

Model Keseimbangan Lintasan Perakitan Paralel Dengan Jumlah Operator Minimum

Emsosfi Zaini II
Laboratorium Sistem Produksi
Jurusan Teknik Industri
Institut Teknologi Nasional Bandung
Email: efi@itenas.ac.id

Hendro Prasetyo, Dicky Rahmad Yulian
Laboratorium Sistem Produksi
Jurusan Teknik Industri
Institut Teknologi Nasional Bandung
Email: hprasetyo@itenas.ac.id, chogan_qyu85@yahoo.com

Abstrak. Peningkatan produktivitas dalam lintasan perakitan sangat penting karena bisa meningkatkan kapasitas dan mengurangi ongkos. Jika kapasitas tidak mencukupi dengan satu lintasan perakitan, maka salah satu cara untuk meningkatkan kapasitas adalah dengan membuat lintasan perakitan paralel. Pada penelitian ini akan diusulkan metode untuk merancang lintasan perakitan paralel dengan meminimumkan jumlah operator. Pada metode yang diusulkan terdapat dua tahap metode solusi. Pada setiap tahapnya dibuat model optimasi. Metode yang diusulkan dilengkapi dengan contoh numerik. Secara keseluruhan metode usulan tidak menghasilkan solusi optimal, meskipun demikian untuk setiap tahapnya dijamin hasil optimal.

Keywords: keseimbangan lintasan perakitan, lintasan paralel, jumlah operator minimum

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur biasanya menggunakan *assembly line* (lintasan perakitan) untuk memproduksi produk dengan volume tinggi. Lintasan perakitan adalah rangkaian stasiun kerja yang dihubungkan secara bersama dengan sistem *material handling*. Lintasan ini digunakan untuk merakit komponen menjadi produk akhir. Pada masalah keseimbangan lintasan klasik, pekerjaan perakitan dibagi ke dalam elemen kerja. Sebuah jaringan *precedence* dibentuk untuk mengidentifikasi proses perakitan dari tiap elemen kerja. Tujuannya adalah untuk menempatkan sejumlah elemen kerja ke beberapa stasiun kerja yang memungkinkan, sehingga waktu antar stasiunnya seimbang. Setiap stasiun diperbolehkan untuk menyelesaikan pekerjaannya pada selang waktu yang disebut *cycle time*, sehingga waktu untuk setiap stasiun kerja tidak boleh melebihi *cycle time*. Dengan didapatkannya waktu stasiun kerja yang terbesar maka *assembly rate* akan diperoleh. Masalah keseimbangan lintasan ini dapat diselesaikan dengan mencari jumlah stasiun kerja minimum sehingga didapatkan *cycle time*, atau mencari *cycle time* minimum

yang memberikan jumlah stasiun kerja (Suer, 1998).

Beberapa penelitian mengenai keseimbangan lintasan perakitan pada lintasan tunggal telah dilakukan seperti yang terdapat pada Ghosh & Gagnon (1989), Kein & Scholt (1996), Erel & Sarin (1998), Ponnambalam *et al.* (1999) dan Elsayed & Boucher (1994). Masalah keseimbangan lintasan yang dibahas terdiri beberapa pekerjaan, setiap pekerjaan ditugaskan pada satu stasiun kerja dalam suatu lintasan perakitan. Penelitian ini mengasumsikan jumlah operator untuk setiap stasiun kerja hanya ditempati oleh satu operator. Pada kenyataannya pengerjaan perakitan dengan menggunakan jumlah operator yang lebih banyak akan meningkatkan jumlah produksi suatu perusahaan. Bila lebih dari seorang operator mengerjakan pekerjaan pada sebuah stasiun kerja maka produk yang dihasilkan akan meningkat.

Bukchin & Meller (2005) telah mengembangkan model keseimbangan lintasan perakitan dengan memperhalikan jumlah operator yang dibutuhkan untuk setiap stasiun kerjanya. Model yang dikembangkan ini

menggunakan kriteria minimisasi jumlah operator. Boysen *et al* (2007) kemudian mengembangkan model keseimbangan lintasan perakitan dengan kriteria minimisasi *cycle time*. Model ini memperhatikan pengaruh jumlah operator terhadap jumlah produk yang dihasilkan.

