

Perancangan awal traktor-trek-mini Polman Bandung

Risky Ayu Febriani n¹, Dicky Rachmat Riyanto n¹, Isa Setiasyah Toha³

Politeknik Manufaktur Negeri Bandung

Jl. Kanayakan No.21 - Dago, Bandung - 40135

Email: riskyayuf@gmail.com, dicky_r_r@yahoo.co.id, isa_st@polman-bandung.ac.id

Abstrak

Studi mekanika kendaraan lapangan (termasuk traktor) umumnya diarahkan pada kepadatan tanah yang berlebihan yang disebabkan oleh pergerakan kendaraan, dampak roda atau trek pada tanah karena tekanan dari kendaraan, dan dampak roda atau trek yang tergelincir (slip), serta traksi yang tidak cukup karena pergeseran tanah atau kegagalan gesekan permukaan. Kerangka perancangan kendaraan trek meliputi (Rahman et al., 2005b): karakteristik mekanika lapangan, model matematik kendaraan, dan parameter perancangan. Perancangan kendaraan trek atau traktor trek secara garis besar terdiri dari: sistem transmisi daya, sistem trek, rangka utama, sistem kemudi, dan badan kendaraan. Parameter perancangan terdiri dari (Kheiralla et al., 2012): daya mesin dan kecepatan putar, kecepatan kendaraan teoritis, berat total kendaraan, keterbenaman (*sinkage*) kritis kendaraan, jarak roda-jalan (*road wheel*), dan pusat gravitasi kendaraan.

Dalam perancangan untuk menentukan dimensi trek, melibatkan hubungan tekanan trek dan tekanan benam dari tanah. Unjuk kerja kendaraan/traktor trek sangat dipengaruhi oleh interaksi antara karakteristik tanah dan variabel dari trek, serta terdapat pengaruh timbal balik antara beberapa variabel/parameter rancangan. Penelitian ini membahas perancangan awal untuk traktor-trek-mini yang akan dibuat di Politeknik Manufaktur Negeri Bandung. Penelitian diawali oleh perancangan awal sistem trek yang berupa penentuan dimensi sistem trek, yang dilanjutkan dengan mampu-kemudi (*steerability*) kendaraan, penentuan daya-panarik (*draw bar power*), dan penentuan daya mesin, dengan menggunakan model/persamaan empiris karakteristik tanah hasil penelitian dari peneliti lain. Untuk traktor-trek-mini dengan panjang x lebar kendaraan maksimum 2200 x 1500 mm, bobot total <500 kg, kecepatan kendaraan >5 km/jam, yang dioperasikan pada tanah organik; hasil perancangan awal sistem treknya adalah: lebar trek 0.1 m, diameter sproket 0.4 m, jarak trek 1.28 m, daya-panarik 0.8 HP, dan daya mesin yang dibutuhkan adalah 2.0 HP.

Kata kunci: traktor, perancangan, trek

1. Pendahuluan.

Traktor dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran sesuai dengan fungsi yang dibutuhkan dalam penggunaannya. Dalam meninjau kinerja traktor perlu mempertimbangkan sistem utama dan daya yang dihasilkan. Komponen utama dalam sistem transmisi daya adalah kopling (*clutch*), gigi transmisi, roda penggerak, termasuk outlet daya (*Power Take Off* dan tenaga hidrolis) [8].

Studi mekanika kendaraan lapangan (termasuk traktor) umumnya diarahkan pada kategori masalah yang paling sering ditemukan, yaitu [12]: kepadatan tanah yang berlebihan disebabkan oleh pergerakan kendaraan, dampak roda atau trek pada tanah karena tekanan dari kendaraan, dan dampak roda atau trek yang tergelincir (slip) serta traksi yang tidak cukup karena pergeseran tanah atau kegagalan gesekan permukaan. Terdapat perbedaan yang besar pada kinerja traksi dan efisiensi antara trek dan ban (*tyre*). Kemampuan traksi trek atau roda (*wheel*) traktor tergantung pada berat serta panjang dan tekanan kontak pada tanah. Luas kontak trek menghasilkan tarikan yang lebih besar dari pada ban traktor untuk berat yang

sama. Trek lebih efisien dalam meneruskan daya ke tanah dari pada roda, yang berarti trek menghasilkan daya tarik lebih besar dari traktor beroda untuk kekuatan yang sama [3].

Ketika trek atau ban mendorong tanah ke bawah, tanah sedikit bergerak, kemudian akan menimbulkan slip dan meperlambat gerak maju. Traktor berpengerak empat roda (*four wheel drive*) biasanya beroperasi pada slip 15%, trek biasanya memiliki kekuatan tarik dengan maksimum slip sekitar 3-5%. Beroperasi dengan slip yang kecil berarti menghasilkan daya dan gaya tarik yang lebih besar [3]. Pemadatan tanah disebabkan oleh beban kendaraan serta beban poros pada tanah dan slip saat bekerja. Selain berat kendaraan, juga dipengaruhi oleh luas kontak/tekanan tanah dan kondisi tanah. Sebuah traktor beroda yang memiliki luas kontak dengan tanah yang lebih kecil dari trek, dapat menyebabkan pemusatan beban pada bidang kontak (*patch*) yang kecil. Hal ini menyebabkan traktor beroda akan terbenam. Sebuah trek yang luas kontak dengan tanah yang besar, akan

mendistribusikan beban lebih merata dan menghasilkan sedikit pemadatan. Trek menggabungkan kemampuan traksi dan pemadatan rendah dengan mobilitas yang lebih baik daripada ban [3].

