

OPTIMASI PEMOTONGAN BESI TULANGAN PADA PROYEK KOMPLEKS PERGUDANGAN MENGGUNAKAN *INTEGER LINEAR PROGRAMMING*

Samuel Eric Djunaidi¹ dan Doddy Prayogo²

¹ Mahasiswa Program Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

² Dosen Program Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

¹ sameric17@gmail.com, ² prayogo@petra.ac.id

ABSTRAK: Dalam pembangunan proyek konstruksi, salah satu material konstruksi yang banyak digunakan dan menimbulkan waste ialah besi beton, terutama apabila variasi potongan tulangan cukup banyak. Waste tersebut diakibatkan pemotongan tulangan yang tidak optimal. *Integer linear programming* merupakan metode yang terbukti efektif dalam menyelesaikan banyak permasalahan optimasi linear. Namun, masih sedikit yang mengaplikasikan *integer linear programming* pada problem optimasi pemotongan besi tulangan dengan banyak variasi potongan tulangan. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengevaluasi sejauh mana tingkat keberhasilan optimasi metode *integer linear programming* dalam upaya untuk memperoleh waste besi beton paling minimum dengan bantuan program MATLAB. Data yang digunakan ialah besi beton berdiameter 13 mm pada pembangunan proyek kompleks pergudangan. Data panjang tulangan diolah menjadi pola-pola pemotongan tulangan yang menjadi variabel proses optimasi waste besi beton. Setelah dilakukan proses optimasi, penggunaan besi beton berdiameter 13 mm dapat dihemat sebanyak 59 lonjor (setara dengan penghematan 5,97%).

Kata kunci: besi beton, *integer linear programming*, optimasi, waste

ABSTRACT: *One of the construction materials that is widely used and causes waste is reinforcement steel bars. This waste is caused by the non-optimal cutting pattern. Integer linear programming is a method that has proven to be effective in solving linear optimization problems. However, there are still few studies applying this method to solve the cutting bar problems with many cutting variations. Therefore, this research will evaluate the performance of the integer linear programming method in finding the minimum waste of reinforcement steel bars with the use of MATLAB program. This research used the data of rebars with a diameter of 13 mm obtained from a warehouse complex construction project. The rebars length data is processed into cutting patterns which becomes the optimization process variables. After the optimization process is conducted, the use of rebars can be saved as much as 59 bars (equal to a 5.97% saving rate).*

Keywords: reinforcement steel bars, *integer linear programming*, optimization, waste

1. PENDAHULUAN

Tingkat pembangunan di semua negara baik negara maju maupun berkembang sangatlah tinggi. Pembangunan tersebut tidak lepas dari proyek-proyek konstruksi, baik berupa gedung, gudang, jalan, jembatan, dan berbagai fasilitas lainnya. Kebanyakan dari bangunan-bangunan tersebut adalah bangunan dengan struktur utama beton bertulang. Struktur beton

bertulang memerlukan beberapa material seperti semen, pasir, besi beton dengan panjang yang beragam, dan material-material lainnya.

Material besi tulangan beton (*rebar*) merupakan salah komponen struktur yang memiliki persentase terhadap biaya paling tinggi sekitar 20 – 30 % dari biaya proyek (Formoso, Asce, Cesare, & Isatto, 2003). Penyebab timbulnya sisa / *waste* besi beton ialah pola pemotongan tulangan yang tidak optimal. Pemotong besi beton sering menyisahkan potongan yang terlalu pendek untuk digunakan, sisa ini akan dibuang dan menjadi sampah. (Abuhassan & Nasereddin, 2011). Persentase sisa besi dalam sebuah proyek konstruksi yang terbuang akibat kesalahan pemotongan besi sekitar 11 – 15% (Purwosri & Hartono, 2017).

Untuk mendapatkan sisa tulangan yang optimal dengan ribuan potong tulangan bukan merupakan sebuah pekerjaan yang mudah, diperlukan simulasi berulang – ulang dan *trial and error*. Dibutuhkan waktu yang sangat lama untuk mendapatkan pola / cara potong yang terbaik yang menghasilkan *waste* besi yang paling minimal. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mencegah serta meminimalkan sisa besi tulangan beton yang muncul pada saat pelaksanaan proyek yaitu dengan membuat *bar bending schedule*. Pembuatan *bar bending schedule* dapat dilakukan secara manual akan tetapi memakan banyak waktu dan apabila terjadi perubahan / modifikasi penggunaan tulangan pada saat pelaksanaan di lapangan, maka akan memerlukan waktu yang lebih lama lagi untuk membuat *bar bending schedule* yang baru.

