

KARAKTERISTIK ERGONOMIS RANCANG BANGUN WHEELBARROW

Rika Ampuh Hadiguna

Jurusan Teknik Industri Universitas Andalas
Limau Manis, Padang
E-mail: hadiguna@ft.unand.ac.id

Mia Monasari

Jurusan Teknik Industri Universitas Andalas
Limau Manis, Padang

ABSTRAK

Wheelbarrow merupakan salah satu alat manual material handling yang banyak digunakan masyarakat. Oleh karena itu perlu dilakukan penentuan karakteristik wheelbarrow yang baik yang telah mempertimbangkan faktor yang paling mempengaruhi konsumsi energi dan kemungkinan cedera untuk mengetahui prioritas perbaikan. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi. Dari analisis posisi tubuh diketahui bahwa posisi tubuh paling baik saat pengangkatan adalah posisi tubuh lurus dengan lengan sejajar tulang belakang. Berdasarkan kuesioner diketahui bahwa keluhan terbanyak responden adalah pada telapak tangan, lengan, bahu, siku dan pergelangan tangan. Berdasarkan informasi-informasi tersebut maka dapat disimpulkan bahwa wheelbarrow yang baik adalah wheelbarrow mempunyai jarak antara tumpuan manusia dengan poros roda yang lebih panjang dari 110 cm, mempunyai jarak horizontal titik berat beban terhadap poros yang lebih kecil dari 26,53 cm, mempunyai jarak vertikal titik berat beban terhadap poros yang lebih kecil dari 32,37 cm, mempunyai titik berat beban yang stabil (tetap pada (-13,22 cm ; 14,37 cm) terhadap titik acuan), mempunyai fitur yang dapat mengurangi kecepatan wheelbarrow di jalan menurun, mempunyai fitur yang dapat meredam getaran, mempunyai berat bersih wheelbarrow yang lebih ringan dari 21,6 kg, mempunyai tinggi kaki penyangga yang lebih rendah dari 32,5 cm.

Kata kunci: wheelbarrow, konsumsi energi, resiko cedera, metode taguchi.

ABSTRACT

A Wheelbarrow is one of manual material handling equipments, which often used by many people. From survey, there are some problems faced by users, e.g., high energy expenditure and risk of injuries. To avoid those particular risks in using a wheelbarrow, analysis of factors that affect this energy expenditure and risk of injuries will be needed. An experiment based on Taguchi method has been conducted to achieve the optimum combination of factors that increase energy expenditure rate and decrease the energy expenditure variance. The analysis of body posture shows that the best posture in using a wheelbarrow is when the straight arm in line with vertebrae. The analysis of subjective complaints shows that palm of hands, arms, shoulders, elbows and wrists are the most possible parts of body having risk injuries. Based on these information and analysis, a good wheelbarrow is a wheelbarrow that has the distance of man support and wheel axis smaller than 110 cm. The propose design of a new wheelbarrow has these following properties. The horizontal distance between weight point and wheel axis is smaller than 26.53 cm, the vertical distance between weight point and wheel axis is smaller than 32.37 cm and the weight point is stabil at (-13.22 cm ; 14.37 cm) based on the reference point. Moreover, it has a feature that can decrease wheelbarrow speed in descend way and decrease the effect of vibrations as well, the net weight is smaller than 21.6 kg and the support of wheelbarrow is lower than 32.5 cm.

Keywords: wheelbarrow, energy expenditure, risk of injuries, taguchi methods.

1. PENDAHULUAN

Pemindahan satu barang dari satu tempat ke tempat lain merupakan salah satu aktivitas yang sering dilakukan oleh manusia. Untuk melakukan pemindahan itu, manusia biasanya menggunakan tenaga sendiri atau dengan memanfaatkan tenaga mesin. Pemindahan dengan mengandalkan tenaga manusia dan tanpa menggunakan tenaga mesin disebut *manual material handling*. Peralatan yang berbasis mesin misalnya truk atau kerekan listrik sebenarnya sangat baik digunakan untuk menggantikan aktivitas *manual material handling*. Namun penggunaan alat-alat ini terkadang tidak sesuai dengan lingkungan kerja. Misalnya, truk tidak bisa digunakan pada area pertanian yang tidak memiliki jalan yang lebar. Salah satu alat angkut yang banyak digunakan adalah *wheelbarrow*. *Wheelbarrow* (lihat Gambar 1) digunakan pada berbagai macam aktivitas, misalnya aktivitas yang berkaitan dengan pembangunan fisik, pertanian dan aktivitas sipil umum lainnya. Penggunaan *wheelbarrow* tergolong dalam aktivitas *manual material handling*. Elemen pekerjaan spesifik pada penggunaan *wheelbarrow* terdiri dari *loading*, pengangkutan dan *unloading*. *Loading* merupakan proses pengangkatan (pergerakan vertikal) *wheelbarrow* dan muatannya hingga akhirnya dapat didorong. Pengangkutan merupakan pemindahan beban menuju tempat tertentu. *Unloading* merupakan proses pembongkaran muatan/ beban yang dilakukan dengan pengangkatan *wheelbarrow* beserta muatannya ke arah depan sehingga muatan tersebut dapat dikeluarkan dari *wheelbarrow*.



Gambar 1. *Wheelbarrow* Beserta Pengangkutnya

Aktivitas mengangkut dengan *wheelbarrow* merupakan aktivitas yang memerlukan energi yang besar. Konsumsi energi rata-rata yang diperlukan operator pengguna *wheelbarrow* besarnya ± 4080 kkal/hari selama jam kerja. Nilai ini mendekati nilai batas atas energi yang diperbolehkan untuk kerja berat yaitu ± 4800 kkal/hari (Grandjean, 1998). Selain konsumsi energi yang cukup besar, penggunaan *wheelbarrow* juga dapat mengakibatkan timbulnya kesulitan dan rasa sakit pada beberapa bagian tubuh. Misalnya pada saat *unloading*, pengguna sering kehilangan keseimbangan saat harus mengangkat dan menggerakkan *wheelbarrow* ke arah kiri dan kanan. Dan pada saat pengangkutan, pengguna sering merasakan beban yang besar pada bagian lengan. *Wheelbarrow* dapat dikatakan baik jika *wheelbarrow* dapat meminimasi konsumsi energi dan cedera yang ditimbulkan. Untuk dapat meminimasi kedua faktor tersebut maka salah satu cara yang dapat digunakan adalah perancangan ulang *wheelbarrow*. Namun proses perancangan ulang tanpa didahului dengan penelitian mengenai faktor apa yang paling mempengaruhi kualitas *wheelbarrow* dapat mengakibatkan tidak optimalnya hasil yang didapatkan. Perbaikan berpeluang dilakukan pada bagian yang sebenarnya tidak memberikan banyak pengaruh terhadap konsumsi energi dan cedera yang ditimbulkan. Untuk itu, investigasi faktor yang berpengaruh terhadap

konsumsi energi dan resiko cedera pada penggunaan *wheelbarrow* diperlukan untuk mendapatkan desain *wheelbarrow* yang optimal.