Seiring dengan banyaknya jumlah permintaan akan suatu produk, sebuah perusahaan dalam proses pembuatan produknya akan selalu berusaha untuk memenuhi permintaan. Demikian juga dengan perusahaan yang memiliki lintasan perakitan. Untuk dapat memenuhi jumlah produk yang harus dirakit dalam jangka waktu tertentu mengharuskan perusahaan untuk menambah jumlah lintasan perakitannya. Sehingga satu jenis produk dirakit ke dalam beberapa lintasan perakitan sekaligus atau disebut lintasan perakitan paralel.

Penelitian yang telah dijelaskan di atas merupakan masalah keseimbangan lintasan perakitan pada lintasan tunggal yaitu menyeimbangkan satu buah lintasan dengan beberapa elemen kerja di dalamnya berdasarkan *precedence* diagram. Pada kondisi tertentu sebuah perusahaan membutuhkan lebih dari satu lintasan perakitan karena tingginya permintaan, lintasan ini disebut lintasan perakitan paralel.

Beberapa penelitian yang membahas model pada lintasan perakitan paralel diantaranya Askin & Zhou (1997) yaitu mengembangkan model heuristik keseimbangan lintasan perakitan paralel dengan kriteria minimisasi *cost*. Pada model ini jumlah operator yang menangani setiap stasiun kerja tidak dibahas. Di pihak lain, Suer (1998) mengembangkan model perancangan lintasan perakitan dengan tujuan menghasilkan jumlah lintasan paralel dengan jumlah operator minimum. Penelitian Suer (1998) mengusulkan 3 tahap pemecahan masalah, yaitu rancangan lintasan perakitan paralel, jumlah operator untuk setiap stasiun kerja (stasiun kerja paralel), serta konfigurasi dan jumlah lintasan. Untuk menghasilkan solusinya, model ini bekerja secara bertahap, sehingga ada tiga tahap penyelesaian masalah.

2. METODE USULAN

Masalah keseimbangan lintasan perakitan yang dibahas pada penelitian ini adalah perakitan dari satu jenis produk yang terdiri dari beberapa elemen kerja, setiap elemen kerja mempunyai durasi waktu sebesar t_i . Setiap elemen kerja akan dialokasikan pada salah satu stasiun kerja dari sekumpulan stasiun kerja perakitan. Terdapat sejumlah operator yang melakukan proses perakitan, setiap operator akan dialokasikan ke setiap stasiun kerja dan seorang operator hanya boleh menempati satu stasiun kerja.

Pada setiap stasiun kerja boleh lebih dari 1 operator. Tingkat permintaan produk sangat tinggi, sehingga tidak cukup hanya satu lintasan perakitan dan akan dirancang lintasan perakitan paralel. Jumlah lintasan perakitan paralel yang dihasilkan tergantung dari tingkat permintaan (*demand rate*).

Sistem yang dibahas pada penelitian ini sama dengan sistem pada penelitian Suer (1998), tetapi solusi yang diusulkan hanya 2 model, sehingga hasilnya diharapkan lebih baik. Berikut ini adalah notasi yang digunakan dalam penelitian ini:

CT = *cycle time*
 C = waktu stasiun kerja
 L = jumlah operator
 i = indeks elemen kerja ($i=1, \dots, n$)
 j = indeks stasiun kerja ($j=1, \dots, m$)
 k = indeks operator ($k=1, \dots, p$)
 t_i = waktu proses elemen kerja i .
 a = Indeks lintasan
 P_i = himpunan elemen kerja yang merupakan *predecessor* langsung dari elemen
 X_{ij} = variabel biner 0/1
 X_{ij} bernilai 1 jika elemen kerja i ditugaskan pada stasiun j dan sebaliknya bernilai 0.
 Y_{jk} = variabel biner 0/1
 Y_{jk} bernilai 1 jika operator k ditugaskan pada stasiun j dan sebaliknya bernilai 0.
 X_j = variabel biner 0/1. X_j bernilai 1 jika stasiun j ada dan sebaliknya bernilai 0.
 Z_a = variabel biner 0/1
 Z_a akan bernilai 1 jika lintasan a konfigurasi b ada
 q_a = jumlah operator dalam lintasan a
 R_a = *assembly rate* lintasan a