Upaya untuk mengoptimasi pemotongan tulangan dengan metode tradisional sudah sering dilakukan namun seringkali tidak memberikan hasil yang paling optimal. Dari penelitian yang dilakukan oleh Man Kork et al (2013) menggunakan *add-ons solver* pada program Microsoft Excel didapatkan kesimpulan bahwa dengan menggunakan *add-ons solver* ini cukup berhasil untuk data *input* yang sederhana (Kork et al., 2013). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mengenai optimasi pemotongan tulangan dengan metode optimasi yang lebih baik dan dengan data yang lebih bervariasi.

Salah satu metode optimasi yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan pemotongan tulangan ialah dengan metode *linear programming*. *Linear programming* merupakan suatu alat yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi suatu model *linear* dengan keterbatasan - keterbatasan sumber daya yang tersedia. Matviyishyn & Janiak (2019) melakukan penelitian mengenai optimasi pemotongan tulangan dengan menggunakan *linear programming* dengan data yang memiliki tiga variasi panjang tulangan (Matviyishyn & Janiak, 2019), sedangkan pada sebuah proyek, terdapat banyak variasi panjang tulangan yang digunakan.

Metode *integer linear programming* merupakan pengembangan *linear programming* dengan variabel keputusannya dalam bentuk bilangan bulat / *integer* tidak negatif. Metode ini telah terbukti efektif dalam menyelesaikan banyak permasalahan optimasi yang bersifat *linear*. Namun, masih sedikit yang mengaplikasikan *integer linear programming* pada problem optimasi pemotongan besi tulangan dengan variasi panjang tulangan yang banyak.

Oleh karena itu, pada penelitian kali ini akan digunakan metode *integer linear programming* untuk menyelesaikan permasalahan optimasi pemotongan tulangan dengan menggunakan data dari proyek sesungguhnya. Data yang akan diolah pada penelitian kali ini adalah data kompleks pergudangan sebuah pabrik rokok di kota Bandung. Akan dilakukan juga analisa

untuk memperoleh perbandingan *waste* besi dan jumlah besi tulangan antara hasil optimasi menggunakan metode *integer linear programming* dengan *bar bending schedule*.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Bar Bending Schedule

Bar bending schedule merupakan daftar pola pembengkokan besi tulangan yang meliputi data diameter, bentuk, panjang dan jumlah tulangan (ACI116R-0). Untuk membuat *bar bending schedule* diperlukan data gambar teknis dari pihak konsultan, data mengenai jumlah dan ukuran besi tulangan yang digunakan, data mengenai jumlah dan dimensi bagian yang dikerjakan serta tabel - tabel yang dibutuhkan. Daftar bengkokan batang tulangan umumnya berisi batang tulangan yang dibengkokkan dan menyajikan semua dimensi detail batang tulangan termasuk bengkokannya, serta informasi mengenai mutu baja tulangan dan jumlah yang digunakan.

Informasi penting dalam pengerjaan formulasi optimasi *waste* pembesian beton bertulang tertuang dalam *bar bending schedule*. Panjang potongan didefinisikan sebagai l_j yang akan digunakan dalam pembuatan pola pemotongan tulangan atau *cutting pattern*. Sedangkan jumlah didefinisikan sebagai D_j atau kuantitas *demand* untuk tiap variasi panjang pemotongan.

2.2 Linear Programming

Gilmore dan Gomory (1961) merupakan pionir / pelopor yang mengusulkan metode solusi menggunakan *linear programming*. *Linear programming* merupakan suatu metode untuk penyelesaian masalah dengan menggunakan persamaan atau pertidaksamaan *linear* yang mempunyai banyak penyelesaian dengan memperhatikan syarat - syarat yang ada sehingga memperoleh penyelesaian optimum (nilai maksimum atau nilai minimum). Secara umum, dalam penyusunan model *linear programming* melibatkan tiga komponen dasar terpenting yaitu fungsi tujuan (*objective function*), fungsi batasan (*constraint function*), dan variabel keputusan.

