

OPTIMASI LOKASI GUDANG LOGISTIK PENANGGULANGAN BENCANA DI KABUPATEN BOGOR MENGGUNAKAN *INTEGER PROGRAMMING*

*F. Hanum¹, U.R. Insani², A. Aman³

^{1,3)} Program Studi Matematika, Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika,
Institut Pertanian Bogor, Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga Bogor.

²⁾SMK Negeri 4 Depok, Jl. Kramat 3 No. 16, Sukatani, Tapos, Kota Depok

*corresponding author fhanum@apps.ipb.ac.id, ulfahrohmah49@gmail.com
aaman@apps.ipb.ac.id,

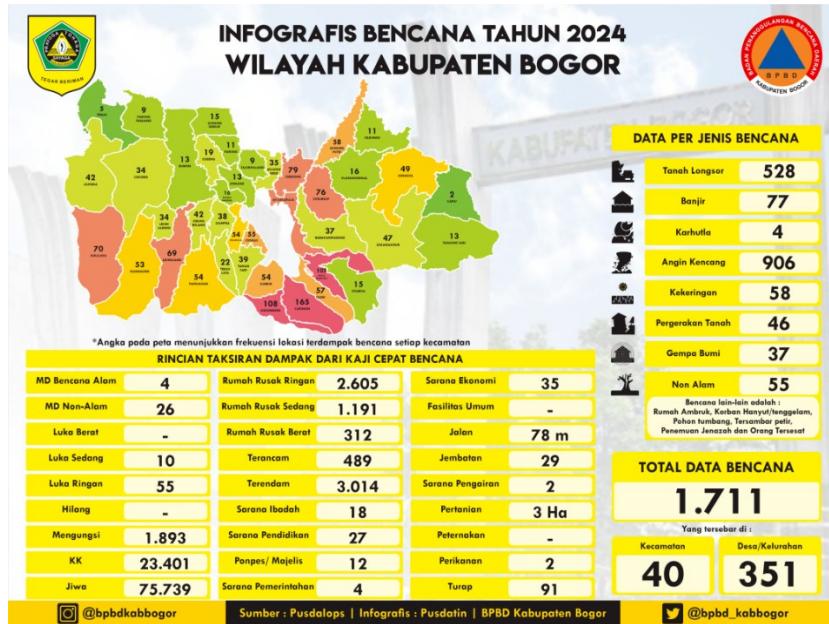
Abstrak

Kabupaten Bogor termasuk salah satu kabupaten rawan bencana di Jawa Barat. Ketika terjadi bencana, diperlukan bantuan logistik untuk didistribusikan kepada para korban bencana. Untuk efisiensi pendistribusian, Kabupaten Bogor membutuhkan gudang penyimpanan logistik sendiri yang lokasinya juga berada di daerah Kabupaten Bogor agar bantuan logistik dapat segera didistribusikan ke daerah bencana di Kabupaten Bogor. Tujuan penelitian ini adalah membangun model optimisasi untuk menentukan tipe dan lokasi gudang yang akan dibangun agar meminimumkan biaya pembangunan gudang dengan syarat semua kecamatan dapat dilayani. Parameter yang dipertimbangkan yaitu waktu tempuh antar kecamatan, kapasitas gudang, jumlah penduduk di setiap kecamatan. Pembangunan gudang hanya dapat dilakukan pada daerah tertentu, yang memiliki risiko bencana rendah, disebut daerah potensial pembangunan gudang. Dari model matematika yang dikonstruksi telah dihasilkan lokasi gudang dan tipe gudang yang dibangun dengan biaya minimum namun tetap dapat melayani semua kecamatan.

Kata kunci: distribusi, gudang logistik, Kabupaten Bogor, logistik bencana, penentuan lokasi

1 Pendahuluan

Indonesia merupakan negara dengan tingkat kerawanan bencana yang tinggi. Hasil pengkajian risiko bencana di Indonesia tahun 2022-2026 menunjukkan informasi terkait tingkat bahaya, tingkat kerugian, tingkat kapasitas, dan tingkat risiko setiap bahaya yang kemudian diklasifikasikan menjadi tingkat rendah, sedang, dan tinggi. Berdasarkan data dari BNPB [baru], Provinsi Jawa Barat merupakan salah satu provinsi dengan tingkat bahaya, tingkat kerentanan, dan kelas risiko yang tinggi terhadap terjadinya bencana. Kabupaten Bogor termasuk wilayah yang sering terdampak bencana seperti banjir dan tanah longsor akibat kondisi geografis dan curah hujan yang tinggi. Data dari BPBD (Badan Penanggulangan Bencana Daerah) [4] Kabupaten Bogor pada Gambar 1 menunjukkan bahwa pada tahun 2024 terdapat 1711 kejadian bencana dengan data jenis, lokasi, dampak bencana, serta kerugian yang ditimbulkan oleh bencana tersebut.