Pengembangan model pada penelitian ini dilakukan melalui dua tahap, yaitu:

1. Tahap pertama adalah model optimisasi keseimbangan lintasan perakitan dan pengalokasian operator di setiap stasiun kerja dengan kriteria minimisasi *cycle time*. Pada tahap ini dilakukan keseimbangan lintasan perakitan tunggal dan penentuan jumlah operator yang ideal untuk dialokasikan pada setiap stasiun kerja secara simultan, tetapi belum diketahui konfigurasi jumlah lintasan perakitan paralel yang tepat untuk dapat memenuhi tingkat permintaan terhadap produk tersebut.
2. Tahap kedua adalah model optimisasi konfigurasi dan jumlah lintasan pada lintasan perakitan paralel. Tahap ini menghasilkan konfigurasi dan jumlah lintasan yang dapat memenuhi tingkat permintaan (*demand rate*), berdasarkan data stasiun kerja dan jumlah operator

yang telah ditentukan pada tahap pertama

2.1 Model 1

Pengembangan model ini dimulai dengan membuat persamaan fungsi tujuan yaitu minimisasi *cycle time*. *Cycle time* lintasan perakitan didapatkan dari waktu stasiun terbesar pada setiap stasiun kerja yang didapat dengan menjumlahkan waktu proses setiap elemen kerja pada suatu stasiun kerja:

$$\text{Minimisasi } CT \quad (1)$$

Pembatas:

$$\sum_{i=1}^n t_i X_{ij} \cdot (1/\sum_{k=1}^p Y_{kj}) - C_j \leq 0, j = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$CT = \max(C_1, C_2, C_3, \dots, C_m) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \geq 1, j = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$X_{ij} \leq \sum_{h=1}^j X_{hi}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; h \in P_i \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m Y_{kj} = 1, k = 1, \dots, p \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^p Y_{kj} \geq 1, j = 1, \dots, m \quad (8)$$

Keterangan:

Persamaan (1) merupakan fungsi tujuan yaitu minimisasi *cycle time*. Persamaan (2) menyatakan bahwa waktu stasiun kerja yang telah dibagi jumlah operatornya tidak melebihi waktu siklusnya. Persamaan (3) menyatakan bahwa *cycle time* diperoleh dari waktu stasiun kerja terbesar. Persamaan (4) menyatakan setiap stasiun kerja harus mendapatkan minimal satu elemen kerja. Persamaan (5) menyatakan bahwa elemen kerja j hanya dapat ditempatkan di satu stasiun kerja i . Persamaan (6) sebelum elemen kerja i dialokasikan, maka elemen kerja terdahulu P_i harus dialokasikan terlebih dahulu. Persamaan (7) menunjukkan bahwa satu operator hanya akan ditempatkan pada satu stasiun kerja. Persamaan (8) menyatakan bahwa setiap stasiun kerja dapat menerima lebih dari satu operator.

2.2 Model 2

Setelah diperoleh formulasi untuk menentukan rancangan lintasan perakitan tunggal dan jumlah operator untuk setiap stasiun kerja, maka akan didapatkan hasil stasiun kerja yang seimbang dan jumlah operator yang ada berdasarkan *cycle time* terkecil. Dengan hasil yang didapat, dapat ditentukan jumlah lintasan yang dibutuhkan serta konfigurasi lintasan berdasarkan permintaan dan jumlah lintasan yang tepat untuk memenuhi tingkat permintaan (*demand rate*). Model 2 dibuat untuk menentukan jumlah operator yang dibutuhkan untuk memenuhi *demand rate* dengan memanfaatkan hasil *assembly rate* pada Model 1.