1. Fungsi tujuan (*objective function*)

Fungsi objektif / *objective function* merupakan sebuah rumusan fungsi yang digunakan untuk merepresentasikan suatu nilai tujuan dari proses optimasi yang digunakan. Fungsi objektif ini membahas masalah memaksimalkan atau meminimumkan tergantung dari masalah yang dihadapi. *Objective function* pada penelitian ini ialah pengoptimasian pemotongan tulangan sehingga dapat meminimumkan *waste* besi beton (*waste optimization*). *Objective function* yang digunakan pada penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

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

$$S_j = \sum_{i=1}^i X_i \cdot n_{ji} \quad (2)$$

di mana:

$f(x)$ = Fungsi objektif

Ls = Panjang tulangan standar / *stock length*, yaitu 12 m

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

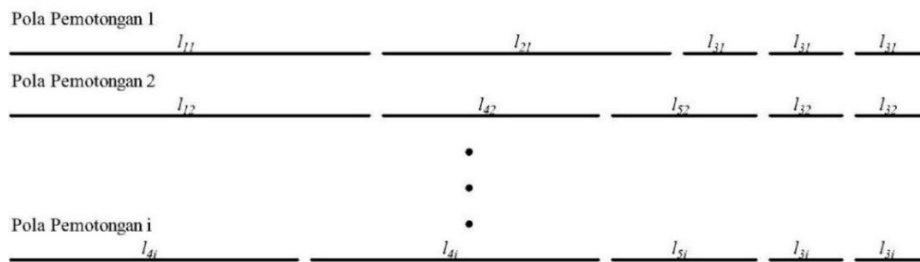
- S_j = Jumlah supply untuk panjang tulangan ke- j (l_j)
- D_j = Jumlah demand untuk panjang tulangan ke- j (l_j)
- l_j = Panjang tulangan ke- j
- n_{ji} = Banyaknya panjang tulangan ke- j

2. Fungsi batasan (*constraint function*)

Dalam proses optimasi *waste* pembesian beton bertulang, diperlukan sebuah batasan atau *constraint*. *Constraint* tersebut didapat dari data *bar bending schedule* yaitu berupa jumlah / kuantitas *demand* untuk tiap variasi panjang tulangan (D_1, D_2, \dots, D_j). Batasan ini berguna untuk memastikan jumlah semua variasi panjang tulangan (S_1, S_2, \dots, S_j) dari pola pemotongan / *cutting pattern* telah memenuhi jumlah yang dibutuhkan berdasarkan data dari *bar bending schedule* yang dihasilkan dari proses optimasi.

3. Variabel keputusan

Variabel dalam proses optimasi *waste* pembesian beton bertulang ialah pola pemotongan tulangan atau *cutting pattern*. Ilustrasi dari pola pemotongan tulang dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1. Ilustrasi Pola Pemotongan Tulangan

di mana:

- l_{1i} = Panjang potongan besi jenis ke-1 pada pola pemotongan ke- i
- l_{2i} = Panjang potongan besi jenis ke-2 pada pola pemotongan ke- i
- l_{ji} = Panjang potongan besi jenis ke- j pada pola pemotongan ke- i

Potongan tulangan tersebut memiliki notasi l_{ji} , di mana j menyatakan variasi panjang potongan tulangan dan i menyatakan nomor pola pemotongan tulangan. Selain itu, terdapat variabel X_1, X_2, \dots , dan X_i yaitu variabel banyaknya kali pemotongan untuk masing - masing pola pemotongan. Masing - masing pola pemotongan tulangan memiliki kombinasi potongan tulangan dengan panjang yang beragam.

Guna membatasi panjang variabel pola yang dihasilkan terdapat batas atas (*upper bound*) dan batas bawah (*lower bound*). *Upper bound* merupakan batas nilai atas / maksimum yang dimiliki oleh variabel pola yang akan diacak. *Lower bound* merupakan batas nilai bawah / minimum yang dimiliki oleh variabel pola yang akan diacak. *Lower bound* untuk variabel *waste* pembesian beton bertulang ialah 0, sedangkan *upper bound* untuk variabel *waste* pembesian beton bertulang dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\sum_{j=1}^j \frac{D_j \cdot l_j}{LS} \tag{3}$$

di mana:

D_j = kuantitas *demand* / jumlah kebutuhan untuk panjang tulangan l_j

l_j = Panjang tulangan ke- j

L_s = Panjang tulangan utuh / *stock length*, yaitu 12 m

Bentuk umum *linear programming* adalah sebagai berikut:

$$\text{Fungsi Tujuan} \quad Z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n \quad (4)$$

$$\text{Fungsi Kendala} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq, =, \geq b_i \quad (5)$$

$$\text{Syarat Non-Negatif} \quad x_j \geq 0 \quad (6)$$

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

2.3 Integer Linear Programming

Program linear bilangan bulat atau *integer linear programming* adalah sebuah *linear programming* dengan variabel keputusannya berupa bilangan bulat / *integer* tidak negatif, sehingga ada penambahan syarat bahwa variabel keputusannya harus bilangan bulat pada bentuk umum *linear programming*. Bentuk umum *integer linear programming* dalam upaya optimasi memaksimalkan / meminimumkan adalah sebagai berikut:

$$\text{Memaksimalkan} \quad z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i \quad (7)$$

Fungsi Kendala

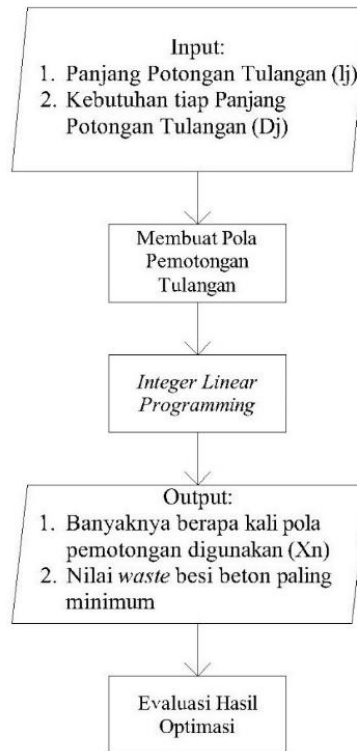
$$x_j \geq 0, \text{ integer untuk setiap } x_j$$

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

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan solusi bulat optimal antara lain dengan metode pembulatan, pendekatan menggunakan grafik, *cutting plane algorithm* atau pendekatan Gomory, serta metode cabang dan batas (*branch and bound*).

3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan optimasi *waste* pembesian beton bertulang dengan bantuan program MATLAB 2017b menggunakan metode *integer linear programming*. Data yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan *bar bending schedule* dari proyek kompleks pergudangan sebuah perusahaan rokok di kota Bandung. Gambar 2 menunjukkan gambaran singkat bagaimana proses optimasi yang dilakukan. Data berupa variasi panjang tulangan beserta kuantitas kebutuhannya didapat dari *bar bending schedule*. Data yang telah dikelompokkan sesuai diameter tulangan, data kemudian akan *diinput* dalam proses optimasi.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Semua variasi panjang tulangan diolah menjadi berbagai kemungkinan pola pemotongan tulangan (*cutting pattern*). Dalam mencari pola pemotongan tulangan digunakan metode *integer linear programming*. Berbagai pola pemotongan tersebut akan digunakan sebagai variabel dalam proses optimasi meminimalkan *waste* besi beton dan tetap memenuhi *constraint* berupa kuantitas *demand* setiap variasi panjang tulangan. Setelah memperoleh pola pemotongan tulangan yang optimal, peneliti akan merumuskan dan menyelesaikan problem optimasi tersebut dengan menggunakan *integer linear programming*.

Output yang dihasilkan adalah solusi optimal berupa banyaknya berapa kali tiap pola pemotongan tulangan digunakan dan nilai *waste* besi beton paling kecil. Hasil tersebut akan dibandingkan dengan data *bar bending schedule* yang telah dimiliki dan peneliti tidak lupa untuk meninjau *constraint* atau batasan yang berupa kuantitas kebutuhan untuk masing-masing panjang tulangan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Studi Kasus Penelitian

Pada penelitian ini digunakan data *bar bending schedule* proyek kompleks pergudangan yang telah dibangun milik sebuah pabrik rokok di kota Bandung. Proyek tersebut terdiri dari bangunan gedung olahraga, gudang, kantor, *basement*, pagar, *retaining wall*, mess karyawan, pos satpam, ruang panel, ramp jembatan, serta bangunan penunjang. Data yang digunakan ialah data penggunaan besi beton berdiameter 13 mm pada semua pekerjaan struktur beton bertulang.