Gambar 1 Data bencana di Kabupaten Bogor Tahun 2024

Dalam Tabel 1 berikut diberikan data jenis dan kejadian bencana di Kabupaten Bogor dalam kurun waktu 5 tahun terakhir, dengan bencana angin kencang dan tanah longsor masih sangat dominan terjadi.

Tabel 1. Kejadian bencana di Kabupaten Bogor 2020-2024

Kejadian Bencana	2020	2021	2022	2023	2024	Total	Persen-tase
Tanah longsor	428	513	404	487	528	2360	31,20
Banjir	175	112	107	87	77	558	7,38
Kebakaran	41	27	20	49	4	141	1,86
Angin kencang	375	449	362	699	906	2791	36,90
Kekeringan	98	20	9	629	58	814	10,76
Pergeseran tanah	51	56	38	44	46	235	3,11
Gempa bumi	18	2	57	44	37	158	2,09
Lain-lain	151	104	74	122	55	506	6,69
Total per Tahun	1337	1283	1071	2161	1711	7563	

Sumber BPBD [5]

Pada saat terjadi bencana, kebutuhan logistik menjadi sangat krusial untuk mendukung kelangsungan hidup para korban. Bantuan logistik seperti makanan, air bersih, obat-obatan, selimut, dan perlengkapan darurat lainnya harus segera didistribusikan dari gudang penyimpanan ke lokasi-lokasi terdampak. Proses distribusi ini memerlukan koordinasi yang baik agar bantuan dapat sampai tepat waktu dan tepat sasaran, mengingat kondisi medan yang sering kali terputus atau sulit dijangkau (untuk kasus kejadian bencana tertentu seperti tanah longsor, banjir, atau gempa bumi). Oleh karena itu, sistem pengelolaan logistik yang efisien dan responsif sangat diperlukan untuk memastikan bahwa seluruh warga terdampak mendapatkan bantuan sesuai dengan kebutuhan mereka. Kondisi seperti ini menuntut kesiapan sistem penanggulangan

bencana, khususnya dalam penyediaan dan distribusi bantuan logistik secara cepat dan tepat sasaran.

Gudang logistik berperan penting dalam mendukung respons bencana karena berfungsi sebagai tempat penyimpanan bantuan sebelum dan saat bencana terjadi. Penempatan gudang yang strategis dapat mempercepat distribusi bantuan dan meningkatkan efektivitas pelayanan kepada masyarakat terdampak, sedangkan lokasi yang kurang tepat dapat menimbulkan keterlambatan dan inefisiensi distribusi [10]. Penentuan lokasi gudang logistik bencana merupakan permasalahan yang kompleks karena melibatkan keterbatasan kapasitas, cakupan wilayah pelayanan, serta keterbatasan sumber daya. Oleh karena itu, pendekatan berbasis model matematika diperlukan untuk membantu pengambilan keputusan secara sistematis dan terukur [1]. Menurut [7] dan [13], dalam *operations research*, permasalahan ini dikenal sebagai *facility location problem* dan dapat dimodelkan menggunakan *integer programming*, karena keputusan yang diambil bersifat diskret, seperti pemilihan lokasi gudang dan alokasi wilayah layanan. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan lokasi gudang dilakukan secara objektif dengan mempertimbangkan berbagai kendala yang ada.

Berdasarkan data BPBD Kabupaten Bogor, saat ini terdapat tiga gudang logistik di Kabupaten Bogor yaitu gudang logistik Departemen Sosial Kabupaten Bogor, gudang logistik Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Bogor, dan gudang logistik Palang Merah Indonesia (PMI) Cabang Kabupaten Bogor yang semuanya terletak di Kecamatan Cibinong. Lokasi gudang logistik yang terpusat di satu daerah dapat membutuhkan waktu yang cukup lama untuk sampai ke daerah yang terkena bencana alam. Oleh karena itu, gudang logistik perlu dibangun tersebar agar waktu yang dibutuhkan menuju daerah bencana alam dapat diminimalkan dan lokasi gudang logistik harus terletak di daerah yang aman dari bencana.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan model matematika dalam menentukan lokasi gudang logistik penanggulangan bencana di sekitar daerah rawan bencana di Kabupaten Bogor sebagai dasar perencanaan logistik bencana di tingkat daerah. Dalam penelitian ini, masalah penentuan lokasi gudang logistik beserta tipe gudangnya diformulasikan ke dalam *Integer Programming*. Penentuan lokasi gudang dibuat dengan mencari lokasi gudang terbaik (lokasi yang minim risiko bencana) yang meminimumkan biaya pembangunan gudang logistik dan dapat melayani semua kecamatan di Kabupaten Bogor secara optimal. Model *integer programming* yang dibuat kemudian diselesaikan dengan perangkat lunak Lingo 21.0.

