

KONSEP ANALISIS LOKASI FASILITAS JARINGAN PENGELOLAAN LIMBAH KOTA

Petrus Setya Murdapa

Program Studi Rekayasa Industri (Kampus Kota Madiun) – Fakultas Teknik Industri
Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

ABSTRACT

Ground water is actually a source of clean water. As a source, it should not be polluted by wastewater. However, as the population grows, the discharge of wastewater will also increase. Municipal wastewater must be specifically managed so that its disposal does not mix with groundwater by providing a special pipeline to drain and collect municipal wastewater to collection and processing facilities, before finally being discharged into rivers or the environment after conditions are safe. This wastewater treatment pipeline network resembles a commodity distribution network from industry to consumers. By analogy and adjustment, the maximum covering solution method can be used to design the location of the facility and the waste treatment plant. The goal is to obtain the lowest possible length of pipe, which covers all municipal wastewater sources, namely settlements and other public facilities. The analysis must be carried out in two stages, which in this paper are called level-1 and level-2. In this paper, only the basic concepts of the study are revealed. Simple case examples and numerical solutions are briefly revealed.

Keywords: *municipal wastewater, ground water, clean water, wastewater pipe network, maximum covering problem.*

A. Pendahuluan

Kemajuan suatu kota seringkali diikuti dengan pertambahan jumlah populasi di kota itu. Pertambahan tersebut bisa karena jumlah kelahiran yang lebih besar daripada kematian, dan/atau karena lebih banyaknya jumlah kedatangan dari luar kota, baik yang sifatnya sementara ataupun menetap. Jelasnya semakin ramai suatu kota akan semakin menarik munculnya kegiatan-kegiatan ekonomi, sebagaimana ungkapan: “Ada gula ada semut”.

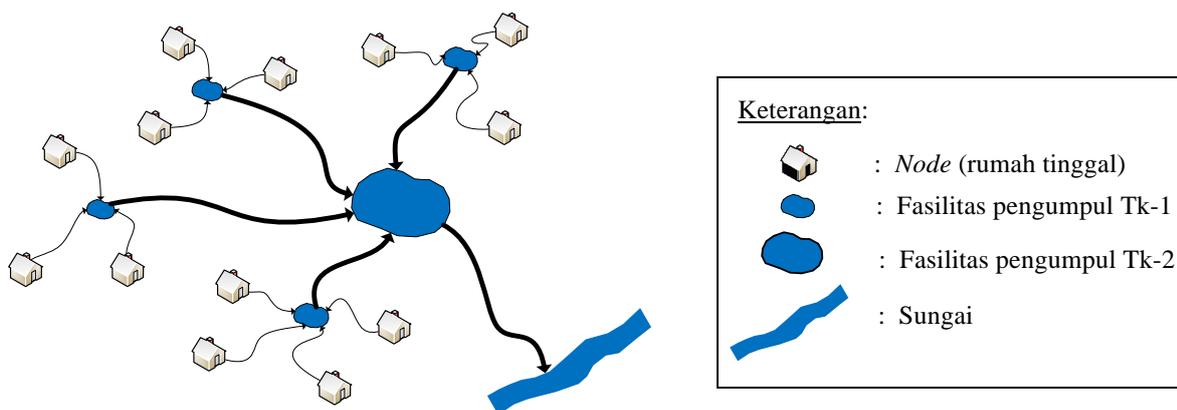
Namun pertambahan populasi kota juga memunculkan masalah-masalah. Dua di antaranya, yang pertama ialah terkait limbah rumah tangga. Berikutnya ialah terkait jumlah kebutuhan air bersih. Seperti halnya volume limbah, kebutuhan air bersih juga akan meningkat secara proporsional. Tetapi, kombinasi keduanya membuat kompleksitas persoalan menjadi tidak proporsional lagi dengan jumlah penduduk.

Kebanyakan, kota-kota di Indonesia menikmati keberlimpahan air. Sumur dengan mudah digali dan segera akan mengeluarkan air. Tetapi itu adalah kemungkinan yang hanya bisa terjadi pada zaman sebelum kepadatan mulai terasa. Saat itu, air bersih masih bisa diperoleh dengan mudah (Murdapa, 2015). Kini, persoalan *supply* air bersih juga diperparah dengan maraknya penggundulan hutan.

Siklus alamiah air tanah pun terganggu (Wang, Zhang, Ma, & Luo, 2015). Pada saat yang sama, kepadatan mulai terasa.