Bar bending schedule tersebut mencakup detail pembengkokan tulangan serta kuantitas *demand* yang dibutuhkan dari setiap variasi panjang tulangan. Terdapat 31 variasi panjang

besi beton diameter 13 mm, penjabaran variasi panjang potongan besi beton beserta data kuantitas *demand* yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Panjang Potongan Besi Beton beserta Kuantitas *Demand*

No	Panjang Tulangan (m)	<i>Demand</i> (Buah)	No	Panjang Tulangan (m)	<i>Demand</i> (Buah)
1	11,41	2	17	4,4	82
2	10,94	22	18	4,38	66
3	6,82	2	19	4,25	3
4	6,77	8	20	4,13	3
5	6,65	11	21	3,9	82
6	6,54	11	22	2,48	15
7	6	166	23	2,27	20
8	5,71	3	24	2,05	144
9	5,63	3	25	1,89	16
10	5,53	3	26	1,84	287
11	5,38	8	27	1,8	721
12	5,32	3	28	1,7	864
13	5,14	576	29	1,58	24
14	5,06	3	30	1,53	24
15	4,59	6	31	0,94	1872
16	4,44	3			

Semua variasi panjang tulangan diolah menjadi berbagai kemungkinan pola pemotongan tulangan (*cutting pattern*). Dalam mencari pola pemotongan tulangan digunakan metode *integer linear programming*. Berbagai pola pemotongan tersebut akan digunakan sebagai variabel dalam proses optimasi meminimalkan *waste* besi beton dan tetap memenuhi *constraint* berupa kuantitas *demand* setiap variasi panjang tulangan.

4.2 Hasil Penelitian

Terdapat beberapa bangunan pada proyek gudang ini, besi beton berdiameter 13 mm hanya digunakan pada bangunan gedung olah raga, kantor, *basement*, gudang, pagar, *retaining wall*, mess karyawan, pos satpam, ruang panel, dan jembatan. Besi beton berdiameter 13 mm memiliki 31 variasi panjang pemotongan tulangan, kemudian dicari pola pemotongan tulangan (*cutting pattern*) dengan metode *integer linear programming*. Dari proses tersebut, dihasilkan 112 variasi pola pemotongan tulangan. Pola-pola pemotongan tulangan tersebut nantinya akan digunakan variabel dalam proses optimasi *waste* dari penggunaan besi beton.

Setelah mendapatkan pola pemotongan tulangan, selanjutnya dilakukan proses optimasi *waste* besi beton dengan metode *integer linear programming*. Proses optimasi dilakukan dengan menggunakan pola pemotongan tulangan sebagai variabel, serta *constraint* berupa jumlah / kuantitas *demand* untuk tiap variasi panjang tulangan. Hasil yang diberikan dari proses optimasi tersebut berupa banyaknya setiap pola pemotongan tulangan digunakan. Dari hasil optimasi, hanya 45 dari 112 variasi pola pemotongan tulangan yang digunakan dalam upaya meminimalkan *waste* besi beton. Variasi-variasi pola pemotongan ini dijabarkan pada Lampiran 1. Pola pemotongan tulangan dan jumlah tiap pola tersebut digunakan dapat dilihat pada penjabaran Tabel 2.

Tabel 2. Pola Pemotongan Tulangan (*Cutting Pattern*) dan Jumlah Tiap Pola Digunakan

<i>Cutting Pattern</i> -	Total Panjang Tulangan (m)	Sisa (m)	Jumlah Digunakan (X_i)
1	11,41	0,59	2
7	12,00	0,00	83
34	11,97	0,03	1
44	11,92	0,08	1
48	11,98	0,02	276
52	11,70	0,30	1
55	11,88	0,12	22
56	12,00	0,00	2
61	11,97	0,03	2
62	12,00	0,00	1
63	11,99	0,01	3
65	11,98	0,02	2
71	12,00	0,00	2
73	11,94	0,06	1
77	11,99	0,01	115
78	11,99	0,01	1
83	12,00	0,00	63
86	11,99	0,01	10
87	12,00	0,00	172
89	12,00	0,00	14
91	11,99	0,01	1
93	11,99	0,01	4
95	12,00	0,00	12
96	12,00	0,00	9
98	12,00	0,00	49
99	12,00	0,00	3
100	12,00	0,00	4
101	12,00	0,00	3
102	12,00	0,00	1
103	12,00	0,00	4
104	12,00	0,00	3
105	11,99	0,01	3
106	11,98	0,02	21
107	11,99	0,01	10
108	12,00	0,00	12
109	11,99	0,01	8
110	11,99	0,01	5
111	12,00	0,00	3