2 Tinjauan Pustaka

Logistik penanggulangan bencana mencakup kegiatan perencanaan, penyimpanan, dan distribusi bantuan kepada masyarakat terdampak. Berbeda dengan logistik komersial, logistik bencana dicirikan oleh tingkat ketidakpastian yang tinggi dan kebutuhan respons yang cepat, sehingga kesiapan gudang logistik menjadi faktor yang sangat penting [1]. Beberapa organisasi internasional seperti World Food Programme (WFP), IFRC, dan UNHCR menekankan pentingnya strategi *pre-positioning* logistik, yaitu menempatkan stok bantuan di lokasi yang strategis sebelum bencana terjadi. Strategi ini terbukti dapat mengurangi waktu respons dan biaya distribusi pada fase awal tanggap darurat seperti dalam [10] dan [11].

Masalah penentuan lokasi fasilitas merupakan topik klasik dalam *operations research* dengan tujuan menentukan lokasi fasilitas yang optimal untuk melayani titik permintaan tertentu. Dalam konteks logistik bencana, model *capacitated facility location* digunakan untuk mempertimbangkan keterbatasan kapasitas gudang dalam melayani wilayah terdampak (menurut [7] dan [3]).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa *integer programming* efektif digunakan dalam perencanaan logistik bencana untuk menentukan lokasi gudang dan alokasi wilayah layanan secara optimal dengan mempertimbangkan berbagai kendala operasional ([8], [12], dan [13]). Balcik dan Beamon [3] mengembangkan model *facility location* untuk jaringan bantuan kemanusiaan, dengan mempertimbangkan ketidakpastian dalam permintaan selama masa tanggap darurat bencana. Selanjutnya, Aman dkk [2] juga menggunakan *integer programming* untuk menangani distribusi bantuan logistik untuk bencana meletusnya Gunung Merapi di kota Jogjakarta, Indonesia.

Belum banyak penelitian yang membahas masalah penentuan gudang logistik terutama di Indonesia dengan berbagai kekhasan kondisinya. Untuk itu penelitian ini bertujuan membangun model matematika berbasis *integer programming* yang dapat menentukan lokasi pembangunan gudang logistik (beserta tipenya) di daerah rawan bencana dan diimplementasikan untuk Kabupaten Bogor.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Deskripsi Masalah

Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) merupakan sebuah lembaga khusus yang menangani penanggulangan bencana di daerah, baik di tingkat provinsi maupun kabupaten/kota yang berperan sebagai koordinator pelaksanaan kegiatan penanggulangan bencana secara terencana, terpadu dan menyeluruh. Suatu daerah hampir tidak luput dari bencana alam baik yang rawan bencana maupun bebas bencana. Gudang logistik dibutuhkan di setiap daerah untuk kesiapsiagaan bencana. Kabupaten Bogor termasuk daerah rawan bencana karena letak geografis yang merupakan wilayah dataran tinggi. Kondisi tersebut membutuhkan gudang logistik yang menyebar agar mencakup seluruh wilayah di Kabupaten Bogor.

Pembangunan gudang logistik dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu banyaknya penduduk yang dilayani dan waktu tempuh dari lokasi gudang menuju lokasi bencana. Semakin besar cakupan populasi yang dilayani maka semakin besar gudang yang akan dibangun. Waktu tempuh maksimum yang akan dimodelkan mengacu pada aturan pemberian bantuan BPBD. Data bencana Kabupaten Bogor diperoleh dari BPBD Kabupaten Bogor, sedangkan data waktu tempuh diperoleh dari hasil estimasi pada aplikasi *Google*.

