



Optimisasi Kebutuhan Besi Beton pada Konstruksi Bangunan Menggunakan Integer Programming

Prpto Tri Supriyo^{a,*}, Bib Paruhum Silalahi^b, Amril Aman^c, Vina Izza Nurika^d

^{a, b, c, d} Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680, Indonesia

* Alamat Surel: praptosu@apps.ipb.ac.id

Abstrak

Besi beton merupakan salah satu komponen penting dalam konstruksi bangunan. Pemotongan besi beton dalam prakteknya akan menyesuaikan kebutuhan yang didasarkan pada keragaman ukuran yang tersedia. Oleh karenanya, pemotongan bahan persediaan besi beton ini perlu direncanakan agar memberikan hasil sesuai kebutuhan serta meminimalkan sisa pemotongan yang tidak terpakai. Paper ini bertujuan memberikan model eksak berdasar *integer programming* yang dapat digunakan untuk menentukan skenario pemotongan besi beton yang diperlukan serta sekaligus meminimalkan sisa hasil pemotongan. Solusi model berupa rekomendasi kombinasi pola pemotongan besi beton yang meminimalkan sisa pemotongan. Model diimplementasikan menggunakan bantuan bahasa pemrograman Python dan perangkat lunak optimisasi Lingo pada proyek pembangunan Kantor Kelurahan Kota Surakarta, yaitu Kantor Kelurahan Gilingan, Kantor Kelurahan Jagalan, dan Kantor Kelurahan Kauman. Hasil implementasi memberikan sisa pemotongan 5.57% dari total besi yang digunakan. Berdasarkan waktu eksekusi model yang relatif sangat cepat pada saat implementasi menunjukkan bahwa model dapat dipandang *reasonable* untuk digunakan.

Kata kunci:

integer programming, optimisasi, sisa pemotongan

© 2023 Dipublikasikan oleh Jurusan Matematika, Universitas Negeri Semarang

1. Pendahuluan

Besi beton merupakan komponen utama untuk meningkatkan kekuatan dan keamanan struktur bangunan. Pemotongan besi beton haruslah menyesuaikan keragaman ukuran yang tersedia dan ukuran yang sesuai dengan kebutuhan. Oleh karenanya, pemotongan besi beton sebagai salah satu material konstruksi perlu direncanakan agar dapat memberikan hasil yang optimal, baik secara ekonomi maupun keramahan lingkungan. Pemotongan besi beton yang optimal akan meminimalkan sisa material konstruksi.

Faktor yang menjadi kendala pemotongan adalah perbedaan karakteristik materi yang tersedia dengan materi yang dibutuhkan. Besi beton yang digunakan dalam konstruksi bangunan tersedia secara massal dengan panjang dan diameter tertentu, sedangkan proyek konstruksi membutuhkan materi tersebut dengan karakter yang bervariasi, bergantung pada komponen bangunan yang akan dibuat. Pemotongan yang dilakukan dengan pola secara acak (tanpa perencanaan) dapat menimbulkan biaya proyek yang membengkak dan limbah konstruksi yang berlebihan. Permasalahan ini dapat diselesaikan dengan menentukan pola-pola pemotongan pada besi beton yang tersedia agar kebutuhan proyek terpenuhi dengan sisa pemotongan yang paling sedikit.

Masalah pemotongan ini dapat dipandang sebagai *cutting stock problem* (CSP) bertipe satu dimensi karena pola pemotongan yang digunakan hanya bergantung pada satu pola, yaitu panjang besi beton. Optimisasi CSP satu dimensi bertujuan memperoleh pola pemotongan terbaik yang memenuhi kendala permintaan dengan sisa hasil pemotongan minimum.

CSP satu dimensi merupakan salah satu permasalahan optimisasi dalam pemotongan bahan persediaan yang bertujuan mendapatkan sisa pemotongan seminimum mungkin (Octarina, Bangun, & Avifana, 2017). CSP satu dimensi hanya berfokus pada satu pola pemotongan, panjang atau lebar objek. CSP bertujuan

To cite this article:

Supriyo, P.T., Silalahi, B.P., dkk. (2023). Optimisasi Kebutuhan Besi Beton pada Konstruksi Bangunan Menggunakan Integer Programming. *PRISMA, Prosiding Seminar Nasional Matematika* 6, 681-686

mencapai pola pemotongan terbaik sehingga dapat memenuhi persyaratan yang dibutuhkan. Tujuan utama CSP adalah meminimalkan limbah material ketika jumlah pesanan telah ditentukan sebelumnya, menghasilkan pola yang optimal dan hasil pemotongan yang sesuai (Zheng & Lu, 2016).

