

ANALISIS PENGGUNAAN PROGRAM SOLVER UNTUK OPTIMASI PEMOTONGAN BESI PADA PROYEK RUMAH TINGGAL X

Brian Giovanni Axel Mamahit¹ dan Onnyxiforus Gondokusumo²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
brian.325190012@stu.untar.ac.id

²Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
onnyxiforusg@ft.untar.ac.id

Masuk: 13-07-2023, revisi: 29-07-2023, diterima untuk diterbitkan: 30-08-2023

ABSTRACT

Steel reinforcement bar has an important role in the construction industry. In the construction process, the emergence of inefficient steel waste can lead to a waste of costs. One common cause of steel waste is steel cutting that is not optimal in the field, so a way is needed to minimize this waste. The Linear Programming method has been identified as one of the ways to reduce iron waste. This study aims to compare the remaining steel waste from cutting in the field with the remaining steel waste after using the Linear Programming method. To calculate steel waste based on the Linear Programming model, the Solver program is used. The house construction project in Manado is the object of this research. This study uses two signs, namely \geq and $=$, as limits on the objective function. The use of the \geq sign results in a demand for steel that exceeds the supply in the field, but with the least amount of iron waste. Meanwhile, the use of the $=$ sign obtains minimal iron requirements, but with a greater amount of iron waste than the \geq sign. This study also uses two approaches in calculating the percentage of savings, which are based on the diameter of each type of work and based on combining the diameters of sloof, beam and column work. The results showed a savings of 9% for the diameter-based approach for each type of work, and a savings of 9.1% for the diameter-based approach for sloof, beam, and column work.

Keywords: steel waste; linear programming; solver program; steel reinforcement bar.

ABSTRAK

Material besi memiliki peran penting pada saat pembangunan konstruksi. Pada proses pembangunan, *waste* besi yang tidak efisien dapat menyebabkan pemborosan biaya. Salah satu penyebab terjadinya *waste* besi yaitu pada saat melakukan pemotongan besi yang tidak optimal di lapangan, sehingga dibutuhkan cara agar dapat meminimalisir *waste* tersebut. Metode *Linear Programming* telah diidentifikasi sebagai satu diantara cara menurunkan *waste* besi. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan sisa *waste* besi dari pemotongan di lapangan dengan sisa *waste* besi setelah menggunakan metode *Linear Programming*. Salah satu cara menghasilkan nilai *waste* besi dari model *Linear Programming* yaitu dengan menggunakan program *Solver*. Proyek pembangunan rumah tinggal x di Manado menjadi objek penelitian ini. Penelitian ini menggunakan dua tanda yaitu \geq dan $=$ sebagai batasan pada fungsi tujuan. Penggunaan tanda \geq menghasilkan kebutuhan besi yang lebih besar dari lapangan, namun menghasilkan *waste* besi yang terkecil. Sedangkan penggunaan tanda $=$ memperoleh kebutuhan besi yang minimal, tetapi dengan jumlah *waste* besi yang lebih besar daripada tanda \geq . Penelitian ini juga menggunakan dua pendekatan dalam menghitung persentase penghematan, yaitu berdasarkan diameter pada setiap jenis pekerjaan dan berdasarkan penggabungan diameter dari pekerjaan sloof, balok, dan kolom. Hasil penelitian menunjukkan penghematan sebesar 9% untuk pendekatan berdasarkan diameter pada setiap jenis pekerjaan, dan penghematan sebesar 9,1% untuk pendekatan berdasarkan penggabungan diameter dari pekerjaan sloof, balok, dan kolom.

Kata kunci: *waste* besi; *linear programming*; program *solver*; besi tulangan

1. PENDAHULUAN

Saat melaksanakan konstruksi rumah tinggal, bangunan, atau struktur lainnya, besi merupakan satu diantara komponen signifikan dalam suatu proyek konstruksi dan memperkirakan ukuran anggaran biaya operasional sebuah proyek, Lebih dari setengah dari anggaran proyek digunakan untuk membiayai bahan-bahan yang digunakan (Nugraha, 1985). Pada proses pembangunan proyek konstruksi, tak bisa dihindari adanya *waste* besi yang dapat mengakibatkan pemborosan anggaran biaya yang tidak perlu. Pihak yang terlibat dalam suatu proyek sering tidak

menyadari bahwa *waste* besi hal ini telah menyebabkan biaya proyek menjadi tidak stabil sehingga terjadi peningkatan biaya yang signifikan. Material besi beton adalah salah satu jenis material yang memiliki presentase dalam hal biaya, yang memiliki tingkat tertinggi adalah berkisar 20%-30% (Formoso et al., 2002).

Salah satu faktor yang menyebabkan terjadinya limbah besi adalah pemotongan besi yang tidak tepat. Ketika besi beton dipotong, seringkali menghasilkan potongan yang terlalu kecil untuk digunakan, sehingga potongan tersebut diabaikan dan dianggap sebagai limbah (Abuhassan & Nasereddin, 2011). Residu material besi beton menyumbang sebesar 21.1% dari total biaya material yang tersisa (Tam, 2008). Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi pemotongan besi adalah dengan menggunakan metode *Linear Programming*. *Linear Programming* adalah sebuah metode yang digunakan untuk memecahkan masalah dengan tujuan memaksimalkan atau meminimalkan suatu model *linear*, dengan mempertimbangkan keterbatasan sumber daya yang tersedia. (Stapleton M.D. et al., 2003).

