan data *bar bending schedule* proyek pada Tabel 2.

TABEL 2
BAR BENDING PROYEK PEMBANGUNAN RUMAH TINGGAL DUA LANTAI

No	Bentuk Tulangan	Size (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	Panjang Potongan (m)	Demand
1		D10	0,52	0,17	0	1,38	10
2		D10	0,72	0,17	0	1,78	120
3		D10	1,975	0	0	1,975	8
4		D10	2,575	0	0	2,575	8
5		D10	3,5	0	0	3,5	4
6		D10	1,575	0	0	1,575	4

No	Bentuk Tulangan	Size (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	Panjang Potongan (m)	Demand
7	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	5,075	0	0	5,075	4
8	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	3,075	0	0	3,075	4
9	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	2,75	0	0	2,75	4
10	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	3	0	0	3	8
11	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	0,75	0	0	0,75	3
12	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	5	0	0	5	8
13	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	3,75	0	0	3,75	2
14	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	1,25	0	0	1,25	3
15	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	1,65	0	0	1,65	8
16	<p>Sloof</p>  <p>a</p>	D10	4	0	0	4	5
17	<p>Kolom</p>  <p>a</p> <p>b</p>	D10	4,65	0,15	0	4,8	71

No	Bentuk Tulangan	Size (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	Panjang Potongan (m)	Demand
18	 <p>Kolom</p>	D10	3,9	0,15	0	4,05	16
19	 <p>Balok</p>	D10	0,5	0	0	0,5	4
20	 <p>Balok</p>	D10	3	0	0	3	24
21	 <p>Balok</p>	D10	0,6	0	0	0,6	8
22	 <p>Balok</p>	D10	5	0	0	5	20
23	 <p>Balok</p>	D10	4	0	0	4	8
24	 <p>Balok</p>	D10	3,4	0	0	3,4	12
25	 <p>Balok</p>	D10	1,5	0	0	1,5	36
26	 <p>Balok</p>	D10	2,5	0	0	2,5	32
27	 <p>Balok</p>	D10	3,5	0	0	3,5	24
28	 <p>Balok</p>	D10	8	0	0	8	4

No	Bentuk Tulangan	Size (mm)	a (m)	b (m)	c (m)	Panjang Potongan (m)	Demand
29	Balok 	D10	1,9	0	0	1,9	8
30	Balok 	D10	0,9	0	0	0,9	4
31	Balok 	D10	7	0	0	7	4
32	Balok 	D10	1	0	0	1	12
33	Balok 	D10	3,1	0	0	3,1	4

TABEL 3
PANJANG PEMOTONGAN TULANGAN D10 MM DAN JUMLAH DEMAND

<i>l</i> (m)	<i>D</i>	<i>l</i> (m)	<i>D</i>	<i>l</i> (m)	<i>D</i>
0,5	4	1,78	120	3,5	28
0,6	8	1,9	8	3,75	2
0,75	3	1,975	8	4	13
0,9	4	2,5	32	4,05	16
1	12	2,575	8	4,8	71
1,25	3	2,75	4	5	28
1,38	10	3	32	5,075	4
1,5	36	3,075	4	7	4
1,575	4	3,1	4	8	4
1,65	8	3,4	12		

Terdapat 29 macam panjang tulangan diameter 10 mm dan jumlah *demand* yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 3. Data panjang pemotongan tulangan dan jumlah *demand* dari tiap panjang pemotongan tulangan tersebut didapat dari *bar bending schedule* proyek.

Variasi pola pemotongan tulangan (*cutting pattern/CP*) dibuat dengan menggunakan metode *integer linear*

programming. Pola pemotongan tulangan ini digunakan sebagai variabel untuk mengoptimalkan pemotongan tulangan dengan metode *integer linear programming*. Penggunaan metode ini menghasilkan 112 pola pemotongan tulangan dari 29 macam panjang tulangan. Metode ini digunakan dengan syarat *constraint* berupa jumlah *demand* dari setiap panjang tulangan yang berbeda harus terpenuhi. Hasil optimasi ini berupa 31 pola pemotongan tulangan yang digunakan dari total kombinasi 112 pola pemotongan tulangan. Variasi panjang potongan tulangan hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 4.