$$\text{Minimisasi } L \quad (9)$$

Pembatas:

$$\sum_{a=1}^s \sum_{b=1}^r q_a Z_{ab} - L = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{a=1}^s \sum_{b=1}^r R_a Z_{ab} - D \geq 0 \quad (11)$$

$$\sum_{a=1}^s \sum_{b=1}^r Z_{ab} \geq 1 \quad (12)$$

Keterangan:

Persamaan (9) merupakan fungsi tujuan yaitu minimisasi jumlah operator. Persamaan (10) menyatakan jumlah operator dari konfigurasi yang terbentuk sama dengan jumlah operator total yang dibutuhkan. Persamaan (4.14) menyatakan bahwa total *assembly rate* tidak boleh kurang dari *demand rate* yang ada. Persamaan (4.15) menyatakan bahwa Setiap stasiun kerja dapat menerima lebih dari satu operator dalam pelaksanaannya.

Untuk menjalankan Model 1 dan Model 2, dibutuhkan algoritma sebagai berikut:

- L-1 : inisialisasi n elemen kerja yang akan dirakit pada m stasiun kerja dengan p jumlah operator pada lintasan perakitan, m_{min} = jumlah stasiun kerja minimum
 - L-2 : set $p = m_{min}$
 - L-3 : gunakan Model 1 untuk merancang lintasan perakitan, untuk semua $m \leq p$ dimana $m \leq n$
 - L-4 : hitung $R = 1/CT$ untuk semua lintasan yang terbentuk.
 - L-5 : pilih R terbesar, simpan sebagai solusi
 - L-6 : set $p = p+1$
Jika ya, lanjutkan ke L-3
Jika tidak, kembali ke L-3
 - L-7 : apakah $p > p_{max}$?
 - L-8 : Gunakan Model 2 dengan menggunakan R (*assembly rate*) pada L-5 untuk memilih konfigurasi terbaik dengan jumlah operator minimum untuk memenuhi *demand rate*
- Secara garis besar tahapan dalam menyelesaikan masalah ini terdiri dari 2 tahap.

3. PENGUJIAN MODEL

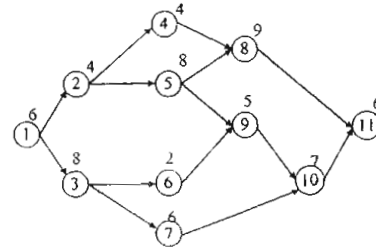
Pengujian model dimaksudkan agar dapat melihat kemampuan model dalam menyelesaikan masalah perancangan lintasan perakitan paralel dengan kriteria minimasi jumlah operator. Pengujian model ini dilakukan menggunakan skenario dan set data dari Suer (1998).

Data untuk pengujian model adalah sebagai berikut: terdapat 11 elemen kerja proses perakitan, waktu proses untuk setiap elemen kerja, *precedence diagram*, dan tingkat permintaan sebesar 10, 25, 50, 60, 75, 100 unit/jamnya. Data elemen kerja dan waktu prosesnya dapat dilihat pada

Tabel 1 dan precedence diagram dapat dilihat Gambar 1.

Tabel 1. Data elemen kerja dan waktu proses

Elemen kerja (EK)	Waktu proses (mnt)	Elemen kerja (EK)	Waktu proses (mnt)
1	6	7	6
2	4	8	9
3	8	9	5
4	4	10	7
5	8	11	6
6	2		



Gambar 1. Precedence diagram (Suer, 1998)

Pengujian dilakukan dengan mengikuti seluruh langkah yang ada pada algoritma. Dengan mengikuti L-1 sampai dengan L-4 untuk jumlah operator 12 dengan 4 stasiun kerja hingga 11 stasiun kerja memberikan hasil

seperti yang terdapat pada Tabel 2. Bila L-1 sampai L-6 dilakukan berulang mulai dari 4 operator hingga 30 operator, rekapitulasi hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil pengujian untuk 12 operator