Saat ini gudang logistik Kabupaten Bogor terletak di satu titik (kecamatan) namun pada penelitian ini Kabupaten Bogor diasumsikan belum memiliki gudang logistik. Terdapat dua macam daerah yang akan dimodelkan, yaitu daerah potensial untuk lokasi gudang dan daerah yang rawan terkena bencana. Daerah potensial untuk lokasi gudang merupakan daerah yang memiliki rata-rata intensitas bencana relatif kecil dibandingkan dengan daerah yang lain, sedangkan daerah berpotensi rawan bencana merupakan semua kecamatan di Kabupaten Bogor. Tipe gudang yang akan dibangun dibagi menjadi tiga jenis, yaitu kecil (kapasitas maksimum untuk menangani logistik sebanyak 36 ribu jiwa),

sedang (kapasitas maksimum untuk menangani logistik 90 ribu jiwa), dan besar (kapasitas maksimum untuk logistik penduduk 2 miliar jiwa).

3.2 Formulasi Masalah

Berdasarkan deskripsi masalah yang telah diberikan, maka masalah penjadwalan sukarelawan bencana ini dapat diformulasikan sebagai *Integer Linear Programming* dengan himpunan, indeks, parameter, variabel keputusan, fungsi objektif, dan kendala-kendala diberikan berikut ini.

Himpunan

- M : himpunan daerah potensial untuk lokasi gudang,
 N : himpunan daerah berpotensi bencana,
 Q : himpunan tipe gudang yang akan dibangun,

Indeks

- i : indeks untuk menyatakan daerah potensial untuk lokasi gudang,
 j : indeks untuk menyatakan daerah berpotensi bencana,
 k : indeks untuk menyatakan tipe gudang yang akan dibangun.

Parameter

- f_k : biaya pembangunan gudang tipe k (rupiah)
 t_{ij} : waktu tempuh dari daerah i menuju daerah j (detik),
 h_j : populasi daerah j (orang)
 L_k : kapasitas layanan minimum gudang k (orang)
 U_k : kapasitas layanan maksimum gudang k (orang)
 T_{\max} : waktu tempuh maksimum (detik)

Variabel Keputusan

- $y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{jika daerah } i \text{ melayani daerah } j \text{ dengan gudang tipe } k \\ 0, & \text{selainnya} \end{cases}$
 $x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{jika daerah } i \text{ dibangun gudang tipe } k \\ 0, & \text{selainnya} \end{cases}$

Fungsi Objektif

Fungsi objektif masalah ini adalah meminimumkan biaya pembangunan gudang logistik, yaitu

$$\text{minimumkan } B = \sum_{i \in M} \sum_{k \in Q} f_k x_{ik}$$

Kendala

1. Setiap daerah yang berpotensi terkena bencana dilayani oleh minimum satu gudang yang dibangun di daerah potensial

$$\sum_{j \in N} y_{ijk} \geq 1, \quad \forall i \in M, k \in Q$$

2. Di setiap daerah potensial hanya boleh dibangun paling banyak satu gudang

$$\sum_{k \in Q} x_{ik} \leq 1, \quad \forall i \in M$$

3. Daerah berpotensi bencana hanya dilayani oleh gudang yang dibangun

$$y_{ijk} \leq x_{ik}, \quad \forall i \in M, j \in N, k \in Q$$

4. Gudang yang dibangun di suatu daerah harus melayani daerah tersebut

$$y_{iik} \geq x_{ik}, \quad \forall i \in M, k \in Q$$

5. Waktu tempuh gudang menuju lokasi bencana tidak melebihi T_{\max}

$$t_{ij} \cdot y_{ijk} \leq T_{\max} \quad \forall i \in M, j \in N, k \in Q$$

6. Tipe gudang yang dibangun sesuai dengan banyaknya populasi yang dilayani

$$\sum_{j \in N} h_j y_{ijk} \geq L_k, \quad \forall i \in M, k \in Q$$

$$\sum_{j \in N} h_j y_{ijk} \leq U_k, \quad \forall i \in M, k \in Q$$

7. Variabel keputusan merupakan variabel biner

$$x_{ik}, y_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in M, j \in N, k \in Q$$

3.3 Implementasi Model

Model penentuan lokasi gudang tersebut diimplementasikan pada masalah penentuan lokasi gudang logistik di daerah Kabupaten Bogor yang meliputi 40 kecamatan. Data populasi dan kejadian bencana di setiap kecamatan di Kabupaten Bogor selama lima tahun terakhir diperlihatkan pada Tabel 2. Diasumsikan bahwa daerah potensial untuk lokasi gudang adalah daerah yang memiliki intensitas bencana kurang dari 1,50 % dari keseluruhan kejadian bencana di Kabupaten Bogor selama lima tahun terakhir, sedangkan daerah berpotensi rawan bencana merupakan semua kecamatan di Kabupaten Bogor.