Penelitian ini menggunakan *Microsoft Excel* untuk menyelesaikan persamaan dengan program *Solver*. Kemudian, setelah menggunakan metode pemrograman *linier*, didapatkan hasil perbandingan di lapangan dengan hasil setelah menggunakan metode *linear programming*. Dari penelitian yang dilakukan oleh Kork et al., (2013) menggunakan *add-ins solver* ini cukup berhasil untuk *input* data yang sederhana. Penelitian ini dilakukan di proyek rumah tinggal x yang bertempat di Jl. Gorangao, Tumumpa 1, Kecamatan Tuminting, Kota Manado, Sulawesi Utara. Proyek ini terletak diantara beberapa gudang dan rumah tinggal. Fokus penelitian ini dititikberatkan untuk meminimumkan *waste* besi pada proyek rumah tinggal x. Analisis ini dilakukan untuk membandingkan sisa besi dan jumlah besi yang diperlukan antara sebelum menggunakan metode *linear programming* dan sesudah menggunakan metode *Linear Programming*.

2. METODE PENELITIAN

Pada pengumpulan data untuk penelitian ini, dilakukan dengan menanyakan langsung kepada pihak *engineering*. Beberapa data yang terkumpul dalam penelitian ini meliputi data umum proyek, lokasi proyek, biaya proyek, dan data pembesian sloof, balok, dan kolom. Setelah mendapatkan data tersebut, dilakukan rekapitulasi data dalam bentuk tabel. Langkah berikutnya melakukan formulasi masalah dalam bentuk model matematis yang mengikuti aturan *Linear Programming*. pengertian Pemrograman *linear* adalah suatu pendekatan matematis yang menggunakan bentuk *linear* untuk menemukan solusi optimal dengan memaksimalkan atau meminimalkan fungsi tujuan dalam batasan yang ditetapkan (Siswanto, 2007).

Dalam *Linear Programming* terdapat 3 hal penting yang perlu diperhatikan untuk memodelkan permasalahan terdiri dari variabel-variabel yang dapat dipilih, fungsi yang ingin dicapai, serta batasan-batasan yang harus dipenuhi. Setelah itu dilakukan analisis dengan menggunakan program Solver. Hasil data yang muncul yaitu berupa *waste* besi total, jumlah total tulangan besi ukuran 12 m pada masing-masing alternatif dan jumlah kebutuhan besi yang dibutuhkan. Kemudian dilakukan perbandingan antara sisa besi dan jumlah besi yang diperlukan di lapangan. Berdasarkan analisis yang dilakukan, dapat dapat diambil kesimpulan serta rekomendasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

penelitian ini dilakukan pada proyek rumah tinggal x yang berlokasi di Manado, Sulawesi Utara. Proyek tersebut memiliki jumlah 2 lantai dan berada di daerah Tuminting, Manado Utara. Pengumpulan data pada penelitian dilakukan dengan menanyakan langsung kepada pihak *engineer* di lapangan. Dengan memperhatikan panjang dan jenis pekerjaan yang ditemukan di lapangan, seperti pekerjaan sloof, balok, dan kolom, selanjutnya dibuat dalam bentuk tabel sesuai dengan diameter tulangan. Berikut ini adalah salah satu contoh pekerjaan pada sloof diameter 16.

Tabel 1. Hasil Analisis Pemotongan Besi Diameter 16 Untuk Pekerjaan Sloof

Diameter	Panjang	Jumlah potongan	kebutuhan besi (12 m)	Waste besi	Waste Besi
mm	m	batang	batang	m/batang	m
16	8,584	12	12	3,416	40,992
	6,509	24	24	5,491	131,784
	12,000	12	12	0,000	0

Tabel 1 (Lanjutan). Hasil Analisis Pemotongan Besi Diameter 16 Untuk Pekerjaan Sloof

Diameter	Panjang	Jumlah potongan	kebutuhan besi	Waste besi	Waste Besi
mm	m	batang	(12 m) batang	m/batang	m
16	9,882	12	12	2,118	25,416
	10,584	4	4	1,416	5,664
	1,559	32	5	1,087	5,435
	2,059	8	2	1,705	3,41
	2,534	24	6	1,864	11,184
	2,034	12	3	1,831	5,49
	3,034	8	3	2,898	8,694
	2,234	50	10	0,831	8,3
	1,234	6	1	0,894	0,894
	3,234	6	2	2,298	4,596
Jumlah		210	96	25,847	251,859

Panjang besi tulangan utuh yaitu sebesar 12 m. Untuk panjang pertama pada sloof diameter 16, besi yang dibutuhkan sepanjang 8,584 m dengan sisa potongan besi sepanjang 3,416 m.



Gambar 1. Panjang potongan 1 diameter 16

Panjang besi tulangan utuh yaitu sebesar 12 m. Untuk panjang kedua pada sloof diameter 16, besi yang dibutuhkan sepanjang 6,509 m dengan sisa potongan besi sepanjang 5,491 m.



Gambar 2. Panjang potongan 2 diameter 16

Linear Programming

Dalam *Linear Programming* terdapat langkah-langkah yang dilakukan untuk memodelkan suatu permasalahan yaitu:

- a. Variabel Keputusan (*Decision Variables*)
 Penelitian ini, variabel keputusannya yaitu menentukan pola pemotongan pada tiap alternatif seperti pada tabel 2. Cara untuk menentukan pola alternatif pada penelitian ini yaitu menggunakan hitungan manual.