Kerangka perancangan kendaraan trek meliputi: karakteristik mekanika lapangan, model matematik kendaraan, dan parameter perancangan [10]. Perancangan kendaraan trek atau traktor trek secara garis besar terdiri dari: sistem transmisi daya, sistem trek, rangka utama, sistem kemudi, dan badan kendaraan. Parameter perancangan terdiri dari: daya mesin dan kecepatan putar, kecepatan kendaraan teoritis, berat total kendaraan, keterbenaman (*sinkage*) kritis kendaraan, jarak roda-jalan (*road wheel*), dan pusat gravitasi kendaraan [7]. Sama halnya dengan Rahman et al. [10] dan Kheiralla et al. [7], dalam perancangan untuk menentukan dimensi trek melibatkan hubungan tekanan trek dan tekanan benam dari tanah [1].

Berdasarkan pada hasil-hasil penelitian di atas, terungkap bahwa unjuk kerja kendaraan/traktor trek sangat dipengaruhi oleh interaksi antara karakteristik tanah dan variabel dari trek, serta terdapat pengaruh timbal balik antara beberapa variabel/parameter rancangan. Oleh karena itu, penelitian ini akan membahas perancangan awal untuk traktor trek yang akan dibuat di Politeknik Manufaktur Negeri Bandung. Penelitian ini diawali oleh perancangan awal sistem trek yang berupa penentuan dimensi sistem trek, mampu-kemudi (*steerability*) kendaraan, yang dilanjutkan dengan penentuan daya-panarik (*draw bar power*), dan penentuan daya mesin, dengan menggunakan model/persamaan empiris karakteristik tanah hasil penelitian dari peneliti lain. Berdasarkan hasil perancangan awal ini, diharapkan tahap perancangan rincinya dengan mudah dapat dilakukan.

2. Perancangan Kendaraan Lapangan/Traktor Trek

Studi tentang kinerja kendaraan lapangan (*off-road*) dalam kaitannya dengan lingkungan (medan) operasi dikenal sebagai teramekanik (*terramechanics*). Oleh karena itu, teramekanik penting untuk pengembangandan perancangan kendaraan lapangan untuk misi dan medan tertentu. Isu sentral dalam teramekanik adalah hubungan kuantitatif antara kinerja dan perancangan kendaraan lapangan untuk lingkungan operasi yang diberikan [11].

Beberapa penelitian tentang unjuk kerja dan perancangan kendaraan trek telah diungkapkan dalam berbagai publikasi. Penelitian terakhir tentang unjuk kerja kendaraan trek, kebanyakan menggunakan model simulasi komputer. Gunter et al. mengembangkan model dan simulasi komputer untuk mengevaluasi stabilitas dan unjuk kerja traksi kendaraan trek, dengan menyediakan berbagai pilihan konfigurasi dan parameter sebagai data [5]. Output yang dihasilkan juga menyertakan animasinya. Rahman et al. mengembangkan model simulasi komputer untuk mempelajari parameter perancangan awal untuk kendaraan trek karet yang meliputi: lebar trek, panjang trek, tinggi dan jarak pencekram (*grouser*), diameter dan lokasi roda-penunjang (*idler*) dan sproket, diameter dan susunan roda-jalan (*road wheel*), rasio jarak (*pitch*) dan lokasi trek, serta pusat gaya gravitasi, untuk menjamin unjuk kerja traksi yang baik [9]. Hasil yang diperoleh adalah lebar trek mempengaruhi resistansi gerak eksternal kendaraan. Jarak susunan roda-jalan menjamin jumlah roda-jalan, dan mempengaruhi resistansi gerak eksternal kendaraan. Kecepatan gerak kendaraan mempengaruhi daya mesin yang dibutuhkan dan mampu-kemudi (*steerability*) kendaraan. Grisso et al. mengembangkan model empiris unjuk kerja traksi trek karet pada lahan pertanian [4]. Model matematik yang dikembangkan berbasis pada model empiris kendaraan ban (*tyre*) yang meliputi: nilai mobilitas (*mobility number*), rasio traksi kotor (*gross traktion ratio*), rasio resistansi gerak (*motion resistance ratio*), dan efisiensi traksi (*tractive efficiency*), serta indeks berat dinamis (*dynamic weight index*). Model ini dapat digunakan untuk membandingkan unjuk kerja traksi kendaraan trek dan dengan kendaraan ban.

Rahman et al. mengungkapkan kerangka perancangan (perhitungan) kendaraan trek meliputi: karakteristik mekanika lapangan, model matematik kendaraan, dan parameter perancangan [10]. Karakteristik mekanika lapangan dilakukan melalui pendekatan empiris (observasi lapangan) sehingga diperoleh parameter penting dari lapangan yang akan mempengaruhi perancangan. Model matematik kendaraan menyatakan variabel dan parameter kendaraan trek yang dinyatakan dalam persamaan hubungan ketergelinciran (*slippage*) dan sproket, serta hubungan ketergelinciran dan roda-penunjang (*idler*), persamaan traksi, hambatan-gerak, torsi sproket, mampu-kemudi (*steerability*), beban dinamis, dan kemampuan tarik. Sedangkan parameter

perancangan meliputi: parameter kendaraan (berat dan daya mesin, panjang, lebar, tinggi, dan ketinggian dari tanah) serta parameter trek (panjang, lebar, dan tinggi pencekram). Kerangka perancangan tersebut untuk kendaraan trek karet pada lahan gambut.