Tabel 2 Kejadian bencana di Kabupaten Bogor tahun 2020 – 2024

No.	Kecamatan	Kejadian Bencana						
		2020	2021	2022	2023	2024	Total	
1	Babakan Madang	41	31	22	76	37	207	2,72%
2	Bojonggede	29	29	38	28	35	159	2,09%
3	Caringin	73	51	77	131	165	497	6,53%
4	Cariu	8	1	1	21	2	33	0,43%
5	Ciampea	33	41	24	44	38	180	2,36%
6	Ciawi	37	54	55	67	57	270	3,55%
7	Cibinong	46	71	71	78	79	345	4,53%
8	Cibungbulang	24	16	28	50	42	160	2,10%
9	Cigombong	48	84	89	100	108	429	5,64%
10	Cigudeg	36	53	26	52	34	201	2,64%

No.	Kecamatan	Kejadian Bencana						
		2020	2021	2022	2023	2024	Total	
11	Cijeruk	56	87	60	79	54	336	4,41%
12	Cileungsi	6	10	10	14	11	51	0,67%
13	Ciomas	47	61	48	59	55	270	3,55%
14	Cisarua	36	42	34	27	15	154	2,02%
15	Ciseeng	12	17	4	43	19	95	1,25%
16	Citeureup	75	43	27	124	76	345	4,53%
17	Dramaga	39	39	38	16	54	186	2,44%
18	Gunung Putri	31	23	28	55	58	195	2,56%
19	Gunung Sindur	7	3	3	17	15	45	0,59%
20	Jasinga	52	40	25	87	42	246	3,23%
21	Jonggol	48	23	27	65	49	212	2,79%
22	Kemang	24	8	6	28	13	79	1,04%
23	Klapanunggal	16	13	10	22	16	77	1,01%
24	Leuwiliang	28	29	35	74	69	235	3,09%
25	Leuwisadeng	9	11	7	29	34	90	1,18%
26	Megamendung	93	87	63	98	105	446	5,86%
27	Nanggung	49	26	34	93	53	255	3,35%
28	Pamijahan	63	37	21	49	54	224	2,94%
29	Parung	16	7	13	32	11	79	1,04%
30	Parung panjang	12	8	3	17	9	49	0,64%
31	Rancabungur	26	14	19	38	16	113	1,48%
32	Rumpin	30	37	23	106	13	209	2,75%
33	Sukajaya	47	54	37	62	70	270	3,55%
34	Sukamakmur	10	35	41	45	47	178	2,34%
35	Sukaraja	33	43	62	73	68	279	3,67%
36	Tajurhalang	6	4	7	10	9	36	0,47%
37	Tamansari	33	27	20	44	39	163	2,14%
38	Tanjungsari	19	7	6	42	13	87	1,14%
39	Tenjo	15	4	2	26	5	52	0,68%
40	Tenjolaya	24	13	3	12	22	74	0,97%
J u m l a h		1337	1283	1147	2133	1711	7611	100%

Dari Tabel 2 terlihat bahwa terdapat 14 kecamatan yang memiliki total bencana kurang dari 1,50% dari total keseluruhan bencana di Kabupaten Bogor yang menjadi daerah potensial dibangunnya gudang logistik. Daerah potensial tersebut yaitu Cariu, Cileungsi, Ciseeng, Gunung Sindur, Kemang, Klapanunggal, Leuwisadeng, Parung, Parung

Panjang, Rancabungur, Tajurhalang, Tanjungsari, Tenjo, dan Tenjolaya; sedangkan daerah rawan bencana pada model matematika mencakup semua (40) kecamatan di Kabupaten Bogor termasuk daerah potensial lokasi gudang logistik.

Banyaknya penduduk yang dilayani setiap kecamatan merupakan populasi setiap kecamatan. Populasi setiap kecamatan pada tahun 2024 yang diperoleh dari situs resmi Badan Pusat Statistik dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Populasi Kabupaten Bogor tahun 2024