Ketersediaan air bersih pun sangat sulit dilepaskan dari kebutuhan sarana pembuangan limbah kota. Semakin banyak saluran pembuangan limbah rumah tangga (*water closet*), semakin berkurang ketersediaan air bersih. Ini terjadi karena kedua jenis air tersebut, air bersih dan air limbah, tidak dipisahkan secara tegas. Ada dua sumber masalah di sini, yaitu pasokan air bersih bergantung pada ketersediaan air tanah/air sumur. Di pihak lain, air limbah dibuang ke dalam tanah. Karena keduanya inklusif, tidak saling eksklusif, maka ada kemungkinan besar kedua jenis air itu akhirnya bertemu, dan musibah pun akan terjadi.

Sesungguhnya *septic tank* dirancang untuk menjadi unit pengolahan limbah rumah tangga yang bersifat mandiri. Air limbah di suatu rumah tangga akan masuk ke dalam *septic tank*, mengalami proses biologi tertentu, dan akhirnya air dapat merembes ke tanah dalam keadaan yang sudah baik. Dengan semakin padatnya pemukiman, kapasitas *septic tank* yang dibuat banyak dikurangi sehingga tidak memenuhi spesifikasi yang seharusnya standar. Yang terjadi ialah secara periodik, *septic tank* harus dikuras/disedot. Hal ini menunjukkan bahwa proses biologi di dalam *septic tank* tidak berjalan baik (Said,2017). Ketika ini terjadi, dikhawatirkan air limbah merembes ke dalam tanah sebelum waktunya (kualitasnya masih buruk).



Gambar 1. Visualisasi sederhana solusi terhadap permasalahan jaringan air limbah kota

B. Rumusan Permasalahan

Dua jenis air, yaitu air tanah, yang merupakan sumber air bersih, dan air limbah harus tidak pernah bertemu di dalam tanah. Artinya, air limbah tidak dibuang secara terbuka di dalam tanah. Caranya ialah dengan membuat jaringan pipa-pipa pembuangan air limbah. Di dalam jaringan ini, disediakan fasilitas pengumpul limbah dan fasilitas pengolah limbah. Pengumpul limbah disebut fasilitas tingkat-1 dan pengolah limbah disebut fasilitas tingkat-2 (fasilitas utama pengolah limbah).

Jaringan pipa pembuangan air limbah ini bisa dianalogikan dengan jaringan distribusi barang komoditas pada umumnya, namun dengan arah terbalik (Gambar 1). Dimisalkan terdapat N sumber limbah (bisa berupa rumah tinggal, ataupun

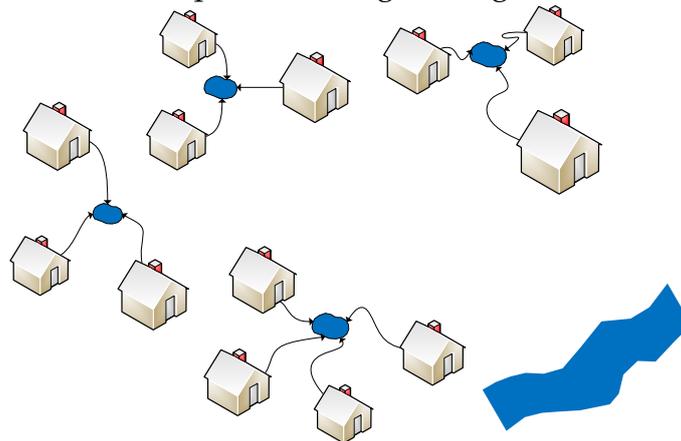
kantor, rumah sakit, terminal, restoran, ataupun yang lain), dengan volume buangan tiap *node* itu dimisalkan adalah v_n di mana $n = 1, 2, 3, \dots, N$. Untuk sejumlah fasilitas pengumpul limbah tertentu, akan dilihat seberapa banyak sumber limbah yang bisa di-*cover*. Persoalan ini bisa dipandang sebagai persoalan *maximum covering*, tepatnya adalah *weighted maximum covering problem* di mana volume limbah merupakan *demand* yang akan menjadi pembobot pada persoalan tersebut.

Topik utama dalam paper ini ialah mengungkapkan permasalahan jaringan air limbah tersebut ke dalam rumusan *maximum covering problem* dan menampilkan suatu contoh perhitungan numerik. Maka rumusan permasalahannya ialah "Bagaimanakah sejumlah fasilitas pengumpul limbah dan lokasinya berpengaruh terhadap luas cakupan sumber-sumber limbah?"