Kheiralla et al. membahas perancangan konseptual kendaraan trek karet yang terdiri dari perancangan (perhitungan) sistem transmisi daya, sistem trek, rangka utama, sistem kemudi, dan badan kendaraan. Parameter perancangan terdiri dari: daya mesin dan kecepatan putar, kecepatan kendaraan teoritis, berat total kendaraan, keterbenaman (*sinkage*) kritis kendaraan, jarak roda-jalan, dan pusat gravitasi kendaraan [7].

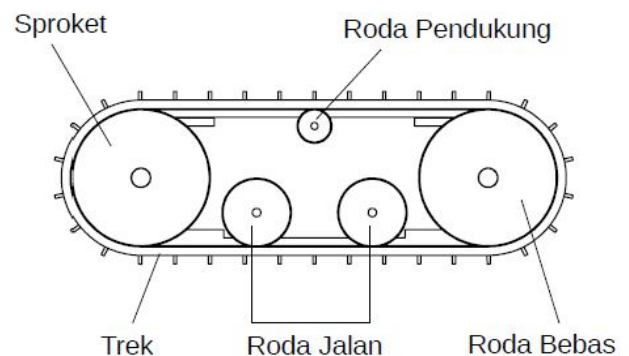
Penelitian lain yang lebih rinci tentang trek traktor adalah penelitian dari Ivantsov et al. yang dilatar belakangi oleh rendahnya kehandalan dari rantai trek di Rusia yang mudah aus [6]. Dalam penelitiannya terungkap bahwa ternyata pada perancangan rinci rantai trek tidak melibatkan ukuran dan bentuk trek sebagai variabel, tetapi sebagai besaran/parameter yang ditetapkan, yang berakibat pada tidak terwadahnya dinamika beban yang terjadi pada trek. Untuk ini diusulkan model matematik untuk perancangan rinci rantai trek yang melibatkan dinamika beban yang akan dialami. Penelitian lainnya adalah penelitian Aghazadeh & Taghavifar tentang perancangan trek untuk roda kendaraan salju dan tanah basah [1]. Sama halnya dengan Rahman et al. [10] dan Kheiralla et al. [7], dalam perancangan untuk menentukan dimensi trek melibatkan hubungan tekanan trek dan tekanan benam dari tanah.

Unjuk kerja kendaraan/traktor trek sangat dipengaruhi oleh interaksi antara karakteristik tanah dan variabel dari trek, serta terdapat pengaruh timbal balik antara beberapa variabel/parameter rancangan. Oleh karena itu, perancangan traktor-trek yang akan dibahas, tahap perancangannya akan diawali dengan perancangan awal sistem trek yang berupa perhitungan untuk penentuan dimensi trek. Oleh karena rancangan sistem trek akan secara langsung berpengaruh pada mampu-kemudi kendaraan dan unjuk kerja kendaraan, maka perancangan traktor trek juga melibatkan perhitungan / penentuan mampu-kemudi kendaraan, penentuan daya-penarik (*draw bar power*) dan penentuan daya mesin.

3. Perancangan Awal Traktor Trek

Sistem trek terdiri dari [7]: segmen trek (*segmented track*), sproket (*sprocket*), roda-

penunjang (*idler*), roda-jalan (*road wheel*), roda-pendukung (*supporting rollers*), dan per helikal (*helical spring*), seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Variabel/parameter yang termasuk sistem trek yaitu: lebar trek, jarak trek (*track pitch*), tinggi pencekram (*grouser*), diameter dan lokasi roda-pendukung, diameter dan lokasi sproket, diameter dan jarak roda-jalan, serta rasio jarak roda-jalan.



Gambar 1. Sistem trek [7].

Pada kendaraan lapangan yang dirancang untuk menghasilkan traksi, seperti traktor, unjuk kerja gaya-penarik (*drawbar*) merupakan hal yang utama. Gaya-penarik merupakan kemampuan kendaraan untuk menarik atau mendorong berbagai jenis peralatan kerja, seperti: alat pertanian dan konstruksi, serta peralatan pemindah tanah. Gaya-penarik adalah kekuatan yang tersedia, dan besarnya sama dengan selisih antara upaya-traksi (*tractive effort*) yang dihasilkan oleh sistem penggerak dan resultan gaya-hambatan (*resisting force*) yang bekerja pada kendaraan. Upaya-traksi yang dapat dihasilkan oleh trek ditentukan oleh gaya-geser dari lapangan/medan dan luas bidang kontak trek. Luas bidang kontak ditentukan oleh panjang dan lebar trek [11]. Oleh karena itu, dalam melakukan perancangan traktor trek, langkah awal yang perlu dilakukan adalah melakukan perancangan awal sistem trek traktor. Untuk itu, langkah perancangan awal traktor trek yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- (1) Menentukan kebutuhan rancangan (*design requirements*), yang meliputi: ukuran traktor, berat traktor, daya & putaran mesin.
- (2) Menentukan dimensi sistem trek, yang meliputi: lebar trek, jarak trek, diameter dan jumlah roda-jalan (*road wheel*), serta diameter sproket.
- (3) Menentukan mampu-kemudi (*steerability*) traktor.
- (4) Menentukan daya-penarik (*draw bar power*) traktor.

(5) Menentukan daya mesin (*engine*) traktor.

4. Model Matematik Perancangan Awal Traktor Trek

Pada bagian ini akan dibahas model matematik untuk melakukan perancangan awal traktor trek, yang meliputi model matematik (persamaan): dimensi sistem trek; mampu-kemudi (*steerability*) traktor; daya penarik (*draw bar power*); daya mesin (*engine*) traktor.