No	Kecamatan	Populasi	No	Kecamatan	Populasi
1	Babakan Madang	118.805	21	Jonggol	151.637
2	Bojonggede	308.435	22	Kemang	142.166
3	Caringin	137.382	23	Klapanunggal	109.526
4	Cariu	53.590	24	Leuwiliang	128.660
5	Ciampea	176.388	25	Leuwisadeng	79.625
6	Ciawi	119.135	26	Megamendung	110.769
7	Cibinong	376.697	27	Nanggung	104.160
8	Cibungbulang	153.668	28	Pamijahan	166.226
9	Cigombong	100.962	29	Parung	126.712
10	Cigudeg	140.209	30	Parung panjang	120.823
11	Cijeruk	96.724	31	Rancabungur	65.058
12	Cileungsi	304.747	32	Rumpin	152.255
13	Ciomas	178.534	33	Sukajaya	71.464
14	Cisarua	132.429	34	Sukamakmur	89.738
15	Ciseeng	115.141	35	Sukaraja	219.532
16	Citeureup	220.094	36	Tajurhalang	134.642
17	Dramaga	113.736	37	Tamansari	115.625
18	Gunung putri	296.424	38	Tanjungsari	59.664
19	Gunung sindur	136.712	39	Tenjo	75.838
20	Jasinga	111.348	40	Tenjolaya	67.023

Sumber: BPS [6]

Tipe gudang berdasarkan kapasitas gudang tertutup menurut [9], yaitu Peraturan Menteri Perdagangan Republik Indonesia Nomor 90/M-DAG/PER/12/2014 tentang Penataan dan Pembinaan Gudang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Kapasitas gudang tertutup

Tipe gudang	Batas bawah kapasitas (m ³)	Batas atas kapasitas (m ³)
Kecil	360	3600
Sedang	3600	9000
Besar	9000	Tak terhingga

Pada model matematika ini, akan diasumsikan bahwa setiap 1 m³ kapasitas gudang dapat melayani (dibagikan ke) sejumlah orang, bergantung jenis bahan bantuan kemanusiaan yang akan disimpan; sedangkan batas atas kapasitas gudang besar (tak terhingga) dinyatakan sebagai U_3 sehingga batas kapasitas gudang pada model dapat dilihat pada Tabel 4. Asumsi biaya pembangunan pun disajikan pada Tabel 4, sedangkan data waktu tempuh antar-kecamatan diperoleh dari aplikasi *google maps*.

Tabel 4 Kapasitas dan asumsi biaya pembangunan gudang tipe- k pada model

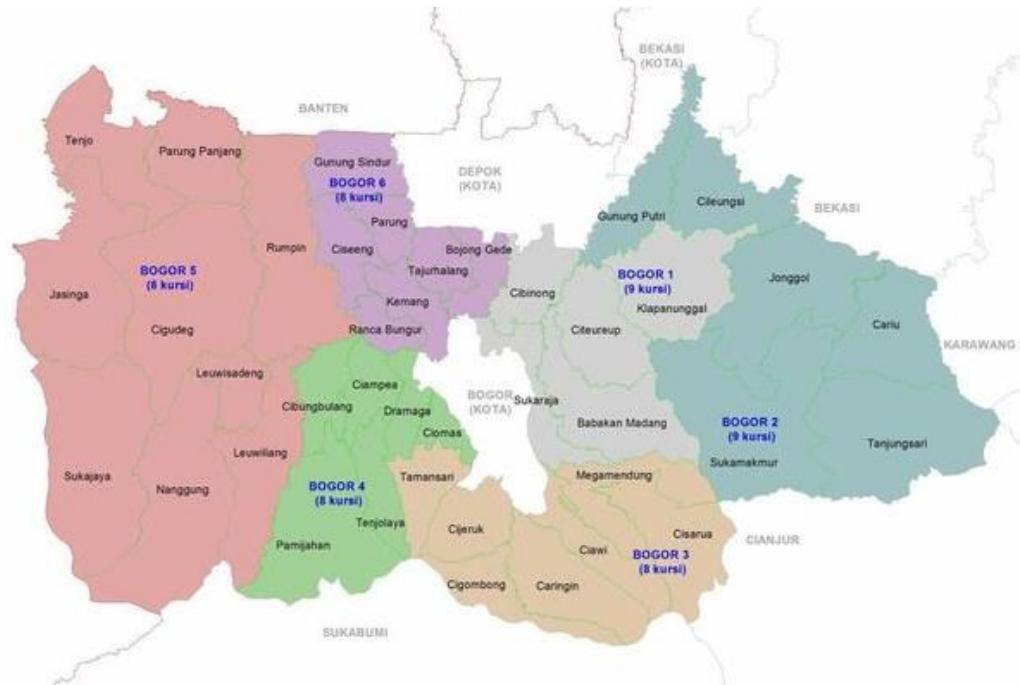
k	Tipe gudang	Kapasitas layanan minimum (orang)	Kapasitas layanan maksimum (orang)	Asumsi biaya pembangunan (Rupiah)
1	Kecil	3600	36000	1 miliar
2	Sedang	36000	90000	10 miliar
3	Besar	90000	U_3	25 miliar