Berdasarkan proses optimasi yang telah dilakukan, total besi beton berdiameter 13 mm yang digunakan sebanyak 929 lonjor. Jumlah besi beton yang digunakan lebih sedikit dibanding rekap penggunaan besi pada proyek, di mana pada proyek tersebut menggunakan 988 lonjor besi beton berdiameter 13 mm. Dengan proses optimasi yang dilakukan, didapatkan bahwa

penggunaan besi beton berdiameter 13 mm dapat berkurang sebanyak 59 lonjor atau sekitar 5,97% dari total penggunaan besi beton berdiameter 13 mm pada saat pembangunan.

Peneliti juga melakukan pengecekan terhadap jumlah potongan tulangan yang dihasilkan, dan didapatkan bahwa semua kuantitas *demand* telah terpenuhi. Dalam penelitian ini *waste* besi beton yang dihasilkan sebanyak 7,189 kg atau 6,9 m yang terdiri dari *waste* akibat *over supply* dan *waste* dari sisa pola pemotongan tulangan. *Waste* akibat *over supply* berupa 1 potongan besi dengan panjang 5,53 m, sedangkan *waste* lainnya diakibatkan oleh sisa dari pola - pola pemotongan tulangan yang dilakukan.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa proses optimasi dengan metode *integer linear programming* telah berhasil memperoleh *waste* besi beton terkecil dalam upaya merencanakan pemotongan besi tulangan di sebuah proyek. Dalam studi kasus ini, penggunaan besi beton berdiameter 13 mm dapat dihemat sebanyak 59 lonjor atau setara dengan 5,97% dari total penggunaan besi beton berdiameter 13 mm pada saat pembangunan.

6. DAFTAR REFERENSI

- Abuhassan, I., & Nasereddin, H. H. O. (2011). "Cutting Stock Problem : Solution Behaviors". *International Journal of Recent Research*, 6(4), 429–433.
- American Concrete Institute. (2000). *Cement and Concrete Terminology* (ACI 116R-00). http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20116R00%20Cement%20and%20Concrete%20Terminology_MyCivil.ir.pdf
- 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.
- Gilmore, P. C., & Gomory, R. E. (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>
- Kork, M. A. N., Hartono, W., & Sugiyarto. (2013). "Memperhitungkan Optimasi Waste Besi pada Pekerjaan Balok dengan Program Microsoft Excel". *Matriks Teknik Sipil*, 1(3), 290–295.
- 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>
- 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>
- Purwosri, V. P., & Hartono, W. (2017). "Penghitungan Optimasi Baja Tulangan pada Pekerjaan Pelat dan Balok dengan Menggunakan Microsoft Excel dan Autocad (Studi Kasus Pembangunan Apartemen Gunawangsa Tidar Surabaya)". *Matriks Teknik Sipil*, 5(3), 1102–111

Lampiran 1. Pola Pemotongan Tulangan (*Cutting Pattern*) yang Digunakan

CP-	Variasi Panjang Tulangan (m)																															
	11,4	10,9	6,82	6,77	6,65	6,54	6	5,71	5,63	5,53	5,38	5,32	5,14	5,06	4,59	4,44	4,4	4,38	4,25	4,13	3,9	2,48	2,27	2,05	1,89	1,84	1,8	1,7	1,58	1,53	0,94	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
55	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
61	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
62	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
71	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0
73	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0	1	
78	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	
83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	
86	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	9	
89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	1	0	0	0	
91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	1	
96	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4	
98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	

Djunaidi:Optimasi Pemotongan Besi Tulangan pada Proyek Kompleks Pergudangan

CP-	Variasi Panjang Tulangan (m)																														
	11,4	10,9	6,82	6,77	6,65	6,54	6	5,71	5,63	5,53	5,38	5,32	5,14	5,06	4,59	4,44	4,4	4,38	4,25	4,13	3,9	2,48	2,27	2,05	1,89	1,84	1,8	1,7	1,58	1,53	0,94
99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	1
101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	1
103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0
105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	1
106	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
109	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
111	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1