C. Penyelesaian dan Pembahasan

1. Model Analisis

Membayangkan bahwa limbah dikumpulkan terlebih dahulu ke suatu fasilitas pengumpul dan kemudian dialirkan lebih lanjut ke pengolah limbah, maka analisis *maximum covering* harus dilakukan dalam dua tahap (atau dua tingkatan). Tahap pertama adalah menghitung jumlah kebutuhan fasilitas pengumpul tingkat-1 beserta lokasi-lokasinya sedemikian rupa sehingga semua fasilitas itu bisa meng-*cover* total debit semua air limbah yang mengalir dari semua *node* (Gambar 2). Untuk mendapatkan solusi seperti pada Gambar 2, terlebih dahulu diidentifikasi lokasi tiap sumber limbah (rumah tangga, hotel, rumah sakit, dan lain-lain) beserta volume atau debitnya. Dimisalkan bahwa tiap *node* masing-masing diketahui koordinat lokasinya.

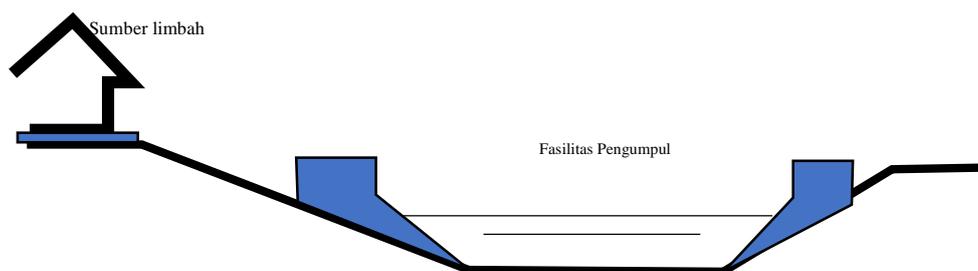


Gambar 2. Tahap penentuan lokasi dan jumlah fasilitas pengumpul limbah (tingkat-1)

Beberapa *node* dipetakan koordinat-koordinat lokasinya. Elevasi Tidak hanya lokasinya masing-masing namun juga "*demand*" tiap lokasi tersebut. Kemudian, kebutuhan jumlah fasilitas yang diperlukan bisa dihitung dengan model *maximum covering problem* (Daskin, 1995). Modifikasi yang harus dilakukan ialah: (1) arah distribusi dibalik dari *node* ke fasilitas, dan (2) istilah *supply* atau sumber akan

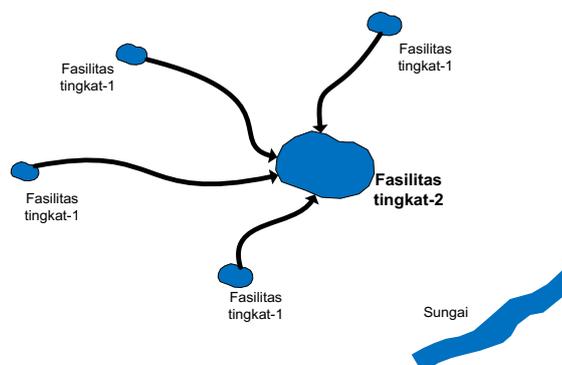
digunakan untuk menggantikan istilah *demand*, mengingat bahwa pada kasus jaringan limbah ini setiap *node* akan memberikan *supply* limbah atau menjadi sumber limbah.

Sudah pasti setiap *node* akan memiliki elevasi yang berbeda-beda. Elevasi ini merupakan variabel penting karena akan mempengaruhi daya alir air limbah ke fasilitas pengumpul. Sesuai hukum gravitasi, air limbah hanya akan mengalir dari elevasi tinggi ke elevasi rendah. Untuk menghindarkan kompleksitas pembahasan kebutuhan pompa pengalir, maka penulis membayangkan sumber-sumber limbah memiliki elevasi yang lebih tinggi dibandingkan elevasi dari fasilitas pengumpul. Jika anggapan ini bisa berlaku maka pompa pengalir belum diperlukan dalam tahap ini.