Penelitian ini bertujuan membangun model optimisasi berdasar *integer programming* (IP) yang meminimalkan sisa hasil pemotongan besi beton guna memenuhi kebutuhan. Model dianalisis secara matematik yang selanjutnya diimplementasikan menggunakan bantuan bahasa pemrograman Python dan perangkat lunak optimisasi Lingo 17.0 pada proyek pembangunan Kantor Kelurahan Kota Surakarta pada tahun 2014, yaitu Kantor Kelurahan Gilingan, Kantor Kelurahan Jagalan, dan Kantor Kelurahan Kauman.

2. Metode

Secara umum, penelitian diawali dengan mendeskripsikan masalah secara informal, kemudian membangun model optimisasi beserta analisis matematiknya, dan yang terakhir melakukan implementasi model menggunakan bantuan perangkat lunak sebagai bagian dari uji model.

Dengan tidak menghilangkan sifat keumuman, deskripsi masalah dibangkitkan dari lingkup proyek pembangunan Kantor Kelurahan Kota Surakarta pada tahun 2014, yaitu Kantor Kelurahan Gilingan, Kantor Kelurahan Jagalan, dan Kantor Kelurahan Kauman yang akan dikaji sebagai model. Namun demikian model optimisasi yang dibangun tetap bersifat umum sehingga dapat diimplementasikan untuk proyek manapun dengan menyesuaikan parameter-parameter yang terlibat.

Lingkup substansi meliputi kajian dan pembangunan model eksak berdasar IP guna menentukan skenario pemotongan besi beton yang dibutuhkan dengan fungsi objektif meminimumkan sisa potongan besi beton yang tidak terpakai. Model eksak berdasar IP dipilih mengingat bahwa model ini relatif fleksibel untuk dimodifikasi dan diadaptasi sesuai dengan kebutuhan.

Model selanjutnya dianalisis secara matematik dan diimplementasikan pada data pembangunan Kantor Kelurahan Kota Surakarta pada tahun 2014, yaitu Kantor Kelurahan Gilingan, Kantor Kelurahan Jagalan, dan Kantor Kelurahan Kauman. Model diimplementasikan menggunakan bantuan bahasa pemrograman Python dan perangkat lunak optimisasi Lingo 17.0.

3. Hasil dan Pembahasan

Deskripsi Masalah

Dibutuhkan r variasi panjang besi beton dengan panjang L_1, L_2, \dots, L_r masing-masing sebanyak D_1, D_2, \dots, D_r unit berturut-turut dengan diameter seragam. Tersedia besi beton dengan diameter seragam yang sesuai kebutuhan dengan panjang bervariasi, yakni S_1, S_2, \dots, S_p . Besi beton yang tersedia kemudian dipotong-potong sesuai panjang besi beton yang dibutuhkan dalam proyek. Tujuan model adalah menentukan banyaknya besi beton yang diperlukan beserta skenario pemotongan sehingga memenuhi kebutuhan dan menghasilkan sisa potongan yang minimum.

Formulasi Masalah

Model matematis pemotongan dapat diformulasikan menggunakan IP sebagai berikut.

Himpunan dan Indeks

$I = \{1, 2, \dots, p\}$, himpunan variasi panjang besi beton standar yang tersedia dengan indeks i

$K = \{1, 2, \dots, r\}$, himpunan variasi panjang besi beton yang dibutuhkan dengan indeks k

$J = \{1, 2, \dots, q(1), q(1) + 1, \dots, q(2), q(2) + 1, \dots, q(p)\}$, himpunan pola pemotongan besi beton dengan indeks j

$J = \{1, 2, \dots, q(1)\}$: pola pemotongan besi beton varian 1;

$\{q(1) + 1, q(1) + 2, \dots, q(2)\}$: pola pemotongan besi beton varian 2; ... ;

$\{q(p-1) + 1, q(p-1) + 2, \dots, q(p)\}$: pola pemotongan besi beton varian p

Parameter

S_i = panjang standar besi beton varian ke- i yang tersedia

C_{jk} = banyaknya besi beton varian panjang ke- k yang dapat dihasilkan dari pemotongan pola ke- j