TABEL 4
 VARIASI PANJANG POTONGAN TULANGAN HASIL OPTIMASI

CP	Variasi Panjang Tulangan (m)															
	8	7	5,08	5	4,8	4,05	4	3,75	3,5	3,4	3,1	3,08	3	2,75	2,58	2,5
1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
19	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
23	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2
27	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0
28	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
29	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
31	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Supply	4	4	4	28	71	16	13	2	28	12	4	4	32	4	8	32
Demand	4	4	4	28	71	16	13	2	28	12	4	4	32	4	8	32
CP	Variasi Panjang Tulangan (m)													Total (m)	Sisa (m)	Xj
	1,98	1,9	1,78	1,65	1,58	1,5	1,38	1,25	1	0,9	0,75	0,6	0,5			
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	3
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12	0	1
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	11,98	0,02	8
6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,93	0,07	1
7	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	12	0	3
8	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,92	0,08	9
9	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	1
10	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8
11	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	11,98	0,02	8
12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,98	0,02	2
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0	4

14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	12	0	4
15	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	11,99	0,01	4
16	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	4
17	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0	2
18	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,975	0,025	4
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	4
20	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12	0	3
21	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11,99	0,01	2
22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	12	0	1
23	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	12	0	2
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	13
25	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	1
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	4
27	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0	1
28	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0	2
29	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0	11
30	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	11,99	0,01	2
31	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,955	0,045	2
Supply	8	8	121	8	4	36	10	3	20	4	3	8	4			
Demand	8	8	120	8	4	36	10	3	12	4	3	8	4			

Dari hasil proses optimasi tersebut, tulangan diameter 10 mm yang digunakan sebanyak 119 lonjor, lebih sedikit dibanding total penggunaan besi pada proyek, menggunakan 124 lonjor tulangan diameter 10 mm. Sehingga proses optimasi menghasilkan pengurangan penggunaan tulangan diameter 10 mm sebanyak 5 lonjor atau sekitar 4,032%. Untuk waste tulangan yang dihasilkan 10,09 m akibat *over supply* 1 potongan besi dengan panjang 1,78 m dan 8 potongan besi dengan panjang 1 m, dan sisa-sisa dari pola pemotongan tulangan yang dilakukan.

B. Analisa Keselamatan dan Kesehatan Kerja

Waste yang dihasilkan dari proyek konstruksi dapat membahayakan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pekerja konstruksi. Sisa-sisa material tersebut bisa berbentuk benda tajam, berat. Untuk menghindari terjadinya kecelakaan kerja, tentu pekerja harus menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) minimal berupa sepatu dan helm kerja.

Selain itu, perlu dilakukan juga pengawasan atau pemeriksaan untuk memperhatikan perletakkan waste agar tidak membahayakan pekerja saat pekerjaan konstruksi sedang berlangsung. Waste yang terjadi saat proyek sedang berjalan harus diletakkan di suatu tempat yang tidak dilalui oleh pekerja, sehingga jalan yang sering dilalui pekerja harus terhindar dari kemungkinan adanya bahaya.



Gambar. 3. Peletakkan waste yang tidak membahayakan pekerja (Sumber: Dokumentasi pribadi)

Untuk memastikan pengawasan sudah dilakukan, perlu adanya dibuat jadwal tambahan dengan menyediakan waktu untuk *site check* 15 menit dan *final check* 15 menit di akhir jam kerja untuk pembersihan alat kerja dan pengumpulan waste di 1 tempat seperti pada Tabel 4.