Permasalahannya adalah karakteristik *wheelbarrow* yang ergonomis sehingga konsumsi energi dan resiko cedera dapat diminimasi. Oleh karena itu dilakukanlah serangkaian tahapan yang bertujuan mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap konsumsi energi pada penggunaan *wheelbarrow*, menentukan posisi tubuh yang paling baik saat pengangkatan *wheelbarrow*, mengetahui bagian tubuh yang paling sering mengalami keluhan saat penggunaan *wheelbarrow*, dan menentukan karakteristik *wheelbarrow* yang baik dengan memperhatikan bagian-bagian yang berpengaruh besar terhadap tingkat konsumsi energi dan resiko cedera.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pemindahan Barang Manual

Mengangkat, mendorong dan menarik beban merupakan aktivitas yang dapat diklasifikasikan sebagai aktivitas *manual material handling*. Masalah utama dari aktivitas-aktivitas tersebut bukan seberapa berat beban yang ditanggung oleh otot tetapi lebih ditekankan pada penggunaan dan tekanan yang dialami tiap *disc* tulang belakang. Masalah pada tulang belakang akan mengakibatkan sakit dan akan mengurangi mobilitas serta vitalitas seseorang. Masalah pada tulang belakang bisa menyebabkan pekerja absen kerja dan masalah berkelanjutan dapat menyebabkan kelumpuhan. *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) menyatakan bahwa 60 % penderita cedera tulang belakang disebabkan oleh pengeluaran tenaga yang berlebihan. NIOSH menguraikan bahwa 40 % tenaga dikeluarkan untuk mengangkat beban dan 20 % untuk mendorong dan menarik beban.

Bentuk tulang belakang menyerupai huruf S yang pada bagian punggung menyerupai kurva *backward* disebut juga dengan *khyposis* dan pada bagian lumbar menyerupai kurva *forward* disebut juga dengan *lordosis*. Bentuk ini memungkinkan tulang belakang elastis untuk meredam tekanan saat berlari ataupun melompat. Semakin ke bawah maka semakin tinggi beban yang ditanggung tulang belakang. Dan beban terbesar ditanggung oleh 5 tulang terbawah yang disebut dengan lumbar. Masing-masing tulang belakang dipisahkan oleh *disc* tulang belakang. Kerusakan *disc* dapat dilihat dari keadaan pinggir *disc* yang mengalami perubahan dari kondisi awalnya yang biasanya liat dan berserat. Perubahan kondisi jaringan *disc* ini dapat disebabkan oleh karena kekurangan air sehingga bagian pinggir *disc* menjadi rapuh dan mudah rusak serta berkurang kekuatannya.

Pada awal kerusakan, kondisi *disc* akan mengganggu pergerakan mekanik dari tulang belakang. Pada kondisi ini, pengangkatan beban yang kecil ataupun insiden kecil seperti tersandung dapat mengakibatkan terjadinya sakit pinggang. Dan ketika kerusakan *disc* telah berlangsung lama maka tekanan yang diterima *disc* dapat menyebabkan *disc* tidak liat secara keseluruhan. Hal ini terjadi karena adanya pengeluaran cairan bagian dalam *disc* tersebut. Dan saat itu kondisi bagian dalam *disc* sama dengan kondisi tepi *disc*. Kondisi ini dapat menyebabkan terjadinya tekanan yang lebih besar pada urat syaraf tulang belakang atau urat syaraf disekitarnya. Kondisi inilah yang terjadi pada kasus *slipped disc* atau *disc herniation*. Dalam melakukan proses *manual material handling*, maka akan ada batasan-batasan tertentu. Adapun pendekatan terhadap batasan dari massa beban yang akan diangkat meliputi: batasan legal (*legal limitations*), batasan biomekanika (*biomechanical limitations*), batasan fisiologi (*physiological limitations*), batasan psiko-fisik (*psycho-physical limitations*) (Nurmianto, 2004).

2.2 Biomekanika

Pendekatan biomekanika menitikberatkan pada struktur tulang dan posisi pengangkatan, dimana struktur tulang terutama pada tulang belakang akan mengalami tekanan yang berlebih ketika melakukan pengangkatan meskipun frekuensinya jarang. Pendekatan biomekanika memandang tubuh manusia sebagai suatu sistem, yang terdiri dari elemen-elemen yang saling berkait dan terhubung satu sama lain melalui sendi-sendi dan jaringan otot yang ada. Pendekatan biomekanika berguna untuk mengukur kekuatan dan ketahanan fisik manusia untuk melakukan suatu pekerjaan tertentu, dimana hal ini bertujuan untuk mendapatkan suatu cara kerja yang lebih baik sehingga kemungkinan terjadinya cedera dapat diminimasi.

Biomekanika statis membahas keseimbangan tubuh di bawah pengaruh gaya. Model biomekanika statis merupakan dasar analisis gerakan tubuh manusia. Pada model biomekanika ini hanya mempertimbangkan efek dari percepatan gravitasi terhadap massa beban dan massa segmen sehingga menimbulkan gaya yang berarah ke pusat bumi. Model biomekanika statis yang utama adalah model biomekanika yang melibatkan seluruh anggota tubuh dengan disusun atas bagian-bagian tubuh yang saling berinteraksi dengan prinsip seperti *single body segment statis model*. Model ini memperhitungkan momen pada setiap sambungan bagian tubuh.

Biomekanika dinamis membahas mengenai gaya dinamis yang terjadi pada saat otot memanjang atau memendek untuk menghasilkan kerja. Misalnya mengangkat beban dan dipindahkan pada satu tujuan.