Gambar 3. Sumber limbah berada pada elevasi yang lebih tinggi daripada fasilitas pengumpul tingkat-1

Tahap kedua ialah menentukan lokasi fasilitas tingkat-2. Fasilitas tingkat-2 merupakan fasilitas pengumpul limbah dari fasilitas-fasilitas tingkat-1. Koordinat dari lokasi fasilitas tingkat-1 dipergunakan sebagai input perhitungan *maximum covering problem*. Dalam tahap kedua ini diperlukan pompa untuk mengalirkan air limbah dari fasilitas pengumpul tingkat-1 ke fasilitas pengolah (tingkat-2). Maka, perbedaan elevasi (elevasi) dari setiap *node* (fasilitas pengumpul tingkat-1) perlu dilibatkan dalam perhitungan. Namun, semua ini akan mengerucut ke dalam bentuk satuan jarak antar fasilitas tingkat-1.



Gambar 4. Penentuan lokasi fasilitas tingkat-2

Model *maximum covering problem* ini telah dirumuskan oleh Daskin (1995) atau Daskin and Owen (2003). Paper ini lebih mengacu pada model yang disusun oleh Daskin (1995). Terlebih dahulu didefinisikan besaran-besaran input, dan variabel-variabel keputusan sebagai berikut.

Input:

$$h_i = \text{volume supply limbah pada sumber } i$$

$$P = \text{jumlah fasilitas yang direncanakan}$$

Variabel keputusan:

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{jika sumber limbah } i \text{ dicakup} \\ 0 & \text{jika tidak} \end{cases}$$

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{jika lokasi } j \text{ dipilih untuk didirikan fasilitas} \\ 0 & \text{jika tidak} \end{cases}$$

Maka, model *maximum covering problem* dalam bentuk rumusan *Integer Linear Programming (ILP)* ialah (Daskin, 1995):

$$\text{Maximize } \sum_i h_i Z_i \quad (1)$$

Subject to:

$$Z_i \leq \sum_j a_{ij} X_j \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_j X_j \leq P \quad (3)$$

$$X_j = 0, 1 \quad \forall j \quad (4)$$

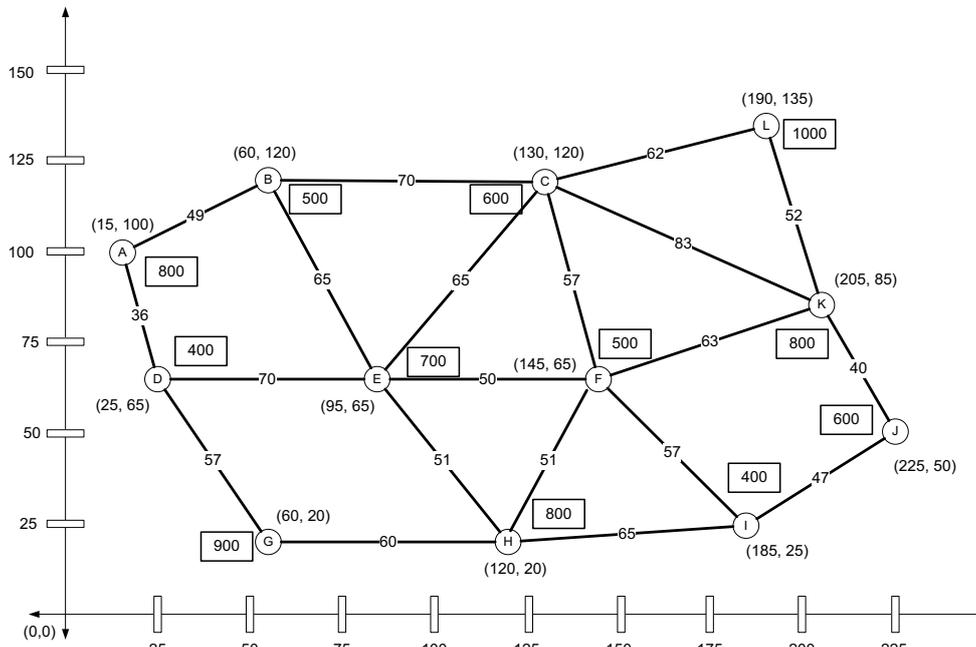
$$Z_i = 0, 1 \quad \forall i \quad (5)$$

Dengan sejumlah P fasilitas, akan dicari lokasi-lokasinya yang tepat sedemikian sehingga jumlah sumber limbah yang bisa dicakup berjumlah sebanyak-banyaknya dalam suatu *covering distance* (D_c) tertentu (Persamaan 1). Persamaan kendala (2) berguna untuk menjamin bahwa sumber limbah di i tidak bisa dicakup kecuali ada paling tidak satu fasilitas yang bisa mencakupnya dibangun. Kendala (3) digunakan untuk menjamin bahwa sebanyak-banyaknya hanya P unit fasilitas saja yang dibangun. Kendala (4) dan (5) untuk memastikan bahwa variabel keputusan hanya bisa bernilai ya atau tidak.