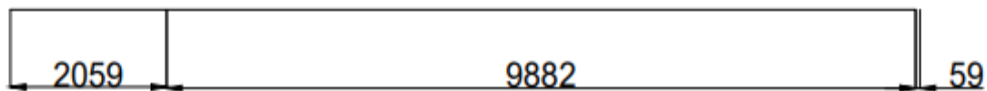
Tabel 2 Alternatif Pemotongan Besi Tulangan Sloof Diameter 16

Jumlah potongan	12	24	12	12	4	32	8	24	12	8	50	6	6	Sisa
Alternatif	panjang potongan besi													
	8,584	6,509	12	9,882	10,584	1,559	2,059	2,534	2,034	3,034	2,234	1,234	3,234	
x1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,059
x3	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0,139
x4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2	1	0	0,146
x5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	4	0	0,153
x6	i0	1	i0	i0	i0	1	i0	1	i0	i0	i0	1	i0	0,164
x7	i0	i0	i0	i0	i0	1	i0	1	i0	1	1	2	i0	0,171
x8	i0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	5	0	0,178
x9	i0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,182
x10	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0,189
x11	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	3	0	0,196
x12	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	1	0,205

Tabel 2 (Lanjutan). Alternatif Pemotongan Besi Tulangan Sloof Diameter 16

Jumlah potongan	12	24	12	12	4	32	8	24	12	8	50	6	6	Sisa
Alternatif	8,584	6,509	12	9,882	10,584	1,559	2,059	2,534	2,034	3,034	2,234	1,234	3,234	
x13	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	3	0	0,212
x14	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0,223
x15	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0,23
x16	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0,298
x17	0	0	0	0	0	1	0	4	0	0	0	0	0	0,305
x18	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	2	0	0,312
x19	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	2	0	0	0,321
x20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	7	0	0,328
x21	0	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0,339
x22	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	1	1	0	0,346
x23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0,83
x24	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	4	0	0,353
x25	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0,423
x26	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0,464
x27	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	1,005
x28	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	1	0	0	0,546
x29	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0,555
x30	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0	1,505
x31	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,882
x32	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,884
x33	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1,416

Terdapat 33 alternatif untuk panjang potongan pada pekerjaan sloof diameter 16 mm. Berikut ini adalah contoh pengerjaan alternatif X2. X2 adalah panjang besi utuh alternatif pemotongan memiliki panjang sebesar 12 meter. terdapat 1 batang besi ukuran 9,882 m dan 1 batang besi ukuran 2,059 m. dialternatif X2 terdapat sisa besi sebesar 0,059 m. Sisa tersebut didapatkan dari panjang besi utuh 12 m – 9,882 m – 2,059 m = 0,059 m.



Gambar 3. Alternatif X2

b. Fungsi Tujuan (*Objective Function*)

Fungsi tujuan pada penelitian ini yaitu untuk meminimumkan *waste* besi di lapangan, dilakukan analisis berdasarkan setiap pekerjaan dan diameter yang terkait. MIN Z tujuannya untuk meminimumkan suatu fungsi tujuan.

Tabel 3 Fungsi Tujuan

Alternatif	Waste	MIN Z
X1	0	0 X1
X2	0,059	0,059 X2
X3	0,139	0,139 X3
...
X31	0,882	0,882 X31
X32	0,884	0,884 X32
X33	1,416	1,416 X33
X3	0,139	0,139 X3

$$\text{MIN } Z = 0 X_1 + 0,059 X_2 + 0,139 X_3 + 0,146 X_4 + 0,153 X_5 + 0,164 X_6 + 0,171 X_7 + 0,178 X_8 + 0,182 X_9 + 0,189 X_{10} + 0,196 X_{11} + 0,205 X_{12} + 0,212 X_{13} + 0,223 X_{14} + 0,23 X_{15} + 0,298 X_{16} + 0,305 X_{17} + 0,312 X_{18} + 0,321 X_{19} + 0,328 X_{20} + 0,339 X_{21} + 0,346 X_{22} + 0,83 X_{23} + 0,353 X_{24} + 0,423 X_{25} + 0,464 X_{26} + 1,005 X_{27} + 0,546 X_{28} + 0,555 X_{29} + 1,505 X_{30} + 0,882 X_{31} + 0,884 X_{32} + 1,416 X_{33}$$

Cara penulisannya yaitu dengan mengalikan hasil sisa dengan tiap alternatif seperti contoh pada alternatif X1 tidak ada sisa besi sehingga perkalian 0 dengan X1 dilakukan dan hasilnya menjadi 0 X1, pada alternatif X2 terdapat sisa besi sebesar 0,059 sehingga dikalikan dengan X2 dan hasilnya menjadi 0,059 X2, begitu seterusnya.

c. Fungsi kendala (*Constraints*)

Dalam penelitian ini, batasannya pada setiap panjang potongan yang dianalisis, terdapat jumlah potongan yang dihitung. Batasan pada penelitian ini diambil dari jumlah potongan yang terbesar dilapangan terlebih dahulu sampai ke jumlah potongan terkecil.

Panjang 2,234

$$X_3 + 2X_4 + X_5 + X_7 + 2X_{12} + 2X_{13} + X_{14} + 2X_{19} + X_{22} + 5X_{23} + X_{26} + 4X_{27} + X_{28} + 4X_{30} \geq 50$$

Panjang 1,559

$$2X_3 + 2X_4 + 3X_5 + X_6 + X_7 + 2X_8 + X_{12} + X_{13} + X_{15} + 2X_{16} + X_{17} + 2X_{18} + 3X_{19} + 2X_{21} + 2X_{22} + 3X_{24} + X_{26} + 2X_{28} + X_{30} \geq 32$$

Panjang 6,509

$$X_3 + X_6 + X_{10} + X_{14} + X_{15} + X_{21} + X_{25} + X_{26} + X_{29} \geq 24$$

Panjang 2,534

$$X_6 + X_7 + X_8 + 2X_{11} + X_{12} + 4X_{17} + X_{19} + 2X_{22} + 2X_{25} + X_{27} + X_{31} \geq 24$$