2.3 Fisiologi Kerja

Respon fisiologis tubuh terhadap kerja fisik dapat dilihat dari respon yang ditunjukkan oleh otot rangka, jantung dan pembuluh darah. Kerja otot sangat dibutuhkan dalam melakukan aktifitas fisik misalnya untuk mengangkat dan memindahkan barang dari satu tempat ke tempat lain. Aktivitas otot, yang umumnya terdiri dari kontraksi dan relaksasi menghabiskan banyak energi. Pemenuhan kebutuhan energi akan menimbulkan beban yang berat pada sistem jantung, pembuluh darah dan pernafasan. Jantung harus memompa lebih cepat agar darah dapat membawa oksigen lebih cepat ke otot sehingga otot dapat bekerja. Pembuluh darah akan mengalami peningkatan tekanan akibat volume darah yang bertambah besar dan sistem pernafasan akan bekerja ekstra untuk menyediakan oksigen darah.

2.4 Konsumsi Energi

Konsumsi energi merupakan banyaknya energi yang dibutuhkan untuk melakukan aktivitas. Kenaikan konsumsi energi sejalan dengan meningkatnya aktivitas manusia. Makin banyak aktivitas yang dilakukan manusia maka konsumsi energinya akan semakin meningkat pula. Konsumsi energi pada beberapa literatur ergonomi dinyatakan dalam satuan kilokalori (kcal). Dalam SI (Satuan Internasional) didapat bahwa 1 kilokalori (kcal) = 4,2 kilojoule (kJ). Konsumsi energi bersih didapatkan dengan cara mengurangi energi bekerja total dengan metabolisme basal. Metabolisme basal adalah konsumsi energi secara konstan pada saat istirahat dengan perut berada dalam keadaan kosong. Konsumsi energi pada metabolisme basal bergantung pada ukuran, berat beban dan jenis kelamin.

Salah satu proses yang paling penting di dalam tubuh manusia adalah berubahnya energi kimia dari makanan menjadi panas dan tenaga mekanik. Pada kondisi metabolisme basal ini hampir semua energi kimia dari zat makanan dikonversikan menjadi panas. Untuk proses metabolisme basal ini, pria dengan berat 70 kg membutuhkan 1700 kkal per 24 jam dan untuk wanita dengan berat 60 kg membutuhkan 1400 kkal per 24 jam.

Konsumsi energi diawali pada saat pekerjaan fisik dimulai. Semakin banyaknya kebutuhan untuk aktivitas otot bagi suatu jenis pekerjaan, maka semakin banyak pula energi yang dikonsumsi dan diekspresikan sebagai kalori kerja. Kalori ini didapat dengan cara mengukur konsumsi energi pada saat bekerja kemudian dikurangi dengan konsumsi energi pada saat istirahat atau pada saat metabolisme basal.

Kalori kerja ini menunjukkan tingkat ketegangan otot tubuh manusia dalam hubungannya dengan jenis kerja berat, tingkat usaha kerja, kebutuhan waktu untuk istirahat, efisiensi dari berbagai jenis perkakas kerja dan produktivitas dari berbagai cara kerja.

3. METODOLOGI

3.1 Penentuan Karakteristik Kualitas

Studi ini menggunakan pendekatan eksperimen. Metoda Taguchi dipilih sebagai teknik eksperimen karena keandalannya (Belavendram, 1995; Peace, 1993; Ross, 1989). Karakteristik kualitas merupakan unit yang diukur pada eksperimen ini. Pada eksperimen ini, nilai konsumsi energi yang akan dijadikan karakteristik kualitas tidak diukur langsung pada eksperimen. Unit yang diukur langsung pada eksperimen adalah denyut jantung untuk mendapatkan tingkat konsumsi energi. Pada eksperimen ini, karakteristik kualitas yang diinginkan adalah *the larger the better*. Artinya, faktor yang ingin diketahui adalah faktor yang paling besar pengaruhnya terhadap peningkatan karakteristik kualitas.

Peralatan-peralatan yang dibutuhkan pada eksperimen ini adalah *wheelbarrow*, *stopwatch*, *thermorecorder*, alat tulis, timbangan dan meteran. *Wheelbarrow* yang akan digunakan merupakan *wheelbarrow* yang paling banyak terjual di pasaran. Peralatan lain yang akan digunakan adalah *stopwatch*. *Stopwatch* juga digunakan untuk menghitung kecepatan pengangkutan *wheelbarrow* oleh responden. Kecepatan pengangkut berguna sebagai data pendukung yang dapat menunjukkan bahwa responden membawa *wheelbarrow* dalam keadaan normal dan stabil. *Thermorecorder* berguna untuk menentukan temperatur saat penelitian dilakukan. Termometer ini merupakan termometer digital yang dapat mengukur temperatur dan juga kelembaban udara. Alat tulis merupakan peralatan lain yang juga diperlukan untuk melakukan penyimpanan data di lapangan. Timbangan merupakan alat yang digunakan untuk mengukur antropometri berat badan responden. Sebelum timbangan digunakan, timbangan dikalibrasi terlebih dahulu guna mendapatkan hasil yang lebih akurat. Meteran digunakan untuk mengukur dimensi tubuh responden yang merupakan *input software* mannequin. Meteran juga digunakan dalam pengukuran dan pembuatan lintasan.

Unit yang akan diukur pada eksperimen ini adalah denyut jantung. Denyut jantung responden diukur pada saat sebelum eksperimen yaitu denyut jantung istirahat dan setelah eksperimen dilaksanakan yaitu denyut jantung bekerja. Pada saat sebelum pengukuran, responden harus berada dalam kondisi stabil, artinya tidak ada faktor lain yang mempengaruhi kondisi denyut jantung responden sebelum eksperimen dilaksanakan. Jadi, sebelum melaksanakan eksperimen, responden tidak boleh melaksanakan aktivitas fisik lain yang berlebihan. Responden dianjurkan berada dalam posisi duduk saat pengukuran denyut jantung istirahat ini. Denyut jantung pada saat istirahat dilakukan 15 menit sebelum eksperimen dilakukan. Denyut jantung bekerja diukur segera setelah eksperimen selesai dilakukan. Pengukuran dilakukan dengan sistem 10 denyut. Pengukuran waktu dimulai saat denyut jantung pertama dirasakan hingga denyut yang kesebelas. Metode ini dipilih untuk mempermudah pengambilan data, mempersingkat waktu dan meminimasi kemungkinan terjadinya kesalahan perhitungan jumlah denyut jantung.