Model matematika untuk masalah ini dapat diselesaikan menggunakan perangkat lunak Lingo 21.0. Untuk beberapa nilai, hasil yang diperoleh merupakan minimum global, artinya lokasi dan tipe gudang logistik yang dihasilkan merupakan lokasi dan tipe bangunan dengan total biaya minimum. Hasil implementasi dibedakan berdasarkan banyaknya orang yang dapat dilayani untuk setiap m^3 kapasitas gudang, nilai waktu tempuh maksimum T_{\max} , dan nilai U_3 . Sebagai ilustrasi, solusi yang diperoleh jika diasumsikan bahwa: (i) 1 m^3 dapat melayani 100 orang, (ii) nilai $U_3 = 10.000.000$ orang, dan (iii) untuk beberapa waktu tempuh maksimum berbeda, diperoleh hasil lokasi/kecamatan yang potensial untuk dibangun gudang logistik beserta tipe gudangnya, serta daerah/kecamatan yang dilayani gudang tersebut seperti pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5 Salah satu hasil dari model matematika

T_{\max} (jam)	Lokasi gudang	Tipe gudang	Kecamatan yang dilayani	Biaya minimum (rupiah)
3	Kemang	Besar	semua (40 kecamatan)	25 miliar
	Kemang	Besar	semua kecuali Tanjungsari	26 miliar
2	Tanjungsari	Kecil	Tanjungsari	
	Tenjo	Kecil	Tenjo, Sukajaya	
1,5	Tanjungsari	Kecil	Cariu, Sukamakmur, Tanjungsari	27 miliar
	Kemang	Besar	35 kecamatan sisanya	-
1	tidak ada solusi fisibel			

Kasus dengan waktu tempuh maksimum 1 jam perjalanan tidak memiliki solusi karena ada dua daerah yang waktu tempuhnya ke setiap lokasi potensial gudang logistik memerlukan waktu lebih dari 1 jam (Kecamatan Tenjolaya dan Kecamatan Sukajaya). Lokasi kedua kecamatan ini relatif terhadap kecamatan lain di Kabupaten Bogor dapat dilihat pada Gambar 2 (https://info-kotakita.blogspot.com/2016/07/daftar-kota-di-kabupaten-bogor.html#google_vignette).



Gambar 2 Peta Kabupaten Bogor

Selanjutnya, pada Tabel 6 berikut diberikan hasil simulasi untuk semua kasus. Hasil implementasi dibedakan berdasarkan banyaknya orang yang dapat dilayani untuk setiap m^3 kapasitas gudang (10, 25, ataukah 100 orang), nilai waktu tempuh maksimum T_{max} (3, 2, ataukah 1.5 jam) dan nilai U_3 (1 juta, 10 juta, ataukah 25 juta).

Tabel 6 Solusi model matematika

Kasus	Tingkat layanan gudang (orang/ m^3)	Kapasitas maksimum gudang besar (orang)	Waktu tempuh maksimum (jam)	Solusi			
				Gudang yang dibangun	Biaya (miliar rupiah)	Jenis solusi	Waktu eksekusi ^{*)}
1	10	1 juta	3	7 gudang besar	175	optimum	3 detik
	10	1 juta	2	6 gudang besar	150	fisibel	interrupt 40 menit
2	10	10 juta	3	1 gudang besar	25	optimum	0.1 detik
	10	10 juta	2	1 gudang besar, 1 gudang sedang	35	optimum	0.1 detik
3	10	25 juta	3	1 gudang besar	25	optimum	0.1 detik
4	25	10 juta	3	7 gudang kecil	7	optimum	3 detik
	25	10 juta	2	7 gudang kecil	7	optimum	4 detik
	25	10 juta	1.5	7 gudang kecil	7	fisibel	interrupt 41 menit
5	100	10 juta	3	1 gudang besar	25	optimum	12 detik
	100	10 juta	2	1 gudang besar, 1 gudang kecil	26	optimum	2 detik
	100	10 juta	1.5	1 gudang besar, 2 gudang kecil	27	optimum	1 detik

^{*)} spesifikasi komputer: AMD Ryzen 7 5700U (8C/16T, up to 4.3 GHz), 16 GB RAM, SSD-based storage, Windows 11 64-bit.

Dari Tabel 6 diperoleh beberapa kesimpulan.