L_k = panjang besi beton varian ke- k yang dibutuhkan

D_k = banyaknya besi beton varian ke- k yang dibutuhkan

Variabel Keputusan

X_j = banyaknya besi beton yang dipotong dengan pola ke- j

Fungsi Objektif

Fungsi objektif model adalah meminimalkan total sisa pemotongan dari tiap kombinasi pola, yaitu:

$$\min Z = \sum_{i=1}^p \left(\sum_{j=q(i-1)+1}^{q(i)} X_j * \left(S_i - \sum_{k=1}^r L_k * C_{jk} \right) \right), \text{ dengan } q(0) = 0$$

Kendala

1. Pola pemotongan bergantung pada panjang standar besi beton yang tersedia

$$\sum_{k=1}^r L_k * C_{jk} \leq S_1, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, q(1)\}$$

$$\sum_{k=1}^r L_k * C_{jk} \leq S_2, \quad \forall j \in \{q(1) + 1, q(1) + 2, \dots, q(2)\}$$

$$\vdots$$

$$\sum_{k=1}^r L_k * C_{jk} \leq S_p, \quad \forall j \in \{q(p-1) + 1, q(p-1) + 2, \dots, q(p)\}$$

2. Pemenuhan kebutuhan besi beton dengan varian panjang ke- k

$$\sum_{j=1}^{q(p)} X_j * C_{jk} = D_k, \quad \forall k$$

3. Kendala ketaknegatifan

$$X_j \geq 0, \quad \forall j$$

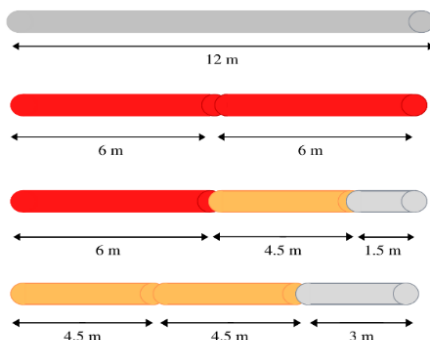
4. Kendala bilangan bulat

$$X_j \in \mathbb{Z}, \quad \forall j$$

Kombinasi Pola Pemotongan Besi Beton

Perhatikan bahwa model yang dibangun sebagaimana telah dijelaskan di bagian sebelumnya, memerlukan input himpunan pola pemotongan besi beton sesuai dengan kebutuhan yang dapat dipandang sebagai masalah yang krusial.

Sebagai ilustrasi, perhatikan Gambar 1. Misalkan dibutuhkan besi beton dengan panjang 6 m dan 4.5 m. Sebuah besi beton dengan panjang awal 12 m dapat dipotong menjadi 2 buah besi beton dengan panjang 6 m, atau 2 buah besi beton masing-masing sepanjang 6 m dan 4.5 m dengan sisa pemotongan 1.5 m, atau 2 buah besi beton sepanjang 4.5 m dengan sisa pemotongan 3 m. Skenario pemotongan kemudian dibuat ke dalam matriks yang memuat pola-pola pemotongan dan banyaknya hasil beserta sisa pemotongannya.



Gambar 1. Ilustrasi pola pemotongan pada besi beton dengan panjang awal 12 m

Berdasarkan penjelasan di atas, kombinasi pola pemotongan dapat dibuat dengan algoritme sebagai berikut:

1. Masukkan daftar S dengan anggota variasi panjang besi beton standar yang tersedia dengan urutan terpendek ke terpanjang.

2. Masukkan daftar D dengan anggota variasi panjang besi beton yang dibutuhkan dengan urutan terpanjang ke terpendek.
3. Untuk setiap i anggota S , bangkitkan daftar $CMaks$ dengan anggotanya adalah hasil bagi i dengan setiap k anggota D (hasil potong terbanyak yang bisa dihasilkan dari besi beton standar untuk satu variasi panjang besi yang dibutuhkan).
4. Untuk setiap j anggota $CMaks$, bangkitkan daftar $ListMaks$ dengan anggotanya adalah subdaftar bilangan terurut 0 sampai angka j .
5. Daftarkan pasangan terurut yang merupakan permutasi dari subdaftar-subdaftar $ListMaks$ dan masukkan ke variabel p .
6. Untuk setiap permutasi di p , kalikan tiap elemennya dengan tiap elemen $LDemand$ dan jumlahkan. Masukkan jumlah dari setiap perkalian elemen daftar ini ke variabel $Total$. $Total$ adalah panjang besi beton yang terpakai.
7. Jika $Total$ lebih besar atau sama dengan selisih panjang besi standar i dengan elemen terkecil D dan lebih kecil atau sama dengan i , cetak p .
8. Selesai.