2. Contoh Perhitungan Numerik

Misalkan terdapat sumber-sumber limbah dengan lokasi masing masing diketahui, berikut jarak dengan sumber-sumber di sekitarnya seperti terlihat pada Gambar 5. Terdapat 12 sumber, yaitu A, B , dan seterusnya hingga L . Hanya beberapa *node* saja yang terhubung langsung ke beberapa *node* lain, misalnya *node A* terhubung (ada jalan menuju) ke *node B*, dan juga ke *node D*. Pada Gambar 5 juga sudah dituliskan data jarak antara dua *node* yang terhubung serta volume limbah (per minggu). Jarak

ini dihitung dengan anggapan bahwa kedua *node* terhubung oleh lintasan lurus. Berdasarkan posisi koordinat setiap *node* itu maka jarak bisa dihitung (*euclidian*).



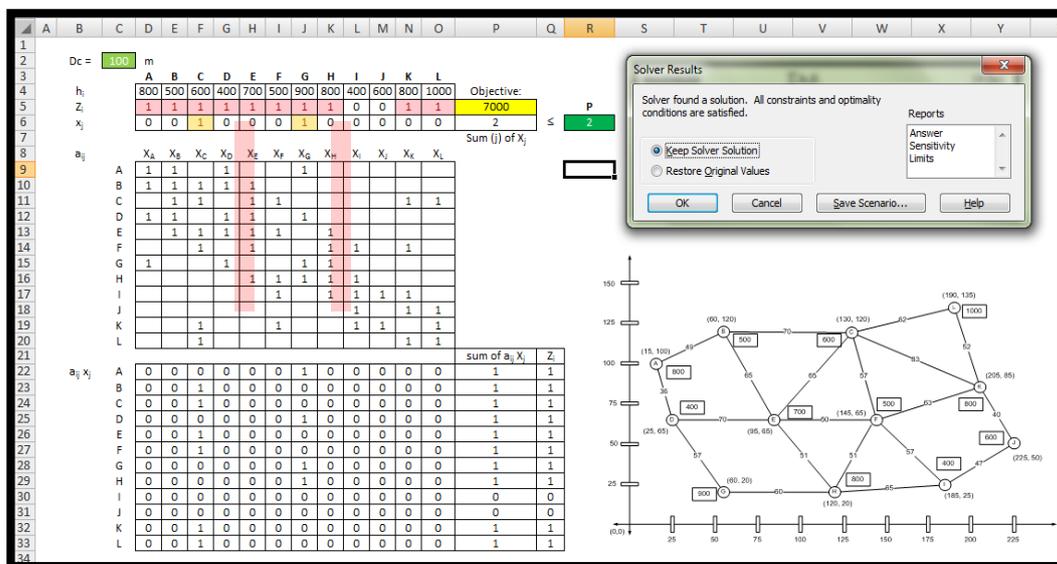
Gambar 5. Contoh kasus

	X_A	X_B	X_C	X_D	X_E	X_F	X_G	X_H	X_I	X_J	X_K	X_L	sum of $a_{ij} x_j$	Z_i
A	1	1	1	1	1	1	1						0	0
B	1	1	1	1	1	1							0	0
C	1	1	1	1	1	1					1	1	0	0
D	1	1	1	1	1	1							0	0
E	1	1	1	1	1	1	1						0	0
F			1	1	1	1	1	1					0	0
G	1			1			1	1					0	0
H				1	1	1	1	1	1				0	0
I				1	1	1	1	1	1	1			0	0
J				1					1	1	1	1	0	0
K				1					1	1	1	1	0	0
L			1								1	1	0	0

Gambar 6. Screenshot penyelesaian *maximum covering problem* dari contoh kasus dalam Microsoft Solver ($D_c = 100$)

Model *ILP - maximum covering problem* yang dikenakan pada contoh kasus ini akan menjadi sangat sederhana jika dirumuskan dengan menggunakan *Microsoft Solver*. Rumusan akan bergantung pada *coverage distance* (D_c) dari fasilitas. Sebagai contoh, untuk *coverage distance* sejauh 100 (satuan jarak) *screenshot* model *maximum covering problem* untuk contoh kasus dalam *Microsoft Solver* bisa dilihat pada Gambar 6.