3.2 Posisi Tubuh dan Resiko Cedera

Posisi tubuh yang dikaji merupakan posisi tubuh yang terjadi saat eksperimen dilakukan. Pengambilan data posisi tubuh diambil dengan menggunakan kamera dan kemudian dibuat model yang mendekati posisi tubuh. Data antropometri rata-rata responden dan data posisi tubuh inilah yang menjadi input software Mannequinpro 10.2 dari NexGen. Output dari pengolahan data posisi tubuh dengan menggunakan *software* Mannequinpro 10.2 adalah besarnya gaya dan momen yang bekerja pada segmen dan sendi tubuh. Kuesioner yang disebarakan kepada responden merupakan kuesioner yang berisi data tubuh yang terasa sakit saat eksperimen dilakukan. Format kuesioner merupakan modifikasi dari kuesioner *Nordic Body Map* yang juga mendeteksi keluhan subjektif pada beberapa bagian tubuh. Kuesioner ini bersifat melengkapi dan memvalidasi *output* dari pendeskripsian posisi tubuh.

3.3 Penentuan Karakteristik

Karakteristik *wheelbarrow* yang baik didapatkan dengan mempertimbangkan kombinasi faktor yang memberikan pengaruh optimal terhadap konsumsi energi dan juga dengan mempertimbangkan posisi tubuh serta keluhan yang dirasakan responden. Dengan mengetahui kombinasi faktor yang memberikan pengaruh optimal terhadap konsumsi energi maka perbaikan lebih ditekankan pada faktor-faktor tersebut. Dan dengan mengetahui posisi tubuh dan keluhan yang dirasakan maka perbaikan juga dilakukan agar dapat meminimasi terjadinya kemungkinan cedera. Kesimpulan merupakan ringkasan tahapan yang dilalui hingga didapatkan karakteristik *wheelbarrow* yang baik. Kesimpulan menjelaskan faktor-faktor yang memberikan pengaruh optimal terhadap konsumsi energi. Dan pada kesimpulan ini juga dijelaskan posisi tubuh mana yang paling aman dan keluhan apa yang paling sering dirasakan. Dengan mempertimbangkan hal-hal tersebut maka ditariklah kesimpulan mengenai karakteristik *wheelbarrow* yang baik.

4. DESAIN EKSPERIMEN

Faktor-faktor yang akan diteliti pada eksperimen ini adalah faktor-faktor yang mempunyai hubungan dengan struktur fisik *wheelbarrow* dan perbaikan cara kerja manusia. Faktor-faktor ini tergabung dalam faktor kontrol yaitu faktor yang ingin diketahui pengaruhnya untuk selanjutnya dilakukan perbaikan pada *wheelbarrow* terkait dengan faktor tersebut. Faktor *noise* juga dilibatkan dalam penelitian ini dengan tujuan mendapatkan faktor yang paling berpengaruh dan konsisten terhadap *noise* dan memiliki bias yang kecil. Dan dengan mempertimbangkan faktor biaya, pada penelitian ini tidak dilakukan perubahan langsung terhadap struktur fisik *wheelbarrow* dalam pelaksanaan eksperimen. Faktor-faktor yang dianggap berpengaruh terhadap struktur fisik *wheelbarrow* adalah:

1. Cara pengangkatan, yaitu pengangkatan *wheelbarrow* terdiri dari proses *loading*, mengangkut pada jarak tertentu dan *unloading*. Level cara pengangkatan yang akan digunakan adalah:
 - Level 1 merupakan cara pengangkatan yang terdiri dari proses *loading* dengan jongkok, pengangkutan dengan lengan lurus dan *unloading* dengan mengangkat.
 - Level 2 merupakan cara pengangkatan yang terdiri dari proses *loading* dengan jongkok, pengangkutan dengan lengan membengkok dan *unloading* dengan mengangkat.
2. Kondisi permukaan jalan, dalam hal ini jalan yang rata atau tidak rata dapat menimbulkan perbedaan getaran yang terjadi pada tubuh. Level yang digunakan untuk faktor kondisi permukaan jalan adalah:

- Jalan rata yang nyaris halus, tanpa ada hambatan.
 - Jalan tidak rata yang merupakan jalan berkerikil dan berlubang.
3. Kemiringan jalan yang terkait dengan besarnya gaya yang dibutuhkan untuk mendorong dan menahan *wheelbarrow* di jalan miring sebanding dengan besarnya sudut kemiringan jalan. Jadi level yang digunakan berkaitan dengan kemiringan jalan adalah :
 - Level 1 merupakan jalan datar
 - Level 2 adalah jalan miring yang terdiri dari jalan mendaki dan menurun dengan kemiringan 10° .
 4. Berat beban yaitu besarnya konsumsi energi berbanding lurus dengan berat beban. Faktor berat beban diteliti dengan menggunakan 2 level yaitu :
 - Beban minimum yang direkomendasikan untuk penggunaan alat *manual material handling* yaitu sebesar 35 kg.
 - Beban maksimum yang masih dibolehkan untuk menggunakan *material handling* dan aman untuk dibawa pada jarak 100 m yaitu sebesar 50 kg.
 5. Temperatur lingkungan, dalam hal ini dianggap dapat mempengaruhi kecepatan denyut jantung. Level yang digunakan berkaitan dengan faktor temperatur adalah:
 - Temperatur $24 - 27^\circ\text{C}$ yang merupakan temperatur nyaman pada daerah tropis.
 - Temperatur $35 - 40^\circ\text{C}$ yang merupakan temperatur tertinggi suatu pekerjaan dapat dilakukan dengan efisien.
 6. Jarak pengangkatan yang akan memberikan pengaruh pada besarnya konsumsi energi yang dibutuhkan berbanding lurus dengan besarnya jarak pengangkutan. Jarak pengangkatan juga merupakan faktor *noise* Level yang digunakan untuk faktor jarak pengangkatan adalah jarak 50 meter dan jarak 100 meter, yang merupakan jarak aman yang direkomendasikan untuk pengangkatan beban ± 50 kg.