4.1. Model matematik dimensi sistem trek

Hubungan tekanan dan keterbenaman trek tergantung pada jenis tanah yang digunakan. Baker telah mengembangkan model hubungan tekanan dan keterbenaman trek untuk tanah yang homogen. Pada penelitian ini akan digunakan persamaan tekanan dan keterbenaman untuk jenis tanah organik, yaitu [11]:

$$p = k_p \cdot z + 4 \cdot m_m \cdot z^2 / D_h \quad (1)$$

dimana:

p tekanan, kPa.

k_p kekuatan tanah, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$.

z keterbenaman (*sinkage*), m.

m_m kekuatan permukaan (*strength of surface mat*), $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$.

D_h diameter hidrolis, $D_h = 4 \cdot (L \cdot B) / 2 \cdot (L + B)$, m.

L panjang trek, m.

B lebar trek, m.

Tekanan yang diakibatkan oleh berat kendaraan adalah sebagai berikut:

$$p = \frac{W}{2 \cdot L \cdot B} \quad (2)$$

dimana:

p tekanan, kPa.

W berat kendaraan, kN.

L panjang trek, m.

B lebar trek, m.

Substitusi persamaan (1) ke persamaan (2), menghasilkan lebar trek:

$$B = \frac{W - (4 \cdot m_m \cdot z^2 \cdot L)}{2 \cdot z \cdot (L \cdot k_p + 2 \cdot m_m \cdot z)} \quad (3)$$

dimana:

B lebar trek, m.

W berat kendaraan, kN.

L panjang trek, m.

k_p kekuatan tanah, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$.

m_m kekuatan permukaan, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$.

z keterbenaman, m.

Untuk mencapai kecepatan operasi yang tinggi biasanya digunakan trek dengan jarak yang pendek (*short track pitch*). Hal ini diperlukann untuk meminimalkan fluktuasi kecepatan dan getaran akibat pengaruh dari hubungan antara gigi sproket dan trek. Untuk mendapatkan efisiensi traksi dan gaya-penarik yang besar, rasio jarak roda-jalan (*road-wheel spacing*) dan jarak-trek (*track pitch*) adalah 2.25 [9]. Dengan demikian jarak trek adalah:

$$T_p = R_s / 2.25 \quad (4)$$

dimana:

T_p jarak-trek (*track pitch*), m.

R_s jarak roda-jalan (*road-wheel spacing*), m.

Diameter roda-jalan dapat dihitung dengan [7]:

$$D_r = R_s - G \quad (5)$$

dimana:

D_r diameter roda-jalan (*road-wheel*), m.

G jarak antar roda-jalan (*gap between consecutive road-wheel*), m.

Persamaan variasi kecepatan kendaraan dipengaruhi oleh perbandingan jarak-trek dan diameter sproket [11]:

$$\delta = 1 - \sqrt{1 - (T_p / D_s)^2} \quad (6)$$

Dengan demikian diameter sproket adalah:

$$D_s = T_p / \sqrt{1 - (1 - \delta)} \quad (7)$$

dimana:

D_s diameter sproket (*sprocket*), m.

T_p jarak-trek (*track pitch*), m.

δ fluktuasi kecepatan, %.

Jumlah roda-jalan ditentukan oleh panjang trek, diameter roda-jalan, jarak antar roda-jalan, dan diameter sproket serta diameter roda-bebas (*idler*), sehingga jumlah roda-jalan dapat ditentukan dengan persamaan berikut [7]:

$$n_r = L \cdot [(D_{spr} + D_i) / 2] / (D_r + G) \quad (8)$$

dimana:

L panjang trek, m.

n_r jumlah roda-jalan.

D_{spr} diameter sproket, m.

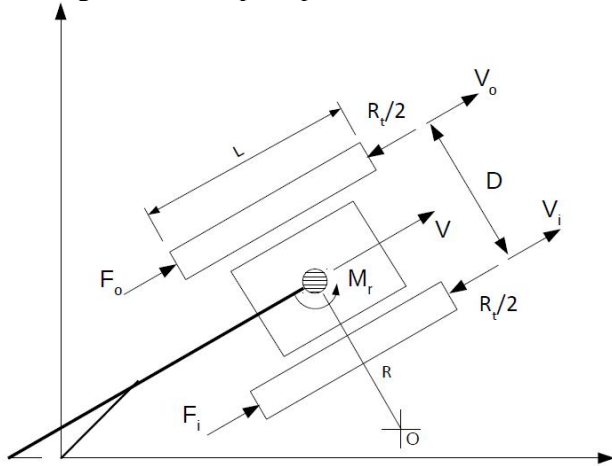
D_i diameter roda-bebas, m.

D_r diameter roda-jalan, m.

G jarak antar roda-jalan, m.

4.2. Model matematik sistem kemudi trek

Untuk membelokkan kendaraan trek, diperlukan salah satu trek bergerak lebih cepat dari yang lain, sehingga kendaraan berbelok ke arah trek yang lebih lambat. Cara berbelok seperti ini disebut kemudi-geser (*skid steering*). Prinsip kemudi-geser trek digambarkan seperti pada Gambar 2 [11].



Gambar 2. Prinsip kemudi-geser trek [11]
 Pada kecepatan rendah, gaya sentrifugal dapat diabaikan, sehingga pergerakan kendaraan trek dapat dijelaskan oleh persamaan berikut [11]:

$$m \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} = F_o + F_i - R_{tot} = 0 \tag{9}$$

$$I_z \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{B}{2} \cdot (F_o - F_i) - M_r = 0$$

dimana:

s Perpindahan dari pusat gravitasi kendaraan, m.
 t waktu, detik.

F_o gaya luar, kN.