Selanjutnya, untuk menentukan himpunan pola pemotongan besi beton ini digunakan bantuan bahasa pemrograman Python guna menghindari kesalahan perhitungan.

Implementasi Model

Implementasi model dimaksudkan sebagai bagian dari uji model apakah model *reasonable* digunakan khususnya dari sisi waktu eksekusi. Implementasi model menggunakan data kebutuhan besi beton untuk pondasi tiga proyek pembangunan Kantor Kelurahan Kota Surakarta pada tahun 2014, yaitu Kantor Kelurahan Gilingan, Kantor Kelurahan Jagalan, dan Kantor Kelurahan Kauman. Kebutuhan besi beton berdiameter 16 mm pada ketiga proyek ini diberikan di dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan besi beton

Panjang Besi Beton (m)	Kebutuhan (unit)
5.4	160
4.5	204
4.2	152
4.1	480
2.15	160

Sementara itu, variasi panjang besi beton yang tersedia adalah 12 m dan 15 m. Oleh karena kebutuhan yang beragam, besi beton tersebut harus dipotong-potong sesuai kebutuhan. Pemotongan tersebut direncanakan dengan menyusun beberapa pola dengan memperhatikan kriteria-kriteria berikut:

1. panjang total hasil pemotongan harus sama atau lebih pendek dari 12 m atau 15 m,
2. panjang sisa pemotongan kurang dari 2.15 m, dan
3. tidak ada duplikasi pola.

Menggunakan bantuan bahasa pemrograman Python, kombinasi pola yang dihasilkan dapat dilihat di dalam Tabel 2.

Tabel 2. Kombinasi pola pemotongan besi beton berdiameter 16 mm

Panjang Standar (S_i)	Pola (j)	Panjang Besi Beton (L_k)					Total Panjang	Sisa
		5.4	4.5	4.2	4.1	2.15		
12 m	1	1	1	0	0	0	9.9	2.1
	2	1	0	1	0	1	11.75	0.25
	3	1	0	0	1	1	11.65	0.35
	4	1	0	0	0	3	11.85	0.15
	5	2	0	0	0	0	10.8	1.2
	6	0	1	1	0	1	10.85	1.15
	7	0	1	0	1	1	10.75	1.25
	8	0	1	0	0	3	10.95	1.05

	9	0	2	0	0	1	11.15	0.85
	10	0	0	1	1	1	10.45	1.55
	11	0	0	1	0	3	10.65	1.35
	12	0	0	2	0	1	10.55	1.45
	13	0	0	0	1	3	10.55	1.45
	14	0	0	0	2	1	10.35	1.65
	15	0	0	0	0	5	10.75	1.25
15 m	16	1	1	1	0	0	14.1	0.9
	17	1	1	0	1	0	14	1
	18	1	1	0	0	2	14.2	0.8
	19	1	2	0	0	0	14.4	0.6
	20	1	0	1	1	0	13.7	1.3
	21	1	0	1	0	2	13.9	1.1
	22	1	0	2	0	0	13.8	1.2
	23	1	0	0	1	2	13.8	1.2
	24	1	0	0	2	0	13.6	1.4
	25	1	0	0	0	4	14	1
	26	2	0	1	0	0	15	0
	27	2	0	0	1	0	14.9	0.1
	28	2	0	0	0	1	12.95	2.05
	29	0	1	1	1	1	14.95	0.05
	30	0	1	1	0	2	13	2
	31	0	1	2	0	0	12.9	2.1
	32	0	1	0	1	2	12.9	2.1
	33	0	1	0	2	1	14.85	0.15
	34	0	1	0	0	4	13.1	1.9
	35	0	2	1	0	0	13.2	1.8
	36	0	2	0	1	0	13.1	1.9
	37	0	2	0	0	2	13.3	1.7
	38	0	3	0	0	0	13.5	1.5
	39	0	0	1	1	3	14.75	0.25
	40	0	0	1	2	1	14.55	0.45
	41	0	0	1	0	5	14.95	0.05
	42	0	0	2	1	1	14.65	0.35
	43	0	0	2	0	3	14.85	0.15
	44	0	0	3	0	1	14.75	0.25
	45	0	0	0	1	5	14.85	0.15
	46	0	0	0	2	3	14.65	0.35
	47	0	0	0	3	1	14.45	0.55
	48	0	0	0	0	6	12.9	2.1
Kebutuhan (D_k)		160	204	152	480	160		