Interaksi terjadi jika perubahan level satu faktor mengakibatkan perubahan nilai faktor lain. Pada eksperimen ini, terlebih dahulu akan dikaji keberadaan interaksi antara 4 faktor kontrol dan juga interaksi antara 2 faktor *noise*. Dari identifikasi yang dilakukan, diketahui bahwa terdapat 3 interaksi yang potensial yaitu interaksi cara pengangkatan dengan kondisi permukaan jalan, cara pengangkatan dengan kemiringan jalan dan cara pengangkatan dengan berat beban. Untuk selanjutnya keempat faktor utama dan interaksi-interaksi akan ditempatkan pada kolom *inner orthogonal array* yang sesuai dengan rekomendasi *linear graph*. Setelah interaksi 4 faktor kontrol dikaji maka selanjutnya dikaji interaksi antara dua faktor *noise* yaitu faktor temperatur dan jarak pengangkatan. Interaksi antara faktor temperatur dengan jarak pengangkatan dianggap ada karena semakin tinggi temperatur maka semakin cepat operator merasa lelah. Hal ini mengakibatkan jarak pengangkatan yang dapat dilakukan menjadi lebih dekat. Faktor *noise* beserta interaksinya akan ditempatkan pada *outer orthogonal array*. Diperoleh derajat bebas faktor utama/kontrol adalah 7 dan derajat bebas faktor *noise* adalah 3. Derajat bebas faktor berguna sebagai dasar pemilihan *orthogonal array*. *Orthogonal array* yang digunakan harus mempunyai derajat bebas yang sama atau lebih besar dibandingkan dengan derajat bebas faktor sehingga *inner orthogonal array* terpilih adalah $L_8(2^7)$ dan *outer orthogonal array* terpilih adalah $L_4(2^3)$. Penempatan faktor dan interaksi pada kolom *orthogonal array* dilakukan berdasarkan *linear graph*. *Linear graph* merupakan grafik yang menunjukkan dimana faktor dan interaksi antar faktor harus ditempatkan pada kolom *orthogonal array*. Dengan penggunaan *linear graph* maka *confounding* (pembauran efek) antara faktor utama dengan faktor interaksi tidak akan terjadi (Peace, 1993). Berdasarkan Belavendram (1995) dan Ross (1989) Metoda Taguchi merekomendasikan 2 *linear graph* untuk *orthogonal array* $L_8(2^7)$. Dengan berdasarkan pada jumlah faktor kontrol dan interaksi diantaranya maka *linear graph* yang sesuai adalah *linear graph*.

Tabel 1. Orthogonal array yang Digunakan

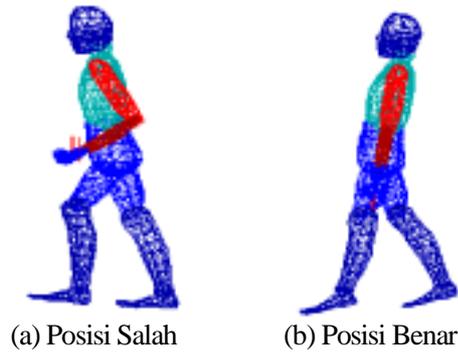
								<i>Outer Array</i>				
								E	1	1	2	2
								F	1	2	1	2
								EF	1	2	2	1
								<i>Inner Array</i>				
								y	y	y	y	
	A	B	AB	C	AC	D	AD					
1	1	1	1	1	1	1	1					
2	1	1	1	2	2	2	2					
3	1	2	2	1	1	2	2					
4	1	2	2	2	2	1	1					
5	2	1	2	1	2	1	2					
6	2	1	2	2	1	2	1					
7	2	2	1	1	2	2	1					
8	2	2	1	2	1	1	2					

Data denyut jantung yang telah dikonversikan menjadi data konsumsi energi kemudian diolah dengan metode analisis rata-rata dan *Signal to noise ratio* (S/N ratio). Analisis ini secara umum terdiri dari tahap *analysis of mean*, *analysis of variance*, penggabungan faktor yang dianggap tidak berpengaruh, perhitungan persen kontribusi dan pelaksanaan eksperimen konfirmasi. Hasil akhir kedua analisis adalah kombinasi faktor yang dapat mempengaruhi rata-rata dan juga meminimasi variansi. Berdasarkan pertimbangan para pakar, maka kombinasi optimum yang terpilih terdiri dari faktor kemiringan jalan, faktor berat beban, faktor kondisi permukaan jalan dan interaksi cara pengangkatan dengan kondisi permukaan jalan. Pertimbangan pemilihan hanya 4 faktor adalah untuk mendapatkan desain dengan karakteristik *wheelbarrow* yang optimal dari aspek fungsi dan ekonomis. Artinya dengan perbaikan yang hanya mempertimbangkan beberapa faktor maka konsumsi energi dapat direduksi secara optimal. Hasil dari eksperimen secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran A dan Lampiran B.

5. KARAKTERISTIK ERGONOMIS

5.1 Pendeskripsian Posisi Tubuh

Pendeskripsian posisi tubuh berguna untuk mengidentifikasi bagian tubuh yang mendapatkan gaya dan momen terbesar akibat posisi tubuh tertentu. Informasi ini berguna sebagai dasar penentuan posisi tubuh yang perlu diperbaiki dan posisi tubuh yang sebaiknya digunakan saat pengangkutan *wheelbarrow*. Dengan menggunakan *software* MannequinPro 10.2 maka didapatkan rekapitulasi bagian tubuh yang mendapatkan gaya dan momen yang besar akibat posisi tubuh tertentu. Dari perhitungan MannequinPro dapat diketahui bahwa bagian tubuh yang mendapatkan momen terbesar akibat posisi saat penggunaan *wheelbarrow* adalah lumbar, bahu, siku, pergelangan tangan, leher dan paha. Posisi tubuh dengan momen terbesar pada lumbar adalah pengangkatan di jalan miring dengan lengan bengkok. Lengan bengkok mengakibatkan lengan gaya antara beban dengan lumbar menjadi lebih besar.