Jumlah SK	Stasiun											R	CT											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11													
4 stasiun	OP EK	OP EK	OP EK	OP EK	OP EK	OP EK	OP EK	OP EK	OP EK	OP EK	OP EK	10	6											
5 stasiun	1	1	1	2	4	3,6,7, 9,10	1	4	3	8,11					10	6								
6 stasiun	2	1,2	2	3,6	2	4,5	2	7,9	2	8	2	10,11			9,23	6,5								
7 stasiun	2	1,2	2	3,6	2	4,7	1	5	2	8	2	9,10	1	11			7,5	8						
8 stasiun	2	1,2	2	3	1	6,7	1	5	2	4,9	2	8	1	10	1	11			7,5	8				
9 stasiun	2	1,2	1	2,6	2	5	1	9	1	7	1	10	1	4	2	8	1	11			8,57	7		
10 stasiun	1	1	1	2	1	5	1	4	2	3,6	2	8	1	7	1	9	1	10	1	11			7,5	8
11 stasiun	1	1	1	2	1	5	1	4	1	3	1	6	1	8	2	7	1	9	1	10	1	11	7,5	8

Ket: OP = jumlah operator
EK = Elemen kerja

Tabel 3. Rekapitulasi hasil untuk tiap tingkatan operator

Jumlah Operator	Konfigurasi terbaik	R
4	4	3.33
5	4	4.00
6	4	5.00
7	4	5.85
8	4	6.67
9	4	8.00
10	4	8.33
11	4	9.38
12	4	10.00
13	4	10.77
14	4	12.88
15	4	13.33
16	4	13.86
17	4	15.00
18	4	15.38
19	4	16.67
20	4	17.14
21	4	18.46
22	4	19.35
23	4	20.00
24	4	21.82
25	4	22.39
26	4	22.56
27	4	24.00
28	4	25.42
29	4	25.75
30	4	26.67

Setelah dilakukan rekapitulasi hasil *assembly rate* untuk tiap tingkatan operator yang optimal, selanjutnya lakukan L-8 untuk konfigurasi dan jumlah lintasan untuk memenuhi tingkat permintaan 10, 25, 50, 60, 75, 100 unit/jamnya. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil konfigurasi dan jumlah lintasan

Demand Rate	Konfigurasi Lintasan 1			Konfigurasi Lintasan 2			Konfigurasi Lintasan 3		
	Jml Op	Jml SK	Jml line	Jml Op	Jml SK	Jml line	Jml Op	Jml SK	Jml line
10	6	4	2						
25	14	4	2						
50	28	4	2						
60	14	4	3	24	4	1			
75	7	4	1	14	4	2	24	4	2
100	14	4	3	21	4	1	24	4	2

4. ANALISIS

Berikut ini akan dilakukan perbandingan jumlah

stasiun kerja dan operator dari model yang dikembangkan dengan model Suer (1998) yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan *assembly rate* (R)

Jumlah Operator	Konf. Terbaik		R	
	Penelitian	Suer (1998)	Penelitian	Suer (1998)
4	4	4	3.33	3.33
5	4	5	4.00	4.00
6	4	6	5.00	4.62
7	4	6.7	5.85	5.00
8	4	4	6.67	6.66
9	4	4	8.00	7.04
10	4	5	8.33	8.00
11	4	4.5	9.38	8.56
12	4	4	10.00	9.99
13	4	4	10.77	10.56
14	4	5	12.88	12.00
15	4	4.5	13.33	12.84
16	4	4	13.86	13.32
17	4	4	15.00	14.08
18	4	5	15.38	15.00
19	4	4	16.67	16.65
20	4	4.5	17.14	17.12
21	4	6.7	18.46	18.00
22	4	4	19.35	18.75
23	4	4.5	20.00	19.98
24	4	4	21.82	21.12
25	4	4.5	22.39	21.40
26	4	4	22.56	22.50
27	4	4	24.00	23.31
28	4	4	25.42	24.64
29	4	4	25.75	25.68
30	4	4	26.67	26.25

Dari Tabel 5 terlihat bahwa stasiun kerja yang dihasilkan oleh penelitian ini memiliki *assembly rate* lebih besar jika dibandingkan dengan model Suer (1998). Hal ini karena metode yang digunakan oleh penelitian ini menggunakan 2 model optimisasi yang masing-masing akan menghasilkan hasil optimal. Sedangkan model Suer (1998) menggunakan metode heuristik dalam penempatan elemen kerja ke dalam stasiun kerja sedangkan untuk menentukan jumlah operator dalam satu lintasan dan jumlah operator secara keseluruhan, menggunakan 2 model optimisasi.