Panjang 8,584

$$X_{16} + X_{31} \geq 12$$

Panjang 12

$$0X_1 \geq 12$$

Panjang 9,882

$$X_2 + X_{32} \geq 12$$

Panjang 2,034

$$2X_{10} + 3X_{18} + X_{21} + X_{24} + 3X_{28} \geq 12$$

Panjang 2,059

$$X_2 + X_{13} + X_{27} \geq 8$$

Panjang 3,034

$$X_4 + X_7 + X_{11} + X_{14} + X_{20} \geq 8$$

Panjang 1,234

$$X_4 + 4X_5 + X_6 + 2X_7 + 5X_8 + X_9 + X_{10} + 3X_{11} + 3X_{13} + 3X_{15} + 2X_{18} + 7X_{20} + X_{22} + 4X_{24} + X_{26} + 4X_{29} + X_{32} \geq 6$$

panjang 3,234

$$X_{12} \geq 6$$

Panjang 10,584

$$X_9 + X_{33} \geq 4$$

jumlah potongan 50 batang untuk alternatif $X_3 + 2X_4 + X_5 + X_7 + 2X_{12} + 2X_{13} + X_{14} + 2X_{19} + X_{22} + 5X_{23} + X_{26} + 4X_{27} + X_{28} + 4X_{30}$ (lihat per kolom), sedangkan jumlah potongan 32 batang untuk alternatif $2X_3 + 2X_4 + 3X_5 + X_6 + X_7 + 2X_8 + X_{12} + X_{13} + X_{15} + 2X_{16} + X_{17} + 2X_{18} + 3X_{19} + 2X_{21} + 2X_{22} + 3X_{24} + X_{26} + 2X_{28} + X_{30}$. Begitu seterusnya untuk fungsi kendala yang lain.

Program Solver

Berikut ini adalah cara penggunaan *excel solver* untuk mengoptimasi pemotongan besi tulangan pada pekerjaan sloof diameter 16. Data yang perlu dimasukkan ke dalam program SOLVER yaitu berupa model *linear programming* seperti berikut:

Fungsi kendala (lhs = sisi kiri persamaan dan rhs = sisi kanan persamaan)

Lhs = left hand side

Rhs = Right hand side

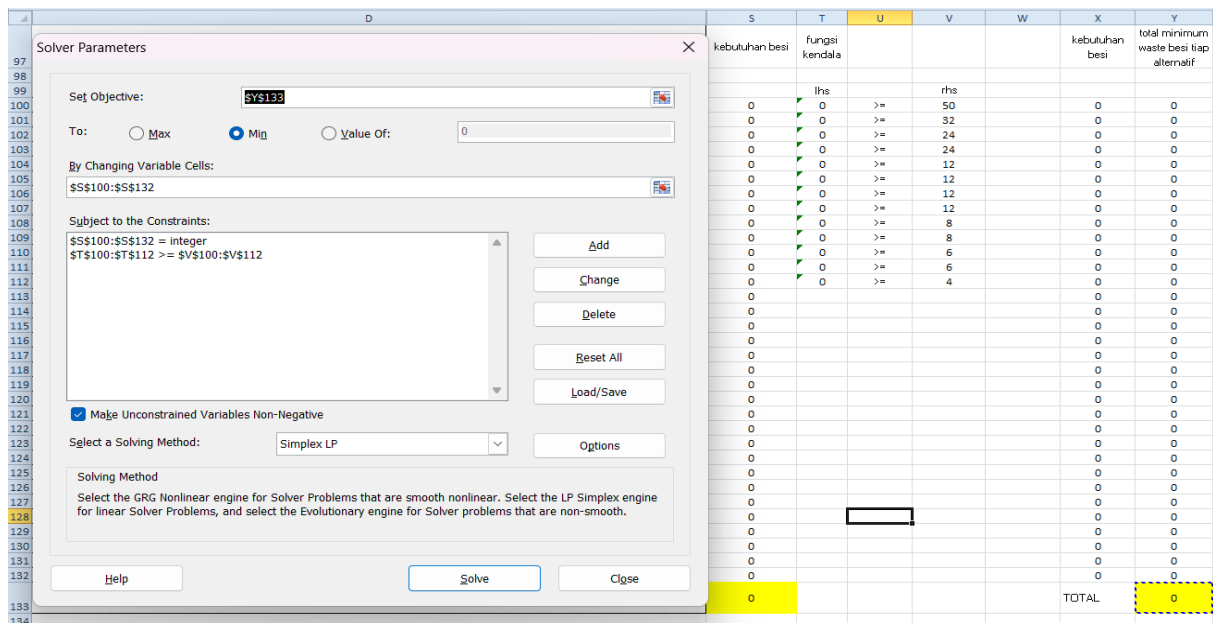
Tabel 4. Fungsi Kendala (*Constraints*)

lhs		rhs
$X3 + 2X4 + X5 + X7 + 2X12 + 2X13 + X14 + 2X19 + X22 + 5X23 + X26 + 4X27 + X28 + 4X30$	\geq	50
$2X3 + 2X4 + 3X5 + X6 + X7 + 2X8 + X12 + X13 + X15 + 2X16 + X17 + 2X18 + 3X19 + 2X21 + 2X22 + 3X24 + X26 + 2X28 + X30$	\geq	32
$X3 + X6 + X10 + X14 + X15 + X21 + X25 + X26 + X29$	\geq	24
$X6 + X7 + X8 + 2X11 + X12 + 4X17 + X19 + 2X22 + 2X25 + X27 + X31$	\geq	24
$X16 + X31$	\geq	12
$X1$	\geq	12
$X2 + X32$	\geq	12
$2X10 + 3X18 + X21 + X24 + 3X28$	\geq	12
$X2 + X13 + X27$	\geq	8
$X4 + X7 + X11 + X14 + X20$	\geq	8
$X4 + 4X5 + X6 + 2X7 + 5X8 + X9 + X10 + 3X11 + 3X13 + 3X15 + 2X18 + 7X20 + X22 + 4X24 + X26 + 4X29 + X32$	\geq	6
$X12$	\geq	6
$X9 + X33$	\geq	4

Persamaan Tabel 4 diambil dari persamaan fungsi kendala. Setelah memasukkan *constraints* ke persamaan lhs nya, kemudian menggunakan aplikasi *solver* untuk mendapatkan hasil dari kebutuhan besi dan *waste* bersih totalnya.