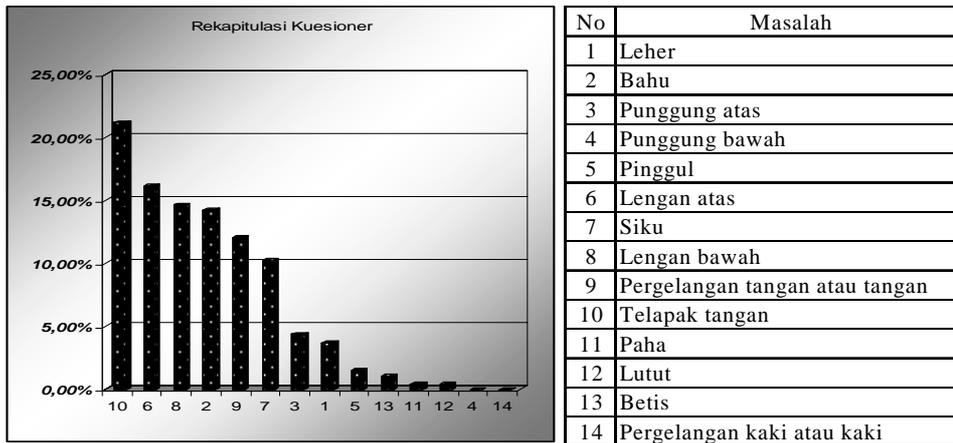


Gambar 2. Posisi Tubuh Pengangkatan di Jalan Mendaki

Umumnya, momen terbesar terjadi pada lumbar namun untuk posisi tubuh pengangkatan di jalan lurus, momen terbesar terjadi pada bahu dan lumbar mendapatkan momen yang kecil. Hal ini terjadi karena pada posisi ini, tulang belakang benar-benar lurus dan sejajar dengan telapak yang merupakan pusat gaya luar. Kesejajaran ini mengakibatkan tidak terdapatnya lengan gaya yang besar antara telapak tangan dengan lumbar. Oleh karena itu, posisi dengan tulang belakang lurus dan lengan sejajar lumbar sangat direkomendasikan sebagai posisi yang baik dalam pengangkatan.

5.2 Keluhan Subjektif

Dari kuesioner diketahui bahwa bagian tubuh yang paling sering merasakan sakit adalah telapak tangan, lengan atas dan lengan bawah. Sedangkan joint yang terdeteksi paling sering merasakan sakit adalah bahu dan siku. Kesimpulan ini berbeda sekali dengan hasil mannequin yang menunjukkan bahwa momen dan gaya yang bekerja pada lumbar dan dada mempunyai nilai yang paling besar. Kondisi ini dapat terjadi karena lumbar memiliki karakteristik tidak mudah sakit sehingga data kuesioner yang merupakan data rasa sakit yang dirasakan saat eksperimen tidak dapat menjelaskan keadaan lumbar yang sebenarnya. Plot bagian tubuh dengan gaya dan momen terbesar berdasarkan kuesioner dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3. Grafik Keluhan Subjektif Responden

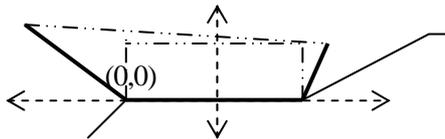
5.3 Penentuan Karakteristik

Wheelbarrow yang baik adalah *wheelbarrow* yang dapat meminimasi konsumsi energi, meminimasi gaya dan momen yang bekerja pada tubuh dan juga dapat meminimasi keluhan yang dirasakan pada bagian-bagian tubuh tertentu. Karakteristik *wheelbarrow* sebagai berikut:

a. Karakteristik berkaitan dengan kemiringan jalan.

Pada saat melewati tanjakan, postur tubuh cenderung miring ke depan dan bagian atas tubuh cenderung membungkuk. Postur tubuh ini mengakibatkan besarnya momen yang bekerja pada tubuh terutama pada lumbar dan punggung. Momen terbesar saat posisi ini dilakukan terjadi pada lumbar, bahu, pergelangan tangan, siku, dan paha. Untuk meminimasi konsumsi energi dan gaya yang bekerja maka dapat digunakan prinsip momen gaya. Masalah lain yang ditemui saat menggunakan *wheelbarrow* di jalan tanjakan adalah Bergeraknya beban ke arah tubuh akibat jalan yang miring. Titik berat pada jalan menanjak bergerak mendekati tubuh.

Pada saat melewati jalan menurun, tubuh tidak menghasilkan gaya ke arah depan untuk membuat *wheelbarrow* bergerak karena *wheelbarrow* dapat bergerak sendiri dengan adanya gaya gravitasi bumi. Usaha yang perlu dilakukan tubuh adalah usaha mempertahankan agar *wheelbarrow* bergerak sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Titik berat bagian *wheelbarrow* tersebar pada beberapa tempat. Dari perhitungan mekanika diketahui beberapa titik berat yang dihitung berdasarkan titik acuan (0,0) seperti Gambar 4.



Gambar 4. Titik Acuan *Wheelbarrow*

Dari uraian di atas dapat disimpulkan karakteristik apa yang harus dimiliki *wheelbarrow* untuk mengatasi masalah di jalan mendaki adalah :

- *Wheelbarrow* mempunyai jarak antara tumpuan manusia dengan poros roda yang lebih panjang sehingga manusia tidak perlu memiringkan tubuh ketika mendaki. Jarak poros roda dengan tumpuan manusia saat ini adalah 110 cm, sehingga pada perbaikannya nanti, jarak tumpuan manusia dengan poros roda harus lebih besar dari 110 cm.
 - *Wheelbarrow* mempunyai titik berat yang stabil sehingga titik berat beban tidak berubah mendekati tubuh ketika mendaki. Titik berat beban pada saat *wheelbarrow* diam adalah (-13,22 ; 14,37) dihitung dari titik acuan bak *wheelbarrow*. Dari perhitungan lampiran K diketahui bahwa titik berat bergerak mendekati tubuh pada saat mengangkat di tanjakan. Kondisi ini akan semakin parah jika beban bergerak dan menumpuk ke arah tubuh. Oleh karena itu perlu dirancang bak sedemikian rupa sehingga titik berat tetap berada pada (-13,22 ; 14,37)
 - Penambahan fitur pada *wheelbarrow* sehingga dengan adanya fitur tersebut kecepatan *wheelbarrow* dapat dikurangi dengan hanya menggunakan sedikit tenaga.
- b. Karakteristik berkaitan dengan berat beban
- Masalah utama yang berkaitan dengan berat beban adalah nilai beban itu sendiri. Semakin besar beban yang diangkat maka semakin besar gaya-gaya yang berkerja pada tiap bagian tubuh.