Perbandingan jumlah operator yang dihasilkan oleh penelitian dengan model Suer (1998) dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 5.6. Perbandingan jumlah operator

Demand Rate Unit/jam	Jumlah Operator	
	Penelitian	Suer (1998)
10	12	13
25	28	29
50	56	57
60	66	69
75	83	86
100	111	114

Dari Tabel 6 terlihat bahwa jumlah operator pada penelitian ini lebih kecil jika dibandingkan model Suer (1998). Hal ini diakibatkan oleh perbedaan *cycle time* yang didapat pada lintasan tunggalnya dan jumlah konfigurasi yang dihasilkan oleh kedua model tersebut.

5. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan dilakukan dalam dua tahap. Model 1 adalah model optimisasi perancangan lintasan perakitan tunggal dan jumlah operator secara simultan dengan kriteria minimisasi *cycle time*, dan tahap dua pengembangan model optimisasi perancangan lintasan perakitan paralel dengan kriteria minimisasi jumlah operator.
2. Hasil perancangan lintasan perakitan paralel dengan meminimumkan jumlah operator bukan merupakan solusi optimal global karena proses perancangan lintasannya dilakukan kedalam dua tahap yang setiap tahapnya menghasilkan solusi optimal (optimal lokal).
3. Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah model perancangan lintasan perakitan paralel dengan jumlah operator minimum dalam satu tahap sehingga diperoleh solusi optimal global.

REFERENSI

Askin, R.G. and Zhou, M., (1997) A Parallel Station Heuristic for the Mixed-Model Production Line Balancing Problem, *International Journal of Production Research*, Vol 35, pp 3095-3105.

Boysen, N., Fliedner, M., and Scholl, A., (2007) A Classification of Assembly Line Balancing Problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, 674-693.

Bukchin, Y., and Meller, R. D., (2005) A space allocation algorithm for assembly line components, *IEE Transactions*, Vol. 37; 51-61.

Elsayed, E. A., and Boucher, T. O., 1994, *Analysis and control of production systems*, Prentice-Hall International, Inc. New Jersey.

Evel, E. and Sarin, C.S., (1998) A survey of assembly procedures, *Production Planning and Control*, No. 5, 414-434.

Ghosh, S., and Gagnon, R.J., (1989) A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research*, 27, 637-670.

Klein, R. and Scholl A. (1996) Maximizing the production rate in simple assembly balancing II a branch and bound procedure, *European Journal of Operational Research*, Vol. 91, 367-385.

Ponnambalam, S.G. and Aravindan, P. and Naidu, G.M. (1999), A comparative evaluation of assembly line balancing heuristics, *International Journal of Advance Manufacturing Technology* Vol. 15, 577-586

Suer, G. A., 1998, Designing parallel assembly line, *Computer Ind. Engineering*. Vol. 35, Nos 3-4, 467-470.

Riwayat Hidup Penulis

Emsosfi Zaimi adalah staf pengajar Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Nasional Bandung. Dia memperoleh gelar master di bidang teknik industri di Institut Teknologi Bandung pada tahun 1999. Area penelitian yang dilakukan meliputi *scheduling* dan *assembly line balancing*. Dia telah membuat publikasi dalam jurnal nasional.

Hendro Prassetiyo adalah staf pengajar Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Nasional Bandung. Dia memperoleh gelar master di bidang rekayasa manufaktur di Institut Teknologi Bandung pada tahun 2006. Area penelitian yang dilakukan meliputi *maintenance*, *scheduling* dan *assembly line balancing*. Dia telah membuat publikasi dalam jurnal nasional.

Dicky Rahmad Yulian adalah alumni Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Nasional Bandung. Dia memperoleh gelar sarjana di bidang teknik industri di Institut Teknologi Nasional Bandung pada tahun 2009. Area penelitian yang dilakukan meliputi *assembly line balancing*.