F_i gaya dalam, kN.

R_t gaya hambatan-gerak lateral total, kN.

θ perpindahan radial dari pusat gravitasi kendaraan, rad.

D jarak antar trek kendaraan, m.

M_r momen hambatan putar, kN.m.

f_r koefisien hambatan-gerak.

W berat total kendaraan, kN.

Persamaan kesimbangan gaya dan momen yang terjadi adalah (Wong, 2001):

$$F_o + F_i - R_t = 0$$

$$\frac{D}{2} \cdot (F_o - F_i) - M_r = 0 \tag{10}$$

dimana:

$$R_t = f_r \cdot W$$

$$M_r = \frac{D}{2} \cdot (F_o - F_i)$$

Berdasarkan persamaan (10), diperoleh gaya luar dan gaya dalam trek berikut:

$$F_o = \frac{f_r \cdot W}{2} + \frac{M_r}{D} \tag{11}$$

$$F_i = \frac{f_r \cdot W}{2} - \frac{M_r}{D}$$

Untuk tekanan normal sepanjang trek yang terdistribusi secara merata, gaya hambatan-gerak lateral adalah:

$$R_t = \mu_t \cdot W \tag{12}$$

dimana:

R_t gaya hambatan-gerak lateral total, kN.

μ_t koefisien hambatan lateral.

W berat total kendaraan, kN.

Momen hambatan putar adalah:

$$M_r = \frac{R_t \cdot L}{2 \cdot 2}$$

$$= \frac{\mu_t \cdot W}{2} \cdot \frac{L}{2} \tag{13}$$

$$= \frac{\mu_t \cdot W \cdot L}{4}$$

dimana:

M_r momen hambatan putar, kN.m.

R_t gaya hambatan-gerak lateral total, N.

L panjang kontak trek, m.

μ_t koefisien hambatan lateral.

W berat total kendaraan, kN.

Substitusi persamaan (13) ke persamaan (10), diperoleh:

$$F_o = \frac{f_r \cdot W}{2} + \frac{\mu_t \cdot W \cdot L}{4 \cdot D} \tag{14}$$

$$F_i = \frac{f_r \cdot W}{2} - \frac{\mu_t \cdot W \cdot L}{4 \cdot D}$$

Kendaraan trek akan terkendali di lapangan/medan tertentu tanpa terputar apabila [11]:

$$F_o \leq F_i = A \cdot \tau$$

$$\leq A \cdot (c + p \cdot \tan \phi)$$

dimana:

F_o gaya luar, kN.

A luas trek bagian luar, m².

c kepadatan (*cohesiveness*) tanah, kN.m⁻².

ϕ sudut tahanan geser internal (*angle of internal shearing resistance*) tanah, derajat.

p tekanan normal rata-rata trek pada tanah, kN.m^{-2} .

ϕ sudut tahanan geser internal (*angle of internal shearing resistance*) tanah, derajat.

Substitusi persamaan (14) pada persamaan (15) menghasilkan:

$$\frac{f_r \cdot W}{2} + \frac{\mu_t \cdot W \cdot L}{4 \cdot D} \leq A \cdot (c + p \cdot \tan \phi) \quad (15)$$

$$\frac{L}{D} \leq \frac{2}{\mu_t} \cdot \left(\frac{2 \cdot c \cdot A}{W} + \tan \phi - f_r \right)$$

dimana:

L panjang kontak trek, m.

D jarak antar trek kendaraan, m.

μ_t koefisien hambatan lateral.

W berat total kendaraan, kN.

A luas trek bagian luar, m^2 .

c kepadatan (*cohesiveness*) tanah, kN.m^{-2} .

ϕ sudut tahanan geser internal (*angle of internal shearing resistance*) tanah, derajat.

p tekanan normal rata-rata trek pada tanah, kN.m^{-2} .

ϕ sudut tahanan geser internal (*angle of internal shearing resistance*) tanah, derajat.

Dengan demikian, kendaraan trek dapat berbelok tanpa terputar (*spinning*), jika perbandingan berikut terpenuhi:

$$\frac{L}{D} < \frac{2}{\mu_t} \cdot \left(\frac{c}{p} + \tan \phi - f_r \right) \quad (16)$$

dimana:

p tekanan normal rata-rata trek pada tanah

$p = W / 2 \cdot L \cdot B$, kN.m^{-2} .

4.3. Model matematik daya-panarik (*draw bar power*)

Gaya-panarik (*draw bar pull*) adalah selisih antara upaya-traksi (*tractive effort*) dan gaya hambatan-gerak (*motion resistant*). Pada penelitian ini upaya-traksi yang dibahas adalah upaya-traksi oleh trek pada tanah serta upaya-traksi oleh sisi trek pada tanah; hambatan-gerak yang dibahas adalah hambatan-gerak karena pemadatan tanah, hambatan-gerak tanah di depan trek (*bulldozing resistance*), dan hambatan-gerak karena gesekan internal sistem trek.

Gaya hambatan-gerak (*motion resistance*) oleh karena pemadatan tanah adalah [11]:

$$R_c = 2 \cdot B \cdot \int_0^z p \cdot dz \quad (17)$$

dimana:

B lebar trek, m.

p tekanan, kPa.

z keterbenaman, m.

Dengan demikian, gaya hambatan-gerak (*motion resistance*) oleh karena pemadatan tanah pada tanah organik adalah:

$$R_c = 2 \cdot B \cdot [(k_p \cdot z^2) / 2 + (4 \cdot m_m \cdot z^3) / (3 \cdot D_h)] \quad (18)$$

dimana:

R_c gaya hambatan-gerak karena pemadatan tanah, kN.