- Perubahan yang dapat dilakukan untuk memperkecil gaya dan konsumsi energi adalah:
- Memperpendek jarak horizontal titik berat bak terhadap poros (< 33,37 cm) dan memperpendek jarak horizontal titik beban rangka terhadap poros (< 26,53 cm).
 - Memperpendek jarak vertikal antara titik berat bak dengan poros (< 28,84 cm) dan memperpendek jarak vertikal antara titik berat beban dengan poros (< 2,37 cm).
 - Mengurangi berat bersih *wheelbarrow* itu menjadi lebih kecil dari 21,6 kg.
- c. Karakteristik berkaitan dengan kondisi permukaan jalan.
 Masalah utama yang berkaitan dengan kondisi jalan adalah besarnya getaran yang terjadi. Getaran ini dirasakan oleh tubuh dan dapat mempercepat timbulnya rasa sakit pada bagian tubuh, terutama sakit pada bahu dan lengan.
 Perbaikan yang dapat dilakukan berkaitan dengan kondisi permukaan jalan adalah penggunaan fitur yang dapat meredam getaran. Misalnya penggunaan roda dengan tekanan udara tertentu dan penggunaan handel dengan bahan dan ketebalan tertentu serta penggunaan per atau *shockbreaker* pada penyangga poros roda.
- d. Karakteristik berkaitan dengan interaksi cara pengangkatan dan kondisi permukaan jalan.
 Bentuk interaksi cara pengangkatan dengan kondisi permukaan jalan adalah adanya usaha tubuh untuk meminimasi getaran. Cara pengangkatan dapat berubah-ubah sesuai dengan kondisi permukaan jalan. Untuk meminimasi getaran yang diterima oleh bahu dan tulang belakang, operator biasanya mengangkat dengan lengan bengkok. Mengangkat dengan lengan bengkok dianggap dapat mengurangi pengaruh getaran pada bahu dan tulang belakang tetapi mengangkat dengan cara ini mengakibatkan lengan lebih cepat sakit.
 Untuk mengantisipasi masalah ini maka perlu dicari penyelesaian yang dapat meminimasi kedua masalah. Penggunaan per, *shockbreaker* atau benda sejenis dianggap dapat meminimasi kedua masalah ini.
- e. Karakteristik berkaitan keluhan yang paling sering dirasakan.
 Pengangkatan dengan menggunakan *wheelbarrow* dapat menimbulkan rasa sakit pada banyak anggota tubuh. Berdasarkan hasil kuesioner rasa sakit yang paling banyak dirasakan selama eksperimen adalah rasa sakit pada telapak tangan. Faktor utama yang menyebabkan tingginya persentase rasa sakit pada telapak tangan adalah kondisi handel. Bagian tubuh lain yang paling sering terasa sakit adalah lengan atas, lengan bawah dan bahu dan siku. Rasa sakit berlebih ini disebabkan oleh pengangkatan yang dilakukan dengan lengan bengkok.
 Perbaikan yang dapat dilakukan berkaitan dengan keluhan yang paling sering dirasakan adalah:
- Handel sebaiknya dibuat dari bahan yang lembut sehingga tidak menimbulkan rasa perih pada telapak tangan.
 - Tinggi kaki penyangga kaki lebih kecil dari tinggi sekarang, 32,5 cm, sehingga pengguna tidak perlu membengkokkan lengannya untuk menghindari benturan yang terjadi antara kaki penyangga dengan permukaan jalan.
- f. Saran berkaitan dengan posisi tubuh saat pengangkatan
 Berdasarkan pendeskripsian posisi tubuh, diketahui bahwa posisi tubuh dengan momen lumbar terkecil adalah posisi tubuh saat tulang belakang lurus dan lengan sejajar dengan tulang belakang. Posisi tubuh ini harus dipertahankan pada setiap posisi pengangkatan. Dan struktur fisik *wheelbarrow* hendaknya dapat memfasilitasi digunakannya posisi tubuh ini.
- g. Saran berkaitan dengan faktor *noise*.
 Walaupun keberadaan faktor *noise* tidak berpengaruh terhadap struktur fisik *wheelbarrow*, namun keberadaan faktor *noise* dapat diminimasi dengan melakukan tindakan-tindakan

tertentu. Misalnya untuk mengurangi pengaruh temperatur, pengguna *wheelbarrow* sebaiknya menggunakan topi atau pakaian panjang tetapi tipis untuk menghindari pengeluaran keringat yang berlebihan. Dan untuk mengurangi pengaruh jarak terhadap konsumsi energi, maka sebaiknya pengguna melakukan istirahat sejenak sambil mengkonsumsi makanan atau minuman ringan.

