

Getaran Batang *Subsoiler* Akibat Gangguan Alami dari Variasi Gaya Potong Tanah

Soeharsono¹, Radite P. A. Setiawan², Tineke Mandang³

¹Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti, Jakarta

Email: gatotsoeharsono@yahoo.com

^{2,3} Departemen Teknik Pertanian, FATETA, Institut Pertanian Bogor

Email: iwan_radite@yahoo.com

ABSTRAK

Studi analitis dan eksperimental terhadap penggetaran *tillage tools* dengan cara memberikan energi mekanis ke *tillage tools* telah banyak dilakukan. Walaupun metode ini berhasil menurunkan tahanan tanah secara signifikan, namun penggunaannya berakibat pada kenaikan konsumsi energi secara berlebihan. Penggetaran dengan cara menggunakan metode eksitasi sendiri pada *subsoiler* getar juga telah banyak dilakukan secara eksperimental. Penggetaran dengan cara ini berhasil menurunkan tahanan tanah. Namun, penurunannya tidak sebesar yang dicapai dengan cara sebelumnya. Kendati demikian, studi analitis terhadap penggetaran dengan cara yang kedua ini belum pernah dilakukan. Oleh sebab itu, pada makalah ini akan dibahas tentang penurunan persamaan matematik dari getaran *subsoiler shank* akibat gangguan alami yang timbul karena variasi gaya potong tanah. Getaran *subsoiler shank* dimodelkan sebagai getaran dari sistem getaran dengan satu derajat kebebasan. Sedangkan gangguan alami dimodelkan sebagai fungsi periodik. Selain itu pengaruh elastisitas pegas terhadap besar simpangan maksimum dari getaran *subsoiler shank* juga dibahas pada makalah ini. Berdasarkan persamaan matematik yang telah diturunkan, diungkapkan bahwa pada frekuensi resonansi, *subsoiler shank* akan bergetar hebat sehingga diharapkan mampu menurunkan tahanan dan gaya potong yang diperlukan untuk membongkar kepadatan tanah, secara signifikan.

Kata kunci: *Self excited, vibration, subsoiler shank*, tahanan tanah, elastisitas pegas

ABSTRACT

Analytical and experiment study on vibratory tillage tools by adding an external energy to the tillage tools has been widely applied. This method would significantly reduce soil's resistance; unfortunately it uses a lot of energy. Self excited vibration phenomenon on vibrating subsoiler has also been shown experimentally reduce soil's resistance though not as much as the former. However no analytical study of the latter method can be found. This paper present mathematical derivation of shank-subsoiler's vibration due to natural excitation of varied cutting forces. Shank-subsoiler was modeled as a single degree of freedom; while the natural excitation of varied cutting force was modeled as a periodic function. This paper also discusses the effect of spring's elasticity to maximum displacement of the tillage-tools. Therefore, the possibility of decreasing the soil-cutting force for loosening soil's density due to self excited vibration significantly is visualized.

Keywords: *Self Exited, Vibration, Shank-subsoiler, soil's resistance, spring's elasticity.*

PENDAHULUAN

Penggetaran pahat bajak (*tillage tools*) yang digunakan untuk membajak tanah telah terbukti dapat menurunkan besar gaya potong tanah, khususnya bila perbandingan antara kecepatan getar maksimum pahat bajak dengan kecepatan maju traktor penarik pahat bajak lebih besar dari satu. Perbandingan ini disebut dengan rasio kecepatan. Selain itu, dengan rasio tersebut, kondisi

tanah menjadi lebih gembur. Sehingga akibat banyaknya retakan pada tanah, penetrasi akar tumbuhan, nutrisi, air dan sirkulasi udara di dalam tanah menjadi lebih mudah [1]. Keadaan tanah seperti ini sangat diperlukan untuk pertumbuhan tanaman.