B lebar trek, m.

k_p kekuatan tanah, kN.m^{-3} .

m_m kekuatan permukaan, kN.m^{-3} .

z keterbenaman, m.

D_h diameter hidrolik,

$D_h = 4 \cdot (L \cdot B) / 2 \cdot (L + B)$, m.

Untuk tanah yang lunak, dimana keterbenaman sangat berpengaruh, Bekker menyatakan bahwa hambatan tanah di depan trek (*bulldozing resistance*) harus diperhitungkan/ditambahkan pada hambatan pemadatan tanah [11]. Besarnya gaya hambatan-gerak tanah adalah:

$$R_p = 2 \cdot B \cdot \int_0^{h_b} \sigma_p \cdot dz \quad (19)$$

dimana:

R_p gaya hambatan-gerak karena hambatan tanah di depan trek, kN.

B lebar trek, m.

σ_p tekanan pasif tanah, kN.m^{-2} .

h_b kedalaman hambatan trek, m.

Tekanan pasif tanah adalah [11]:

$$\sigma_p = \gamma \cdot z \cdot \tan^2(45^\circ + \phi / 2) + 2 \cdot c \cdot \tan(45^\circ + \phi / 2) \quad (20)$$

dimana:

γ berat-jenis tanah, kNm^{-3} .

z keterbenaman, m.

ϕ sudut tahanan geser internal (*angle of internal shearing resistance*) tanah, derajat.

c kepadatan (*cohesiveness*) tanah, kN.m^{-2} .

Substitusi persamaan (20) pada persamaa (19), menghasilkan:

$$R_p = 2.B.[\gamma.h_b^2.\tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2.c.h_b.\tan(45^\circ + \phi/2)] \quad (21)$$

dimana:

R_p gaya hambatan-gerak karena hambatan tanah di depan trek, kN.

B lebar trek, m.

γ berat-jenis tanah, kNm^{-3} .

h_b kedalaman hambatan trek, m.

ϕ sudut tahanan geser internal tanah, derajat.

c kepadatan (*cohesiveness*) tanah, kN.m^{-2} .

Selain karena tanah, kendaraan trek mengalami gaya hambatan-gerak karena gesekan internal sistem trek. Untuk kendaraan trek, Bekker menggunakan persamaan gaya hambatan-gerak karena gesekan internal adalah [11]:

$$R_{in} = W.(222 + 3.V) \quad (22)$$

dimana:

R_{in} gaya hambatan-gerak karena gesekan internal sistem trek, N.

W berat kendaraan, ton.

V kecepatan kendaraan, km.jam^{-1} .

Gaya hambatan-gerak total kendaraan trek adalah:

$$R_{tm} = R_c + R_p + R_{in} \quad (23)$$

dimana:

R_{tm} gaya hambatan-gerak total, kN.

R_c gaya hambatan-gerak karena pemadatan tanah, kN.

R_p gaya hambatan-gerak karena hambatan tanah di depan trek, kN.

R_{in} gaya hambatan-gerak karena gesekan internal sistem trek, kN.

Untuk tanah organik, perilaku pergeseran (*shearing*) tanah adalah [11]:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot (j/K_\omega) \cdot \exp(1 - j/K_\omega) = (c + \sigma \cdot \tan \phi) \cdot (j/K_\omega) \quad (24)$$

$$\exp(1 - j/K_\omega)$$

dimana:

τ kekuatan geser (*shear strength*) tanah, KPa.

τ_{\max} kekuatan geser maksimum tanah, KPa.

j pergeseran (*shear displacement*) tanah, m.

K_ω pergeseran pada tegangan geser maksimum tanah, m.

c kepadatan tanah, kN.m^{-2} .

σ tegangan normal (*normal stress*) tanah, KPa.

ϕ sudut tahanan geser internal (*angle of internal shearing resistance*) tanah, derajat.

Upaya-traksi (*tractive effort*) adalah [11]:

$$F = 2.B.\int_0^l \tau \cdot dx \quad (25)$$

dimana:

F upaya-traksi (*tractive effort*), kN.

B lebar trek, m.

τ tegangan geser tanah, KPa.

Substitusi persamaan (24) ke persamaan (25) menghasilkan upaya-traksi (*tractive effort*) oleh trek pada tanah organik adalah:

$$F_b = 2.B.L.(c + \sigma \cdot \tan \phi) \cdot \left[\frac{e^1 \cdot K_\omega}{i.L} - \left(1 + \frac{K_\omega}{i.L} \right) \cdot \exp\left(1 - \frac{i.L}{K_\omega} \right) \right] \quad (26)$$

dimana:

F_b upaya-traksi (*tractive effort*) oleh trek pada tanah, kN.

B lebar trek, m.

L panjang trek, m.

c kepadatan tanah, kN.m^{-2} .

σ tegangan normal (*normal stress*) tanah, KPa.

ϕ sudut tahanan geser internal tanah, derajat.

i pergeseran (*shear displacement*), m.

K_ω pergeseran pada tegangan geser maksimum, m.

Untuk trek dengan pencekram (*grouser*) yang tinggi, terdapat dorongan (*thrust*) oleh karena gaya geser permukaan vertikal pada sisi trek [11].

Upaya-traksi yang terjadi pada sisi trek adalah:

$$F_s = 4.H.L.(c + \sigma \cdot \tan \phi) \cdot \cos \alpha \cdot \left[\frac{e^1 \cdot K_\omega}{i.L} - \left(1 + \frac{K_\omega}{i.L} \right) \cdot \exp\left(1 - \frac{i.L}{K_\omega} \right) \right] \quad (27)$$

dimana:

$$\alpha = \arctan[\cot(H/B)]$$

F_s upaya-traksi (*tractive effort*) oleh sisi trek pada tanah, kN.