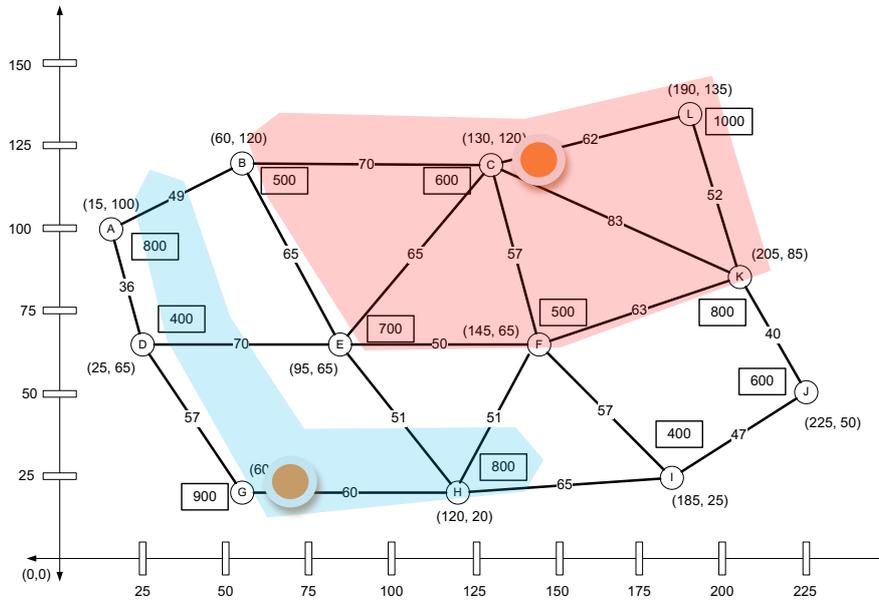
Dengan model tersebut bisa dicoba-cobakan jumlah fasilitas tingkat-1 tertentu (besaran yang disimbulkan dengan P), kemudian dilihat sejauh mana keluasan cakupannya, yaitu apakah semua sumber limbah (dari A hingga L) bisa tercakup. Untuk $P = 2$ ternyata sumber I dan J tidak bisa tercakup. Ini berarti jumlah fasilitas harus lebih dari dua (Gambar 7).



Gambar 7. Screenshot keluaran *Microsoft Solver* untuk $P = 2$.

Gambar 8 merupakan visualisasi peta jika hanya dua fasilitas didirikan ($P = 2$). Sumber limbah di I dan J tidak akan tercakup. Fasilitas di C akan mencakup sumber-sumber di B, C, E, F, K dan L. Fasilitas di G mencakup sumber-sumber di A, D, G, dan H. Jarak cakupan (D_c) merupakan jarak maksimum pipa bisa mengantarkan aliran limbah. Untuk jarak lebih dari itu, diperlukan bantuan pompa untuk mengalirkannya.

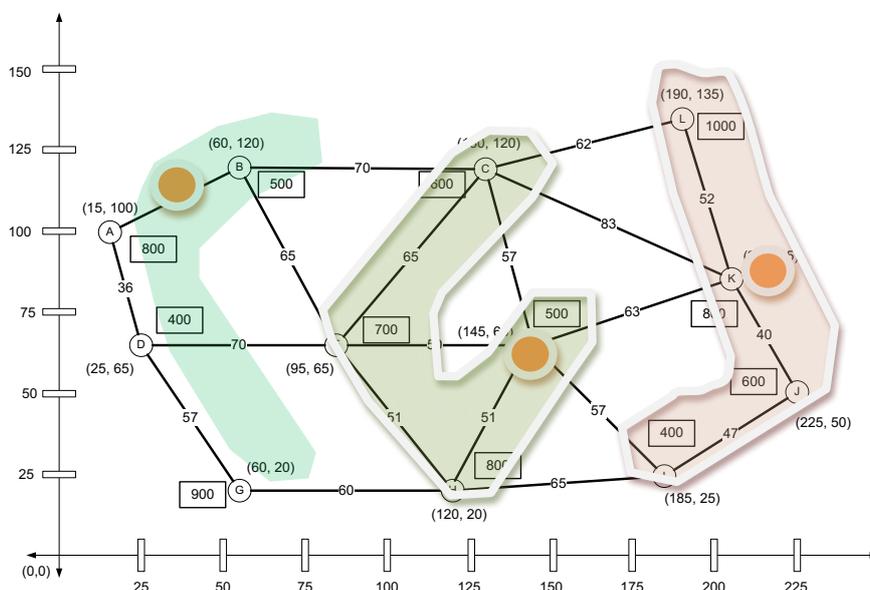
Tabel 1 berikut menampilkan hasil eksperimen dengan model untuk berbagai nilai P . Pada tabel terlihat bahwa tiga merupakan jumlah minimum fasilitas pengolah limbah tingkat-1. Dengan tiga fasilitas tingkat-1 didirikan maka semua air limbah dari semua sumber pada contoh kasus bisa dicakup. Peta cakupan untuk $P = 3$ diperlihatkan oleh Gambar 9.