Berikut ini adalah langkah-langkah menggunakan program *solver*

1. *set objective* pada penelitian ini yaitu total keseluruhan minimum *waste* besi.
2. *to* pada penelitian ini menggunakan min karena tujuan dari penelitian ini untuk meminimumkan *waste* besi.
3. *By changing variable cells* yang dipilih yaitu kebutuhan besinya.
4. *Subject to the constraints* adalah batasannya, batasan yang pertama masukin lhs \geq rhs, kemudian batasan kedua hasil kebutuhan besinya harus *integer/* bilangan bulat.
5. *Select a solving method* menggunakan metode *simplex*.
6. Setelah menambahkan semua batasan, kemudian klik *solve* untuk menjalankan *solver*.



Gambar 4. Penyelesaian Menggunakan Solver

Output data:

Total keseluruhan minimum *waste* besi = 12,676 m

Jumlah besi tulangan dengan panjang 12 meter untuk opsi pematangan.:

X1 = 12 batang

- X2 = 12 batang
- X3 = 18 batang
- X4 = 8 batang
- X9 = 4 batang
- X10 = 6 batang
- X12 = 8 batang
- X16 = 12 batang
- X17 = 4 batang

Jumlah kebutuhan besi = 12 + 12 + 18 + 8 + 4 + 6 + 8 + 12 + 4 = 84 batang

Hasil Analisis Perhitungan Metode *Linear Programming*

Berikut ini adalah hasil dari semua pekerjaan besi pada proyek rumah tinggal x. Dalam perhitungan dengan metode *Linear Programming*, hasil dari *waste* besinya menjadi lebih kecil tetapi ada beberapa kebutuhan besi menjadi lebih besar dari lapangan.

Tabel 5. Hasil Analisis Lapangan dan *Linear Programming*

Pekerjaan	Diameter (mm)	Lapangan		Solver, Constraints \geq	
		waste (m)	kebutuhan (batang 12m)	waste (m)	kebutuhan (batang 12 m)
Sloof	10	199,39	137	11,57	781
	8	2,1	21	1,5	15
	12	213,744	64	213,744	64
	16	251,859	96	12,676	84
Balok	10	485,64	234	38,31	264
	8	24,924	55	6,204	47
	12	213,744	64	213,744	64
	16	255,561	96	12,676	84
Kolom	10	290,448	220	53,718	259
	8	10,32	30	10,32	30
	12	277,2	84	277,2	84
	16	554,4	168	554,4	168

Karena ada beberapa kebutuhan besi pada *Linear Programming* yang melebihi dari kebutuhan besi di lapangan, maka solusi yang dapat dilakukan yaitu dengan menggantikan simbol (\geq) menjadi (=) pada fungsi kendala (*constraints*) agar tidak menyebabkan kelebihan anggaran yang sia-sia. Dengan menggantikan batasan menjadi (=), maka jumlah kebutuhan besi dapat dibatasi agar sesuai dengan kebutuhan besi di lapangan atau tidak jauh dari jumlah kebutuhan besi yang dibutuhkan di lapangan. Cara pengerjaan untuk menggantikan simbol menjadi (=), sama seperti pengerjaan menggunakan simbol (\geq). Berikut ini adalah perbandingan antara hasil analisis di lapangan dengan menggunakan *constraints* (\geq) dan *constraints* (=).

Tabel 6. Hasil Analisis Perbandingan Lapangan, *Constraints* (\geq) dan *Constraints* (=)

pekerjaan	diameter (mm)	Lapangan		solver, constraints \geq		solver, constraints =	
		waste (m)	kebutuhan (batang 12m)	waste (m)	kebutuhan (batang 12 m)	waste (m)	kebutuhan (batang 12 m)
Sloof	10	199,39	137	11,57	781	242,74	137
	8	2,1	21	1,5	15	1,5	15
	12	213,744	64	213,744	64	213,744	64
	16	251,859	96	12,676	84	33,492	76
Balok	10	485,64	234	38,31	264	141,56	196
	8	24,924	55	6,204	47	6,116	46
	12	213,744	64	213,744	64	213,744	64
	16	255,561	96	12,676	84	33,492	76

Tabel 7 (Lanjutan). Hasil Analisis Perbandingan Lapangan, *Constraints* (\geq) dan *Constraints* ($=$)

pekerjaan	diameter (mm)	Lapangan		solver, constraints \geq		solver, constraints $=$	
		waste (m)	kebutuhan (batang 12m)	waste (m)	kebutuhan (batang 12 m)	waste (m)	kebutuhan (batang 12 m)
Kolom	10	290,448	220	53,718	259	92,908	203
	8	10,32	30	10,32	30	10,044	29
	12	277,2	84	277,2	84	277,2	84
	16	554,4	168	554,4	168	554,4	168

Setelah mengubah tanda menjadi ($=$), maka didapatkan hasil kebutuhan besi menjadi lebih kecil atau sama dengan kebutuhan besi pada tanda (\geq) tetapi *waste* besinya menjadi lebih besar dari tanda (\geq). Dengan ini maka akan dilakukan analisis lebih lanjut dengan mengubah satuan m menjadi satuan kg.