TABEL 4
SIKLUS HARIAN K3 (SUMBER: DPU [9])

No	URAIAN	WAKTU PELAKSANAAN	KETERLIBATAN	TEMPAT DILAKSANKAN	MATERI
I V	<i>Site Check</i>	a. Setiap hari kerja b. 16.40 – 16.55 = 15 menit	a. Setiap grup kerja b. Pekerja kontraktor utama dan sub kontraktor c. Dipimpin oleh: Pemimpin Grup Kerja	a. Tempat kerja	a. Pembersihan tempat kerja dan alat kerja dari kotoran dan waste b. Bukti kegiatan : daftar hadir, risalah.
V	<i>Final Check</i>	a. Setiap hari kerja b. 16.55 – 17.00 = 15 menit	a. Kepala grup kerja b. Pekerja kontraktor utama dan sub kontraktor	a. Tempat kerja	a. Pemeriksaan hasil <i>site check</i> b. Bukti kegiatan : daftar hadir, risalah.

V. KESIMPULAN

Optimasi *waste* pemotongan tulangan besi berhasil dengan menggunakan metode *integer linear programming*. Dalam penelitian ini, berhasil mendapatkan *waste* pemotongan terkecil dengan melakukan penghematan 5 lonjor tulangan diameter 10 mm atau sebesar 4,03% dari kebutuhan 119 lonjor. Dan dari hasil pengamatan selama proyek dilakukan, dapat tetap memperhatikan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3).

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kepada Tuhan yang Maha Esa atas segala berkat dan kasih karunia-Nya yang luar biasa sehingga jurnal ini mampu diselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Jurnal ini tidak terlepas dari bantuan serta dukungan berbagai pihak. Dengan penuh rasa hormat, terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Dr.rer.nat. Surya Hermawan, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak menyumbangkan waktu untuk membimbing, memberikan saran dan kritiknya serta memotivasi penulis dalam penyusunan jurnal ini.
2. Susmarsongko selaku dosen pembimbing lapangan yang telah memberi masukan dalam penyusunan jurnal ini.
3. Tata usaha dan staff kependidikan program studi Pendidikan Profesi Insinyur Universitas Kristen Petra. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, baik yang secara langsung maupun tidak langsung yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Formoso, C. T., Asce, L. S. M., Cesare, C. De, & Isatto, E. L. (2003). Material waste in building industry: Main causes and prevention. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4), 316–325.
- [2] Matviyishyn, Y., & Janiak, T. (2019). Minimization of steel waste during manufacture of reinforced concrete structures. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2077, p. 020040). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.5091901>.
- [3] Kusuma, V. A. (2010). *Evaluasi sisa material pada proyek gedung pendidikan dan laboratorium 8 lantai*. Universitas Sebelas Maret Surakarta. Retrieved from <https://digilib.uns.ac.id/dokumen/detail/14964/Evaluasi-sisa-material-pada-proyek-gedung-pendidikan-dan-laboratorium-8-lantai-Fakultas-Kedokteran-UNS-tahap-1>.
- [4] Ervianto, W.I. 2004. *Teori - Aplikasi Manajemen Proyek Konstruksi*, Yogyakarta : Penerbit Andi.
- [5] Gavilan, R. M., & Bernold, L. E. (1994). Source evaluation of solid waste in building construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(3), 536–552.
- [6] Tchobanoglous G, et al, 1993, *Solid Waste Principle and Management Issues*, Mc Graw Hill, Tokyo.
- [7] Djunaidi, S.E. & Prayogo, D. (2021). Optimasi pemotongan besi tulangan pada proyek gudang menggunakan integer linear programming. *Dimensi Utama Teknik Sipil* (Vol. 8 No. 2). <https://doi.org/10.9744/duts.8.2.84-94>
- [8] Gomory, R. E., & Gilmore, P. C. (1961). A linear programming approach to the cutting-stock problem. *Operations Research*, 9(6), 849–859. <https://doi.org/10.1287/opre.9.6.849>
- [9] Departemen Pekerjaan Umum. (2007). Sistem manajemen Keselamatan kesehatan kerja proyek/SMK3 (project safety and health management). *Pelatihan Ahli Manajemen Konstruksi (Ahli Muda) (Construction Management)*.