H tinggi pencekram trek, m.

B lebar trek, m.

L panjang trek, m.

c kepadatan tanah, kN.m^{-2} .

σ tegangan normal (*normal stress*) tanah, KPa.

ϕ sudut tahanan geser internal tanah, derajat.

i pergeseran (*shear displacement*), m.

K_{ω} pergeseran pada tegangan geser maksimum, m.

Upaya-traksi total adalah:

$$F_t = F_b + F_s \quad (28)$$

dimana:

F_t upaya-traksi total, kN.

F_b upaya-traksi oleh trek pada tanah, kN.

F_s upaya-traksi oleh sisi trek pada tanah, kN.

Gaya-penarik (*drawbar pull*) adalah:

$$D_p = F_t - R_m \quad (29)$$

dimana:

D_p gaya-penarik (*drawbar pull*), kN.

F_t upaya-traksirak (*tractive effort*) total, kN.

R_m gaya hambatan-gerak (*motion resistance*) total, kN

Hubungan kecepatan aktual dan kecepatan teoritis traktor dapat dinyatakan sebagai [11]:

$$V_a = (1 - i).V_t \quad (30)$$

dimana:

V_a kecepatan aktual, km.jam⁻¹.

V_t kecepatan teoritik, km.jam⁻¹.

i proporsi slip.

Memfaatkan hasil perhitungan gaya-penarik, maka daya-penarik (*drawbar power*) adalah perkalian antara gaya-penarik dan kecepatan aktual kendaraan[10]:

$$P_d = D_p.V_a \quad (31)$$

dimana:

P_d daya-penarik (*drawbar power*),

D_p gaya-penarik (*drawbar pull*), kN.

V_a kecepatan aktual, km.jam⁻¹.

4.4. Model matematik daya mesin

Untuk menentukan daya mesin yang diperlukan dilakukan dengan memanfaatkan hasil perhitungan gaya traksi (upaya-traksi) dan kecepatan kendaraan. Sama halnya dengan [10], maka persamaan daya mesin adalah:

$$P_e = F_t.V_t \quad (32)$$

dimana:

F_t upaya-traksirak total, kN.

V_t kecepatan teoritik, km.jam⁻¹.

Efisiensi traksi digunakan untuk mendapatkan efisiensi kendaraan trek dalam mengubah daya mesin ke daya yang tersedia di penarik (*drawbar*). Efisiensi traksi dihitung dengan [7]:

$$\eta_d = \frac{P_d}{P_e}.100\% \quad (33)$$

dimana:

η_d Efisiensi Traksi

P_e Engine power, kW.

P_d Drawbar power, kN.

5. Perancangan Awal Traktor-Trek-Mini

Kebutuhan rancangan (*design requirements*) traktor-trek Politeknik Manufaktur Negeri Bandung adalah [2]:

Panjang x lebar kendaraan maksimum : 2200 x 1500 mm.

Gaya dorong maksimum: 400 kg.

Berat maksimum : 500 kg.

Kecepatan minimum : 5 km/jam.

Parameter tanah untuk lahan gambut sebagaimana telah dilakukan eksperimen oleh Rahman, et al. [9] adalah sebagai berikut

Parameter Tanah				
Parameter	Simbol	Nilai	Unit	Referensi
Moisture Content	ω	83.510	%	
		0.835		[9]
Peat Bulk Density	γ	1.530	kN/m ³	[9]
Cohession	C	1.360	kN/m ²	[9]
Internal Frictional Angle	ϕ	23.780	degree	[9]
Shear Deformation Modulus	K_{ω}	0.012	M	[9]
	M_m	27.070	kN/m ³	[9]
Underlying Peat Stiffness		224.380	kN/m ³	[9]

Sedangkan untuk spesifikasi kendaraan adalah sebagai berikut :

Spesifikasi Kendaraan				
Parameter	Simbol	Nilai	Unit	Referensi
Weighth	W	500.0	Kg	-
		4.905	kN	-
Vehicle Theoretical	V_t	10.0	km/h	-

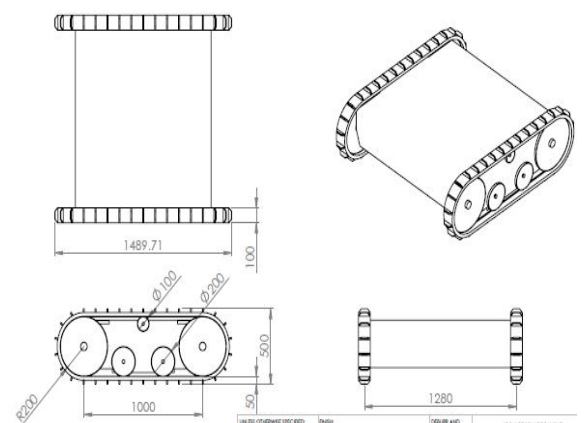
Speed				
Contact Track Length	L	1.0	M	-
Critical Sinkage	z	0.100	M	-
Road Wheel Spacing	R_s	0.249	M	[11]
Speed Fluctuation	δ	3.235	%	[11]
		0.032		
Slippage	i	27.500	%	[9]
		0.275		
Gap	G	0.050	M	[7]
Lateral Friction Coeff.	μ_t	0.990		[11]
Grouser Height	H	0.060	M	[9]
	f_r	0.100		-