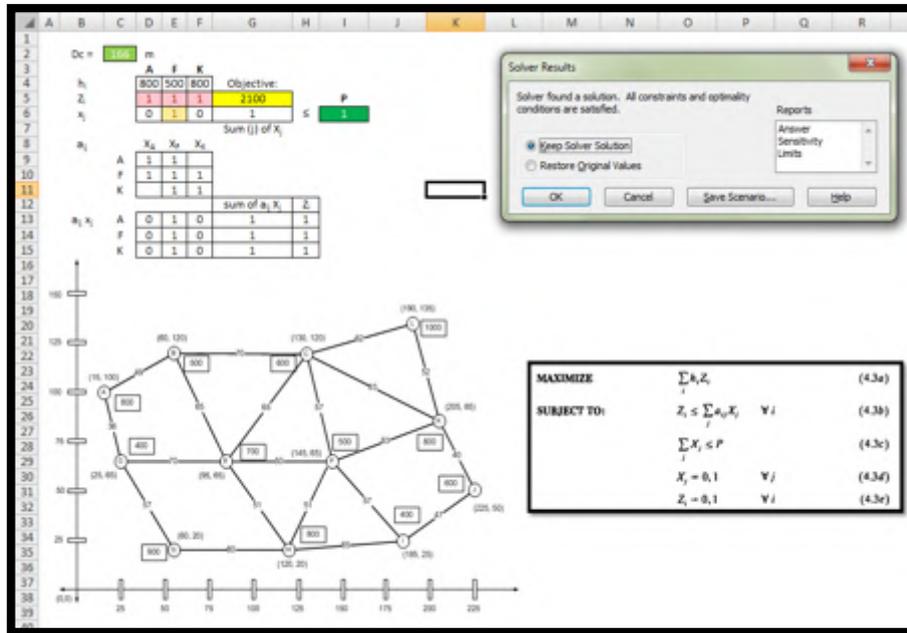
Gambar 8. Peta cakupan jika hanya dua fasilitas didirikan (Sumber I dan J tidak bisa tercakup)

Tabel 1. Hasil eksperimen model untuk beberapa nilai P

Jumlah fasilitas, P	Lokasi Fasilitas	Sumber yang tidak tercakup
1	B	F, G, H, I, J, K, L
2	C, G	I, J
3	A, F, K	-

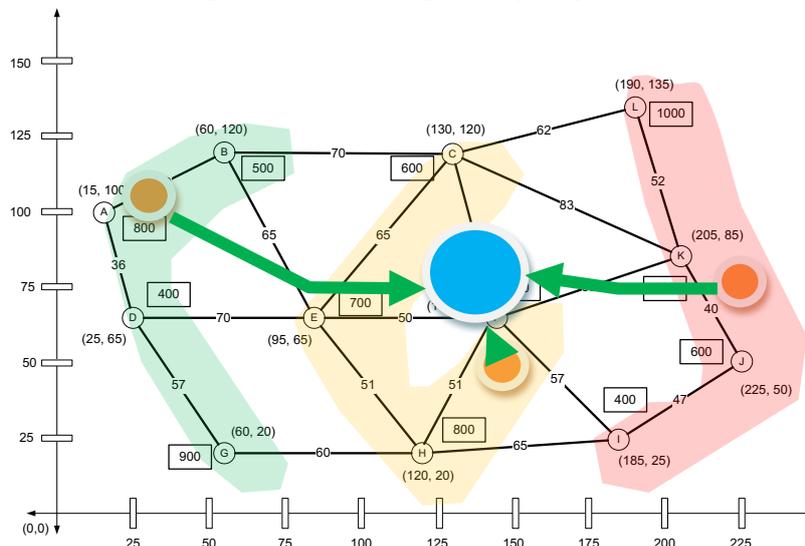


Gambar 9. Semua sumber tercakup jika tiga fasilitas ($P = 2$) didirikan



Gambar 10. Screenshot dari Microsoft Solver untuk analisis fasilitas tingkat-2 ($D_c = 166$).