Berdasarkan penjelasan di atas, maka himpunan indeks dan parameter yang terkait dalam implementasi ini adalah sebagai berikut:

$I = \{1, 2\}$, himpunan variasi panjang standar yang tersedia dengan indeks i

$K = \{1, 2, \dots, 5\}$, himpunan variasi panjang besi beton yang dibutuhkan dengan indeks k

$J = \{1, 2, \dots, 48\}$, himpunan pola pemotongan besi beton dengan indeks j

$J = \{1, 2, \dots, 15\}$: pola pemotongan besi beton varian 1;

$\{16, 17, \dots, 48\}$: pola pemotongan besi beton varian 2
 S_i = panjang standar besi beton varian ke- i yang tersedia (lihat Tabel 2)
 C_{jk} = banyaknya besi beton varian panjang ke- k yang dapat dihasilkan dari pemotongan pola ke- j (lihat Tabel 2)
 L_k = panjang besi beton varian ke- k yang dibutuhkan (lihat Tabel 2)
 D_k = banyaknya besi beton varian ke- k yang dibutuhkan (lihat Tabel 2)

Menggunakan bantuan perangkat lunak Lingo 17.0 dan laptop berprosesor Intel Core i7 dan RAM 16 GB, dalam waktu kurang dari satu detik diperoleh hasil optimum yang diberikan di dalam Tabel 3. Jumlah keseluruhan besi beton yang terpakai sebanyak 332 unit dengan panjang standar 15 m serta menghasilkan sisa pemotongan sebesar 247.6 m atau 5.57% dari total besi yang digunakan.

Tabel 3. Pola-pola pemotongan yang memberikan hasil optimum

Panjang Standar	Pola Pemotongan Besi Beton (j)	Banyaknya Besi Beton yang Digunakan
15 m	17	20
	24	140
	29	152
	33	8
	36	12
	Jumlah	332

4. Simpulan

Dalam paper ini, telah diperlihatkan bahwa masalah pemotongan satu dimensi pada besi beton dapat dimodelkan sebagai masalah IP dengan fungsi objektif meminimumkan sisa pemotongan. Model dapat diselesaikan dengan bantuan bahasa pemrograman Python dan perangkat lunak optimisasi Lingo. Implementasi model pada pemotongan besi beton dalam proyek pembangunan Kantor Kelurahan Kota Surakarta pada tahun 2014 menghasilkan solusi optimum dalam waktu kurang dari satu detik dengan sisa pemotongan sebesar 5.57% dari total besi yang digunakan.

Daftar Pustaka

- Carter MW, Price CC. (2017). *Operations research: a practical introduction*. Crc Press.
- Hartono W, Hartomo C, Sobriyah S. (2015). Analisis dan evaluasi sisa material konstruksi menggunakan FTA (*Fault Tree Analysis*) studi kasus pada proyek pembangunan kelurahan di Surakarta. (Skripsi). Surakarta (ID): Fakultas Teknik, UNS.
- Octarina S, Bangun PBJ, Avifana M. (2017). Reduksi pola pemotongan kertas pada cutting stock problem (CSP) satu dimensi. *Annual Research Seminar (ARS)* 2(1): 224-250.
- Porwal A, Hewage KN. (2012). Building information modeling-based analysis to minimize waste rate of structural reinforcement. *Journal of construction engineering and management* 138(8): 943-954.
- Rao SS. (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. John Wiley & Sons.
- Sabry SLES, Hartono W, & Sugiyarto. (2013). Model optimasi pemotongan besi tulangan pelat lantai dengan program linear. *Matriks Teknik Sipil* 1:3.
- Zheng C, Lu M. (2016). Optimized reinforcement detailing design for sustainable construction: slab case study. *Procedia Engineering* 145: 1478-1485.