Tabel 8. Hasil Analisis Dalam Bentuk kg

Peker-jaan	Dia-meter	Kebutuhan Besi (Kg)			Waste Besi (Kg)		
		Lapangan	<i>Constraints</i> (\geq)	<i>Constraints</i> ($=$)	Lapangan	<i>Constraints</i> (\geq)	<i>Constraints</i> ($=$)
Sloof	10	1.013,80	5.779,40	1.013,80	122,96	7,13	149,69
	8	99,54	71,10	71,10	0,83	0,59	0,59
	12	684,80	684,80	684,80	190,59	190,59	190,59
	16	1.824,00	1.596,00	1.444,00	398,78	20,07	53,03
Balok	10	1.731,60	1.953,60	1.450,40	299,48	23,62	87,30
	8	260,70	222,78	218,04	9,84	2,45	2,42
	12	684,80	684,80	684,80	190,59	190,59	190,59
	16	1.824,00	1.596,00	1.444,00	404,64	20,07	53,03
Kolom	10	1.628,00	1.916,60	1.502,20	179,11	33,13	57,29
	8	142,20	142,20	137,46	4,08	4,08	3,97
	12	898,80	898,80	898,80	247,17	247,17	247,17
	16	3.192,00	3.192,00	3.192,00	877,80	877,80	877,80
Jumlah		13.984,24	18.738,08	12.741,40	2.925,86	1.617,29	1.913,46

Contoh perhitungan dari satuan kg

Tabel 9. Berat Besi tiap Diameter dan *Waste* Besi per Batang

Diameter	Berat/Batang (Kg)	<i>Waste</i> Besi/Batang (Kg)
10	7,4	0,617
8	4,74	0,395
12	10,7	0,891
16	19	1,584

Kebutuhan besi lapangan = berat besi dia16 x kebutuhan besi dilapangan = 19 x 96 batang = 1824,00 kg

Kebutuhan besi *Constraints* (\geq) = berat besi dia 16 x kebutuhan besi *constraints* (\geq) = 19 x 84 btg = 1596,00 kg

Kebutuhan besi *Constraints* ($=$) = berat besi dia 16 x kebutuhan besi *constraints* ($=$) = 19 x 76 btg = 1444,00 kg

Waste besi lapangan = *waste* besi per batang dia 16 (kg) x *waste* besi lapangan = 1,584 x 251,859 m = 398,78 kg

Waste besi *Constraints* (\geq) = *waste* besi/btg dia 16 (kg) x *waste* besi *constraints* (\geq) = 1,584 x 12,676 m = 20,07 kg

Waste besi *Constraints* ($=$) = *waste* besi/btg dia 16 (kg) x *waste* besi *constraints* ($=$) = 1,584 x 33,492 m = 53,03 kg

Tabel 10 Hasil Selisih Antara *Constraints* (\geq) dan *Contstraints* ($=$)

Pekerjaan	Diameter	<i>Contstraints</i> (\geq)	Selisih Antara <i>Contstraints</i> (\geq) dengan <i>Contstraints</i> ($=$)				
		kg	batang	Kg	Total (Kg)	Persentase (%)	
Sloof	10	8131,3	644	4.765,60	4917,6	82,45	60,47741
	8		0	0,00		0	
	12		0	0,00		0	
	16		8	152,00		9,5	
Balok	10	4457,18	68	503,20	659,94	25,8	14,80622
	8		1	4,74		2,2	
	12		0	0,00		0	
	16		8	152,00		9,5	
Kolom	10	6149,6	56	414,40	419,14	21,7	6,815728
	8		1	4,74		3,4	
	12		0	0,00		0	
	16		0	0,00		0	
Jumlah		18.738,08	786,00	5.996,68	5.996,68	32,00	32,00

Berikut ini adalah hasil pengurangan atau selisih dari perhitungan tanda (\geq) dengan ($=$).

Contoh perhitungan analisis perbandingan *constraints* (\geq) dengan *constraints* ($=$):

Constraints (\geq) (kg) = D10 + D8 + D12 + D16 = 5779,4 + 71,1 + 684,8 + 1596 = 8131,3 kg

Batang diameter 16 = kebutuhan besi *constraints* (\geq) - kebutuhan besi *constraints* ($=$) = 84 - 76 = 8 batang

Kg diameter 16 = kebutuhan besi *constraints* (\geq) kg - kebutuhan besi *constraints* ($=$) Kg = 1596 - 1444 = 152 kg

Total Kg sloof = D10+D8+D12+D16 = 4765,6+0+0+152 = 4917,6 kg

Persentase Diameter 16 = Kg dia 16 / *constraints* (\geq) kg dia 16 x 100% = 152 kg / 1596 kg x 100% = 9,5 %

Total persentase sloof = Total (kg) sloof / Total *constraints* (\geq) kg sloof x 100% = 4917,6 / 8131,3 x 100% = 60,4%

Tabel 11. Hasil Analisis Penghematan Berdasarkan Diameter

Pekerjaan	Diameter	Penghematan <i>Constraints</i> ($=$) Terhadap Lapangan			
		batang	kg	persentase (%)	Rupiah (Rp)
Sloof	10	0	0	0,00	Rp0
	8	6	28,44	28,57	Rp199.080
	12	0	0	0,00	Rp0
	16	20	380	20,83	Rp2.660.000
Balok	10	38	281,2	16,24	Rp1.968.400
	8	9	42,66	16,36	Rp298.620
	12	0	0	0,00	Rp0
	16	20	380	20,83	Rp2.660.000
Kolom	10	17	125,8	7,73	Rp880.600
	8	1	4,74	3,33	Rp33.180
	12	0	0	0,00	Rp0
	16	0	0	0,00	Rp0
Jumlah		111	1.242,84	9	Rp8.699.880

Contoh perhitungan hasil penghematan berdasarkan diameter: (Biaya per 1 kg = Rp7.000,-)

Batang = batang lapangan - batang *constraints* ($=$) = 96 batang -76 batang = 20 batang

Kg = kebutuhan besi (kg) lapangan - kebutuhan besi (kg) *constraints* ($=$) = 1824 -1444 = 380 kg

Persentase = kg penghematan / kg lapangan x 100% = (380 / 1824) x 100% = 20,83%

Rupiah (1 kg = Rp7.000) = kg penghematan x biaya per kg = 20,83 x Rp7.000 = Rp2.660.000,-

Tabel 12. Hasil Penghematan Constraints (=) Terhadap Lapangan pada Masing-Masing Pekerjaan