- Dari Kasus 1, 2, 3, dan 4 diperoleh bahwa jika tingkat layanan gudang per m^3 membesar maka biaya pembangunan gudang akan berkurang karena banyak gudang yang harus dibangun berkurang dan tipe gudang yang harus dibangun tidak didominansi gudang bertipe besar.
- Dari Kasus 1, 2, dan 3 diperoleh bahwa penambahan kapasitas maksimum gudang bertipe besar akan mengurangi biaya pembangunan gudang.
- Pada umumnya, pengurangan batas waktu tempuh maksimum (dari 3 jam menjadi 1.5 jam) akan meningkatkan kebutuhan jumlah gudang dan total biaya secara signifikan. Hal ini mengindikasikan adanya *trade-off* yang jelas antara kecepatan respons bencana dan efisiensi anggaran, di mana standar layanan yang terlalu ketat berpotensi membebani kapasitas fiskal pemerintah daerah.

4 Simpulan dan Saran

Simpulan

Masalah penentuan lokasi gudang logistik dapat dipandang sebagai masalah *Integer Programming* dengan meminimumkan biaya pembangunan gudang logistik agar seluruh wilayah dapat dilayani. Masalah tersebut diselesaikan dengan melihat dari waktu tempuh lokasi gudang dan populasi wilayah yang akan dilayani. Model penentuan gudang logistik diimplementasikan pada Kabupaten Bogor dan diselesaikan dengan perangkat lunak Lingo 21.0.

Saran

Pada karya ilmiah ini biaya yang digunakan masih hipotetik, kapasitas gudang yang digunakan masih secara umum, dan penentuan daerah potensial masih manual. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan biaya sebenarnya, kapasitas gudang yang beragam, serta penentuan daerah potensial menggunakan perangkat lunak ditinjau dari intensitas dan kerugian sehingga model tersebut dapat diaplikasikan pada kasus nyata.

5 Penutup

Ucapan Terima Kasih. Para penulis berterima kasih kepada Rendy Candra Permana yang telah membantu penelitian ini dalam memperbaiki dan menganalisis data.

Daftar Pustaka

- [1] Altay N, Green WG. 2006. OR/MS research in disaster operations management. *Eur. J. Oper. Res.*, 175: 475-493. doi: 10.1016/j.ejor.2005.05.016.
- [2] Aman A, Bakhtiar T, Hanum F, Supriyo PT. 2012. OR/MS applications in Mt. Merapi disaster management. *Journal of Mathematics and Statistics* 8(2): 264-273.
- [3] Balcik B & Beamon BM. 2008. Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics: Research and Applications* 11(2): 101-121. doi:10.1080/13675560701561789.
- [4] [BPBD] Badan Penanggulangan Bencana Daerah. 2025. *Infografis Bencana Kabupaten Bogor Tahun 2024*. [Diakses pada 28 Mei 2025.] <https://bpbd.bogorkab.go.id/berita/bencana>.
- [5] [BPBD] Badan Penanggulangan Bencana Daerah. 2025. *Data Kejadian Bencana Tahun 2011-2025*. [Diakses pada 28 Mei 2025.] <https://bpbd.bogorkab.go.id/berita/data-bencana>.

- [6] [BPS] Badan Pusat Statistik. 2024. Penduduk Menurut Jenis Kelamin dan Kecamatan (jiwa). [Diakses pada 10 November 2025]. <https://bogorkab.bps.go.id/id/statistics-table/2/MjkjMg==/penduduk-menurut-jenis-kelamin-dan-kecamatan--jiwa-.html>.
- [7] Drezner Z & Hamacher HW. 2002. *Facility Location: Applications and Theory*. New York, Springer.
- [8] Galindo G & Batta R. 2013. Review of recent developments in disaster operations management. *European Journal of Operational Research* 230(2): 201–211. doi: 10.1016/j.ejor.2013.01.039
- [9] Pemerintah Indonesia. 2014. Undang-Undang Nomor 90 Tahun 2014 Tentang Penataan dan Pembinaan Gudang. Lembaran RI Tahun 2014 No. 90. Jakarta: Sekretariat Negara.
- [10] [WFP] World Food Programme. 2002. *Emergency Field Operations Pocketbook*. [Diakses pada 22 Desember 2025]. <https://www.wfp.org/emergency-preparedness-and-response>.
- [11] Rawls CG & Turnquist MA. 2010. Pre-positioning of emergency supplies. *Transportation Research Part B* 44(4): 521–534.
- [12] Sheu J-B. 2007. Emergency logistics distribution. *Transportation Research Part E* 43(6): 687–709. doi: 10.1016/j.tre.2006.04.004
- [13] Snyder LV & Daskin MS. 2005. Reliability models for facility location. *Transportation Science* 39(4): 401–416. doi: 10.1287/trsc.1040.0107