Untuk analisis fasilitas tingkat-2, diperlukan informasi lokasi fasilitas-fasilitas tingkat-1. Dengan tiga fasilitas tingkat-1 di lokasi A, F dan K maka model *maximum covering problem* diselesaikan lagi dengan *Microsoft Solver*. Terlebih dahulu model *ILP - maximum covering problem* diuraikan ke dalam *Microsoft Solver*. Dimisalkan fasilitas tingkat-2 didisain untuk mempunyai jarak jangkauan (D_c) sejauh 166 (satuan jarak). Gambar 10 memperlihatkan screenshot dari *Microsoft Solver* terkait. Diperoleh lokasi fasilitas tingkat-2 ada di lokasi F. Ini berarti berada dilokasi yang sama (atau ditafsirkan berdekatan) dengan fasilitas tingkat-1 yang ada di F.



Gambar 11. Fasilitas tingkat-1 di lokasi F digabungkan dengan fasilitas tingkat-2

Keputusan praktis bisa diambil, yaitu fasilitas tingkat-1 di F digabungkan dengan fasilitas tingkat-2 (Gambar 11). Sehingga secara total diputuskan dibangun dua fasilitas tingkat-1 di A dan K dan satu fasilitas tingkat-2 di F. Fasilitas tingkat-2 di F ini sekaligus berperan mengumpulkan air limbah dari sumber-sumber di C, E, F, dan H.

3. Pembahasan Singkat

Penyelesaian persoalan jaringan pipa pengolahan limbah kota dalam paper ini terasa sangat sederhana karena diasumsikan bahwa *elevasi* tiap lokasi *node* dianggap seragam sehingga paper ini tidak memperhatikan persoalan keharusan harus menyediakan pompa untuk mengalirkan limbah dari *node* yang posisinya lebih rendah ke fasilitas tingkat-1. Namun, *landscape* jaringan pipa bisa didesain sedemikian sehingga lokasi fasilitas pengumpul tingkat-1 ada di posisi yang lebih rendah daripada posisi sumber (*node*) sehingga untuk pengalirannya tidak diperlukan pompa. Baru pada pengaliran dari fasilitas tingkat-1 ke fasilitas tingkat 2 diperlukan pompa pengalir.

D. Kesimpulan

Air limbah kota menjadi persoalan besar jika pembuangannya disalurkan secara terbuka begitu saja ke dalam tanah. Pencampuran dengan air tanah yang merupakan sumber air bersih akan terjadi sehingga membawa persoalan menjadi lebih luas hingga menyangkut persoalan ketersediaan air bersih. Maka jaringan pipa penyaluran air limbah menjadi suatu hal wajib untuk disediakan.

Air limbah dari sumber-sumber limbah dikumpulkan ke dalam fasilitas tingkat-1. Jumlah dan lokasi tiap fasilitas perlu dicari. Kemudian, perlu pula disediakan satu (atau bisa pula lebih dari satu) fasilitas tingkat-2 yang akan menjadi pengumpul limbah dari fasilitas-fasilitas tingkat-1. Analisis *maximum covering problem* bisa dilakukan secara bertingkat.

Daftar Pustaka

- Daskin, M. S. 1995. *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. John Wiley and Sons Inc.
- Daskin, M.S. and Owen, S.H. 2003. Location Models in Transportation. In Hall, R.W. (Editor). *Handbook of Transportation Science*. Second Edition. Kluwer Academic Edition. pp 321-370
- Murdapa, P. S. 2015. Siklus Air Sebagai Sumber Daya Kehidupan Bumi: Suatu Model Peninjauan Sistemik. In *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi XXIII* (pp. 1-8). Surabaya: Program Studi MMT-ITS.
- Said, N. I. 2017. *Teknologi Pengolahan Air Limbah: Teori dan Aplikasi*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Wang, X. C., Zhang, C., Ma, X., and Luo, L. 2015. *Water Cycle Management: A New Paradigm of Wastewater Reuse and Safety Control* (SpringerBr). New York: Springer Heidelberg.