Pekerjaan	Lapangan (Kg)	Constraints (=) (kg)	Penghematan Constraints (=) terhadap Lapangan		
			Kg	%	Rp
Sloof	3.622,14	3.213,70	408,44	11,28	Rp2.859.080
Balok	4.501,10	3.797,24	703,86	15,64	Rp4.927.020
Kolom	5.861,00	5.730,46	130,54	2,23	Rp913.780
Jumlah	13.984,24	12.741,40	1.260,84	9	Rp8.699.880

Contoh perhitungan hasil penghematan pada masing-masing pekerjaan

Lapangan Sloof = $D10+D8+D12+D16 = 1013,8+99,54+684,8+1824 = 3622,14$ Kg

Constraints (=) Sloof = $D10+D8+D12+D16 = 1013,8+71,1+684,8+1444 = 3213,7$ Kg

penghematan (kg) sloof = Lapangan - constraints (=) = $3640,14 - 3213,7 = 426,44$ kg

Persentase (%) sloof = $\frac{\text{Penghematan (kg)}}{\text{lapangan}} \times 100\% = \frac{426,44}{3640,14} \times 100\% = 11,71\%$

Rupiah (1kg = Rp7.000) = $\text{Penghematan (kg)} \times \text{biaya per kg} = 426,44 \times \text{Rp}7.000 = \text{Rp}2.985.080,-$

Jadi, penghematan yang didapat dari menggunakan program *linear programming* sebesar Rp8.699.880,- dengan persentase 9% untuk keseluruhan proyek rumah tinggal. Ada juga solusi lain dalam melakukan optimasi untuk membuat *waste* besi dan jumlah kebutuhan besi menjadi lebih kecil dengan cara menggabungkan seluruh tulangan dengan diameter yang sama. Seperti contoh menggabungkan semua diameter 10 mm, 8 mm, 12 mm, dan 16 mm dalam semua pekerjaan. Berikut ini adalah hasil analisis berdasarkan penggabungan diameter pada semua pekerjaan:

Tabel 13. Hasil Analisis Berdasarkan Diameter Besi Tulangan

Diameter	Kebutuhan besi (batang)		Waste besi (m)	
	Lapangan	Constraints (=)	Lapangan	Constraints (=)
10	591	536	975,478	477,208
8	106	90	37,344	17,66
12	212	212	704,688	704,688
16	360	320	1.061,82	621,384

kebutuhan besi lap diameter 16 = $96+96+168 = 360$ batang

kebutuhan besi constraints (=) d 16 = $76+76+168 = 320$ batang

waste besi lapangan diameter 16 = $251,859+255,561+554,4 = 1061,82$ m

waste besi Constraints (=) d 16 = $33,492+33,492+554,4 = 621,384$ m

Untuk diameter 10 mm , 8 mm, 12 mm, dan 16 mm dilakukan analisis ulang dengan menambahkan tipe-tipe panjang dan jumlah potongan dengan menggunakan metode yang sama seperti sebelumnya. Berikut ini adalah hasil analisis ulang:

Tabel 14. Hasil Analisis Ulang untuk Diameter yang Digabungkan

Diameter	Kebutuhan besi (batang)		Waste besi (m)	
	Lapangan	Constraints (=)	Lapangan	Constraints (=)
10	591	536	975,478	477,208
8	106	84	37,344	10,608
12	212	212	704,688	704,688
16	360	320	1.061,82	621,384

Dengan menggabungkan pemotongan tulangan berdasarkan diameternya, *waste* besi dan jumlah kebutuhannya bisa lebih kecil. Berikut ini adalah hasil dari penghematan setelah digabungkan diameternya pada semua pekerjaan.

Tabel 15. Hasil Penghematan *Constraints* (=) Terhadap Lapangan pada Masing-Masing Diameter

Diameter	Lapangan (Kg)	<i>Constraints</i> (=) (kg)	Penghematan <i>Constraints</i> (=) terhadap Lapangan		
			Kg	%	Rp
10	4.373,40	3.966,40	407,00	9,31	Rp2.849.000
8	502,44	398,16	104,28	20,75	Rp729.960
12	2.268,40	2.268,40	0,00	0,00	Rp0
16	6.840,00	6.080,00	760,00	11	Rp5.320.000
Jumlah	13.984,24	12.741,40	1.242,84	9,1	Rp8.898.960

Contoh perhitungan

Lapangan = D16 sloof + D16 balok + D16 kolom = 1824+1824+3192 = 6840 kg

Constraints (=) = D16 sloof + D16 balok + D16 kolom = 1444+1444+3192 = 6080 kg

penghematan (kg) = Lapangan - *constraints* (=) = 6840 – 6080 = 760 kg

Persentase (%) = Penghematan (kg) / lapangan x 100% = (760 / 6840) x 100% = 11%

Rupiah (1kg = Rp7.000) = Penghematan (kg) x biaya per kg = 760 x Rp7.000 = Rp5.320.000,-

Jadi, penghematan yang didapat dari menggabungkan diameter dari semua pekerjaan sebesar Rp8.898.960,- dengan persentase 9,1% untuk keseluruhan proyek rumah tinggal. Jika dibandingkan dengan masing-masing diameter pada masing-masing pekerjaan, hasil penghematannya hampir sama hanya sedikit lebih besar yaitu Rp8.898.960 – Rp8.699.880 = Rp199.080,-.

Rangkuman Hasil Perhitungan

Berikut ini adalah rangkuman hasil analisis dari perhitungan proyek rumah tinggal x.

1. Variasi panjang potongan dan variabel keputusan

Pada pembuatan awal model *linear programming*, yang harus dibuat terlebih dahulu yaitu alternatif-alternatif pemotongan yang merupakan variabel keputusannya. Berikut ini adalah rangkuman alternatif pemotongan dan panjang potongan dalam bentuk tabel.