Berikut hasil perhitungan desain awal traktor-trek untuk digunakan pada lahan gambut:

Sistem Trek	Simbol	Nilai	Unit	Ket.
Track Width	B	0.1	m	Pers. (3)
Track Pitch	T_p	0.1	m	Pers. (4)
Road Wheel Diameter	D_r	0.20	m	Pers. (5)
Sprocket Diameter	D_{spr}	0.4	m	Pers. (7)
Rear Sprocket Diameter	D_{spr}	0.4	m	= Diameter sproket
Front Idler Diameter	D_{fi}	0.40	m	= Diameter sproket
Number of Road Wheel	n_r	2	unit	Pers. (8)
Sistem Kemudi-geser Trek				
Outer Force	F_o	1.191	kN	
Inner Force	F_i	-2.872	kN	
Length And Distance Ratio for Grass	L / D	<0.78		Pers. (16)
Minimum Track Distance	D	1.28	m	
Daya-Penarik (Draw bar power)				
Daya Hambatan-Gerak				
Hydraulic Diameter	D_h	0.15	m	
Motion Resistance due to Terrain Compaction	R_c	0.221	kN	Pers. (18)
Motion Resistance due to Frictional Losses	R_{in}	0.001	kN	Pers. (22)
Motion Resistance of bulldozing Effect	R_p	0.040	kN	Pers. (21)

Total Motion Resistance	R_{tm}	0.262	kN	Pers. (23)
Gaya upaya-traksi				
Alpha	α	0.830		
Ground Tractive Effort	F_b	0.280	kN	Pers. (26)
Side Tractive Effort	F_s	0.280	kN	Pers. (27)
Total Tractive Effort	F_t	0.560	kN	Pers. (28)
Daya				
Draw Bar Pull	D_p	0.299	kN	Pers. (29)
		30.439	kg	
Actual Speed	V_a	7.250	km/h	Pers. (30)
Draw Bar Power	P_d	0.601	kW	Pers. (31)
		0.806	HP	
Daya Mesin				
Theoretical Engine Power	P_e	1.556	kW	Pers. (32)
		2.087	HP	
Theoretical Tractive Efficiency	μ_d	38.644	%	Pers. (33)

Dari hasil perhitungan di atas, kebutuhan rancangan traktor-trek-mini yang dioperasikan pada lahan organik dapat dipenuhi. Panjang trek yang kontak dengan tanah 1000 mm, lebar trek 10 mm, diameter sproket 400 mm, jarak minimum antar trek 1280 mm, kecepatan kendaraan 7.25 km/jam, gaya-dorong yang dihasilkan sebesar 30 kg. Sketsa perancangan awal traktor-trek-mini diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa perancangan awal traktor-trek-mini Politeknik Manufaktur Negeri Bandung.

6. Kesimpulan

Oleh karena dimensi sistem trek berkaitan karakteristik tanah dan berpengaruh terhadap besaran rancangan lainnya, perancangan awal sistem trek perlu ditentukan di awal. Untuk traktor-trek-mini Politeknik Manufaktur Bandung yang dioperasikan pada tanah organik dengan bobot 500 kg, panjang trek yang kontak dengan tanah 1000 mm, maka lebar trek 10 mm, diameter sproket 400 mm, jarak minimum antar trek 1280 mm, kecepatan kendaraan 7.25 km/jam, gaya-dorong yang dihasilkan sebesar 30 kg, dan daya mesin sebesar 2 HP.

Daftar Pustaka

- [1] Aghazadeh, N. & Taghavifar, H., 2015, Study on track wheeled vehicle designing for off-road operations on snowy and wet terrains, *Cercetari Agronomice in Moldova*, Vol. XLVIII, No. 4 (164).
- [2] Berteloot, T., 2016, Mini Heavy Duty Vehicle, *Internship Report Professional Bachelor University Valenciennes*, Politeknik Manufaktur Negeri Bandung.
- [3] Challenger, 2016, *Track Advantage*, www.challenger-ag.com, Accessed 18 April 2016.
- [4] Grisso, R., Perumpral, J., Zoz, F., 2006, An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils, *Journal of Terramechanics*, 43: 225-236.
- [5] Gunter, D. D., Bylisma, W. W., Edgar, K., Letherwood, M. D., Gorsich, D. J., 2005, Using modeling and simulation to evaluate stability and traction performance of a track laying robotic vehicle, *US Army TACOM*, 04 January.
- [6] Ivantsov, V., Ivantsov, A., Ivantsov, S., 2009, Special features of dynamic design of a tractor track, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 16, No. 1: 203-207.
- [7] Kheiralla, A.F., Alseed, Y.G., Eltigani, A. & Yousif, E.A., 2012, Conceptual design of rubber tracked mini-vehicle for small holders using off-road vehicle engineering techniques, *Proceedings ICTIME'2012*, March 24-25, Dubai: 151-160.
- [8] Macmillan, R.H., 2002, *The mechanics of tractor-implement performance*, International Development Technology Centre, University of Melbourne.
- [9] Rahman, A., Yahya, A., Zohadie, M., Ishak, W., Ahmad, D., 2005a, Design parameters optimization simulation of a prototype segmented rubber track vehicle for Sepang peat in Malaysia, *American Journal of Applied Sciences*, 2(3): 655-671.
- [10] Rahman, Yahya, A., Zohadie, M., Ahmad, D., Ishak, W., 2005b, Design framework of
- [11] Wong, J. Y., 2001, *Theory of Ground Vehicle*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [12] Yu, 2004, The tractive performance of a friction-based prototype track, *Doctoral Dissertation*, University of Pretoria