6. KESIMPULAN

Pertama, faktor-faktor yang paling berpengaruh dan merupakan kombinasi optimum terhadap nilai konsumsi energi adalah faktor kemiringan jalan, faktor kondisi permukaan jalan faktor berat beban dan interaksi antara cara pengangkatan dengan kondisi permukaan jalan. Kedua, dari analisis mekanis yang dilakukan dengan pendeskripsian posisi tubuh didapatkan bahwa posisi tubuh terbaik dalam penggunaan *wheelbarrow* adalah posisi tubuh saat tulang belakang lurus dan sejajar dengan lengan. Selanjutnya *join* tubuh yang mengalami momen terbesar adalah lumbar dan segmen tubuh yang mendapatkan gaya terbesar adalah segmen dada atau punggung. Sedangkan berdasarkan analisis data *subjektif* dari kuesioner, diketahui bahwa bagian tubuh yang paling sering merasakan sakit adalah telapak tangan, lengan atas, lengan bawah, bahu dan siku. Ketiga, jika ditinjau dari kriteria konsumsi energi dan resiko cedera maka *wheelbarrow* yang baik adalah *wheelbarrow* yang mempunyai kombinasi karakteristik-karakteristik yang dapat mengoptimalkan kualitas *wheelbarrow*. Karakteristik *wheelbarrow* tersebut adalah mempunyai jarak antara tumpuan manusia dengan poros roda yang lebih panjang dari 110 cm, mempunyai jarak titik berat beban terhadap poros yang lebih kecil dari 26,53 cm, mempunyai jarak vertikal titik berat bak terhadap poros yang lebih kecil dari 32,37 cm, mempunyai titik berat yang stabil (tetap pada (-13,22 cm ; 14,37 cm) terhadap titik acuan), mempunyai fitur yang dapat mengurangi kecepatan *wheelbarrow* di jalan menurun, mempunyai fitur yang dapat meredam getaran, mempunyai berat bersih *wheelbarrow* yang lebih ringan dari 21,6 kg, mempunyai tinggi kaki penyangga yang lebih rendah dari 32,5 cm.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari Program Kreativitas Mahasiswa bidang Penerapan Teknologi Tahun 2006 yang diselenggarakan oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Depdiknas. Rasa terima kasih disampaikan atas bantuan dana penelitian yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Belavendram, N., 1995. *Quality By Design Taguchi Techniques for Industrial Experimentation*, Prentice Hall International: UK.
- Nurmianto, E., 2004. *Ergonomi: Konsep Dasar dan Aplikasinya*. Edisi Kedua, Guna Widya: Surabaya.
- Peace, G.S., 1993. *Taguchi Methods: A Hand on Approach*. Addison-Wesley Publishing Company: Massachusetts.
- Ross, P.J., 1989. *Taguchi Technique for Quality Engineering*, McGraw-Hill Book Co. Singapore.

LAMPIRAN:

Lampiran A. Hasil Perhitungan dengan Analisis Rata-Rata

Urutan	Outer Array		2		3		4		y															
	A	B	1		2		3		4															
			1	2	1	2	1	2	1	2														
1	1	1	0,6773	2,5170	2,1552	1,9887	0,5524	2,8711	1,1692	1,2213	2,0120	1,6751	3,4687	0,8153	0,7754	2,9392	1,9684	3,6665	1,0482	1,9755	1,8750	1,8672		
2	1	1	2,3002	4,4756	1,5788	1,8947	2,0762	2,0618	6,2829	1,4804	5,3069	1,3733	1,7721	1,4656	2,1864	4,5664	5,3628	2,1956	1,4804	6,0304	3,4285			
3	1	2	1,0437	4,4756	1,6613	2,1956	2,1304	2,3118	4,1629	1,8143	2,8415	1,8491	5,5768	0,9499	2,8415	0,9499	1,6041	3,5651	1,0143	1,7891	1,0143	2,3322		
4	1	2	1,8784	4,8526	1,4656	0,8417	3,0694	2,8541	6,5032	3,9563	2,9485	3,3834	1,4577	6,6998	2,6575	2,9485	2,6043	1,1151	8,6376	2,4863	1,0782	2,4863	3,1963	
5	2	1	1,1932	2,8415	0,6012	1,2230	1,5851	1,0892	4,0617	2,2001	1,2213	2,1372	0,5005	2,9872	1,6615	1,2213	1,6615	1,0137	2,7307	1,1458	2,1864	1,1458	1,7214	
6	2	1	1,7284	2,7068	2,5561	2,3970	3,8070	1,3070	6,8972	2,5170	2,0246	6,9949	2,2895	8,5327	1,4370	2,0246	3,8515	2,1304	5,7032	2,2528	2,6073	6,4266	3,5606	
7	2	1	1,7298	4,2650	0,6354	1,5788	2,2846	2,2323	6,0577	0,7228	2,2560	4,0536	2,6004	4,9623	1,4203	2,2560	1,4203	3,3363	12,4462	1,1513	1,6838	1,1513	2,9128	
8	2	1	2,1208	4,7960	2,0831	2,1654	3,2927	3,3834	7,6134	2,2862	2,2687	4,3292	2,8529	7,1719	2,0145	2,2687	2,0145	1,9996	12,5542	1,6615	2,5040	1,6615	3,5521	
Level 1	A		B		AB		C		AC		AD		D		AD		AD		AD		AD		AD	
Level 2	2,7061		2,9367		2,7026		3,4344		2,2084		2,8280		2,5842		2,8842		2,8842		2,8842		2,8842		2,8842	
Selish	0,2307		0,3539		0,2375		1,2260		0,0132		0,4743		0,1257		0,1257		0,1257		0,1257		0,1257		0,1257	
Karakteristik Kualitas :	Larger the better		Rata-rata eksperimen		Rata-rata prediksi		Rata-rata konfirmasi																	
Sumber	Pool		Y		v		MS		F Ratio		F tabel		SS'		Rho		Rho		Rho		Rho		Rho	
A	Y		2,1282		2,1282		2,1282		-		-		-		-		-		-		-		-	
B	-		5,0108		5,0108		5,0108		1,1886		3,9034		0,7950		0,1089%		0,1089%		0,1089%		0,1089%		0,1089%	
AB	-		2,2568		2,2568		2,2568		0,5353		3,9034		-1,9591		0,0000%		0,0000%		0,0000%		0,0000%		0,0000%	
C	-		60,1237		60,1237		60,1237		14,2613		3,9034		55,9078		7,6602%		7,6602%		7,6602%		7,6602%		7,6602%	
AC	Y		0,0070		0,0070		0,0070		-		-		-		-		-		-		-		-	
D	-		8,9979		8,9979		8,9979		2,1343		3,9034		4,7821		0,6552%		0,6552%		0,6552%		0,6552%		0,6552%	
AD	Y		0,6316		0,6316		0,6316		-		-		-		-		-		-		-		-	
e	Y		650,6928		152		4,2809		-		-		-		-		-		-		-		-	
Pooled e	-		653,4595		155		4,2159		1,0000		-		670,3230		91,8441%		91,8441%		91,8441%		91,8441%		91,8441%	
SS'	-		729,8488		159		4,5902		-		-		729,8488		100%		100%		100%		100%		100%	
S _m	-		1273,6335		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-	
ST	-		2003,4822		160		-		-		-		-		-		-		-		-		-	
Interval Keyakinan	-		Faktor		0,3207		-		Rata-rata prediksi		Rata-rata konfirmasi													
	-		-		-		-		0,7170		2,8049		0,8759		0,8759		0,8759		0,8759		0,8759		0,8759	