Tabel 16. Rangkuman Jumlah Variasi Panjang Potongan dan Variabel Keputusan Berdasarkan masing-masing Pekerjaan

Pekerjaan	Diameter	Jumlah	
		panjang potongan	Variabel keputusan
Sloof	10	11	25
	8	1	1
	12	5	5
	16	13	33
Balok	10	22	44
	8	1	1
	12	5	5
Kolom	16	13	33
	10	3	7
	8	1	1
	12	1	1
	16	1	1

Hasil rangkuman dibagi menjadi 2 yaitu hasil rangkuman dengan masing-masing pekerjaan seperti tabel 15 dan hasil pekerjaan dengan digabungkan semua diameter yang sama seperti pada tabel 16.

Tabel 17. Rangkuman Jumlah Variasi Panjang Potongan dan Variabel Keputusan Berdasarkan masing-masing Diameter

Diameter	Jumlah	
	panjang potongan	Variabel keputusan
10	36	76
8	3	4
12	6	6
16	14	34

2. Selisih antara constraints (\geq) dan constraints (=)

Berikut ini adalah selisih penghematan menggunakan constraints (\geq) dan constraints (=).

- Selisih total kebutuhan besi dalam kg = 18.738,08 - 12.741,40 = 5.996,68 kg
- Selisih total minimum waste dalam kg = 1.913,46 - 1.617,29 = 296,17 kg

3. Perbandingan Analisis Lapangan, Constraints (\geq), dan Constraints (=)

Tabel 18. Rangkuman Kebutuhan Besi dan Waste besi dalam Satuan Kg

Kebutuhan Besi (kg)			Waste Besi (kg)		
Lapangan	Constraints (\geq)	Constraints (=)	Lapangan	Constraints (\geq)	Constraints (=)
13.984,24	18.738,08	12.741,40	2.925,86	1.617,29	1.913,46

4. Hasil penghematan menggunakan Linear Programming

Berikut ini adalah rangkuman dari hasil analisis penghematan constraints (=) terhadap lapangan berdasarkan masing-masing pekerjaan dan diameter yang telah digabungkan.

Tabel 19. Rangkuman Hasil Penghematan Constraints (=) terhadap Lapangan Berdasarkan Pekerjaan dan Diameter

Keterangan	Proyek Rumah tinggal	
	%	Biaya (Rp)
Pekerjaan	9	Rp8.699.880
Diameter	9,1	Rp8.898.960

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Pada persamaan Fungsi kendala penelitian ini dengan menggunakan program Solver terdapat 2 tanda yang digunakan yaitu " \geq " dan "=".
 - Jika menggunakan simbol " \geq ", maka kebutuhan besi yang dihasilkan lebih besar dari lapangan dan menghasilkan waste yang paling sedikit.
 - Jika menggunakan tanda "=" maka kebutuhan besi yang dihasilkan menjadi kecil dan waste totalnya menjadi lebih besar dari tanda " \geq ".

Jadi dalam penelitian ini, fungsi kendala dengan tanda "=" digunakan untuk mendapatkan kebutuhan besi yang minimum sehingga diperoleh penghematan besi tulangan antara menggunakan *Linear Programming* dengan hasil di lapangan.
- b. Untuk mencari penghematan pada penelitian ini dengan menggunakan program Solver, ada 2 cara yang digunakan dengan metode *linear programming* yaitu:
 - Mengerjakan berdasarkan masing-masing pekerjaan (pekerjaan sloof, balok, dan kolom). Penghematan yang dihasilkan dari masing-masing pekerjaan pada penelitian ini sebesar Rp8.699.880 dengan presentase 9%.
 - Mengerjakan berdasarkan diameter yang digabungkan. Penghematan yang dihasilkan berdasarkan diameter yang digabungkan sebesar Rp8.898.960 dengan presentase 9,1%.

Dari analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa tidak adanya peningkatan yang cukup signifikan dari hasil berdasarkan pekerjaan dan hasil diameter yang digabungkan. Namun, pengerjaan dengan mengkombinasikan diameter yang sama memerlukan waktu pengerjaan yang lebih lama karena banyaknya jenis variasi panjang potongan. Jadi cara pengerjaan yang pertama lebih efektif dalam penelitian ini.

- c. Dalam penelitian ini metode yang diterapkan yaitu *linear programming*, cara tersebut cukup mudah digunakan, tetapi jika variasi panjang potongannya semakin banyak maka jumlah alternatif pemotongan yang akan dihitung akan semakin banyak dan memerlukan waktu yang cukup lama. Mengingat perhitungan alternatif pemotongan dibuat secara manual, maka masih bisa terjadinya *human error* atau kesalahan dalam menghitung alternatif pemotongan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuhassan, I. A., & Nasereddin, H. H. (2011). Cutting stock problem: Solution behaviors. *International Journal of Recent Research*, 6(4), 429-433.
- Formoso, C. T., Soibelman, L., De Cesare, C., & Isatto, E. L. (2002). Material waste in building industry: main causes and prevention. *Journal of construction engineering and management*, 128(4), 316-325.
- Kork, M. A. N. (2013). *Perhitungan kebutuhan tulangan besi dengan memperhitungkan optimasi waste besi pada pekerjaan balok dengan program microsoft excel*. [Skripsi, Universitas Negeri Sebelas Maret]. <https://digilib.uns.ac.id/dokumen/detail/46323>
- Nugraha, P. (1985). *Manajemen Proyek Konstruksi 1*. Surabaya: Kartika Yudha.
- Siswanto. (2007). *Tugas Operasi Riset Linear Programming*. Universitas Mahasaraswati Denpasar.
- Stapleton, D. M., Hanna, J. B., & Markussen, D. (2003). Marketing strategy optimization: Using linear programming to establish an optimal marketing mixture. *American Business Review*, 21(2), 54.
- Tam, V. W. (2008). On the effectiveness in implementing a waste-management-plan method in construction. *Waste management*, 28(6), 1072-1080.