Ada dua cara dalam penggetaran pahat bajak. Cara pertama yaitu dengan memberi energi mekanis untuk menghasilkan gerakan osilasi pahat. Sedangkan cara kedua yaitu dengan memanfaatkan

bagian elastis dari *tillage tools* yang dikombinasikan dengan variasi gaya potong tanah yang bertujuan untuk menghasilkan getaran eksitasi sendiri. Cara yang pertama berhasil menurunkan gaya potong tanah secara signifikan, namun disertai dengan kenaikan konsumsi energi yang berlebihan. Kenaikan konsumsi energi ini disebabkan karena energi yang diperlukan untuk menggerakkan inersia dari pahat bajak dan mekanismenya, cukup besar

Radite *et.al.* [2] telah menurunkan persamaan matematik dari mekanisme togel dari bajak getar yang meliputi analisis kinematik dan analisis dinamik. Dengan konfigurasi yang spesifik, Radite mendapatkan penurunan gaya tarik (*draft*) yang diperlukan guna membongkar kepadatan tanah sekitar 30 % hingga 60 % pada rasio kecepatan sekitar 4.

Bandalan *et al.* [3] telah melakukan studi eksperimental yang bertujuan untuk membongkar lapisan tanah padat/kepad (*hardpan*) dengan cara mengosilasikan batang bajak tanah lapisan dalam (*subsoiler shank*) secara harmonis pada kedalaman *subsoiling* sekitar 0.46m. Hasil terbaik tercatat pada ratio kecepatan sekitar 3.2 dengan *draft ratio* (perbandingan antara gaya potong tanah dengan penggetaran *tillage tools* dengan gaya potong tanah tanpa penggetaran) sekitar 0.33, dan dengan *power ratio* (perbandingan antara konsumsi energi dengan penggetaran *tillage tools* dengan konsumsi energi tanpa penggetaran *tillage tools* sekitar 1.24.

Niyamapa *et al* [4][5] mengungkapkan pengaruh frekuensi dan amplitudo gerak osilasi batang pahat terhadap gaya potong tanah. Pengaruh ini dikaji pada variasi *velocity ratio* lebih besar dari satu. Pada makalah diungkapkan bahwa *draft ratio* dan *power ratio* yang diperoleh masing-masing sekitar 63 % hingga 93 % dan sekitar 41 % hingga 51 %.

Penurunan persamaan matematik dari penggetaran *tillage tool* gerak osilasi telah dilakukan oleh Butson *et. al* [6][7] dan Kofoed S. S. [8]. Untuk menurunkan persamaan matematik ini dilakukan analisis kinematik, *draft ratio* dan *power ratio*. Hasil penurunan ini selanjutnya diuji secara eksperimental. Karena sifat fisis tanah yang berubah-ubah, maka baik *draft ratio* maupun *power ratio* yang diperoleh dari penurunan persamaan matematik berbeda secara signifikan dengan hasil pengujian eksperimental.

Studi eksperimental terhadap fenomena getaran eksitasi sendiri pada operasi pembajakan (*tillage*) telah dilakukan oleh Bernsten *et.al.* [9] dengan menggunakan pahat bajak pipih dan kaku (*rigid tines*) dan pahat bajak pipih dan fleksibel (*flexible tines*). Penelitian dilakukan pada kondisi tanah lempung (*loam soil*) sehabis dibajak (*tilled soil*) dan pada kondisi padat (*no-tilled soil*). Pengorasiannya

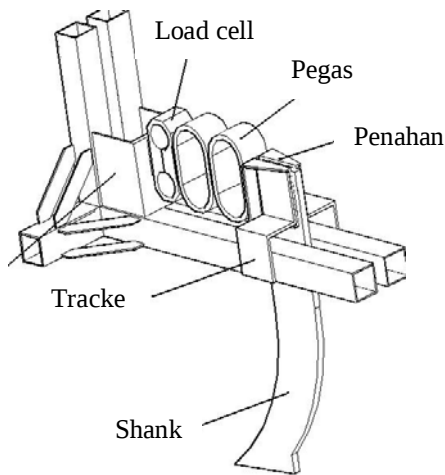
dilakukan dengan kecepatan 1 m/s dan 2 m/s. Sedang kedalaman pemotongan dilakukan pada 0.06 m dan 0.12 m. Jika dioperasikan pada *no-tilled soil*, Bernsten mencatat penurunan gaya potong tanah pada *flexible tines* sebesar 20 % hingga 28% jika dibandingkan dengan gaya potong tanah yang diperlukan oleh *rigid tine*. Namun jika dioperasikan pada *tilled soil*, terjadi hal sebaliknya yaitu *rigid tine* memberikan *draft* lebih rendah dibandingkan dengan *draft* yang dicatat oleh *flexible tines*. Tetapi bila fleksibilitas dari *flexible tines* dibuat semakin tinggi maka *draft* yang dihasilkan oleh *flexible tines* akan lebih rendah dibandingkan dengan *draft* yang dihasilkan oleh *rigid tine*.

Qiu Lichun dan Li Baofa [10] telah membuat penurunan matematik fenomena *self excited vibration* saat pembajakan tanah. Meskipun ada kesalahan pada penurunan matematik yang dibuat, namun dalam pengujian eksperimental diungkapkan ada penurunan gaya potong tanah sekitar 10.8 % Pada makalah ini akan dibuat penurunan matematik dari getaran pahat bajak pada fenomena *self excited vibration*. Pembahasan meliputi penurunan persamaan diferensial dari getaran *subsoiler shank* dan model dinamis dari getaran pahat bajak. Gangguan alami akibat variasi gaya potong tanah dimodelkan sebagai fungsi periodik yang didasarkan atas data kualitatif dari hasil uji tekan tanah tanpa batas (*unconfine test*) yang dilakukan di Laboratorium Fisika Tanah IPB. Respon getaran dari *subsoiler shank* dicari dengan menggunakan metode deret Fourier. Selanjutnya dibahas pula tentang pengaruh elastisitas pegas terhadap defleksi *tillage tools* Dengan demikian akan didapatkan gambaran tentang kemungkinan penurunan gaya potong tanah akibat fenomena *self excited vibration*.

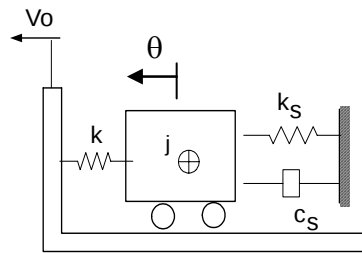
METODE PENELITIAN

Persamaan gerak getaran *subsoiler shank*

Elemen penyusun dari *tillage-implement* ditunjukkan pada Gambar 1a [11], yang terdiri atas struktur penarik pahat bajak (*implement*), *load cell*, pegas ring ganda dan *subsoiler shank*. Model fisik dari getaran *subsoiler shank* selama operasi ditunjukkan pada Gambar 1b. Dalam hal ini kekakuan dari bagian elastis *tillage tools* yang terdiri atas *load cell* dan pegas ring ganda dimodelkan sebagai pegas k . Sedang inersia dari *tillage tools* terhadap pusat getarnya dimodelkan sebagai inersia j . Karena konstruksinya dibuat kaku dari bahan baja, maka peredaman struktur diabaikan. Karena sifat tanah yang viskoelastis, maka parameter yang berpengaruh terhadap besarnya tahanan tanah dimodelkan sebagai peredaman tanah c_s dan kekakuan tanah k_s . Kecepatan maju dari *tillage-implement* dimodelkan sebagai V_0



(a)



(b)

Gambar 1. a Subsoiler Getar Satu Derajat Kebebasan b. Sistem Getar

Bila derajat kebebasan dari *tillage tools* dinyatakan dalam θ dan d adalah jarak antara $f(t)$ dengan pusat getar sedangkan kecepatan maju dari *implement* adalah v_0 , maka persamaan diferensial dari getaran *tillage tools* dinyatakan sebagai :

$$J\ddot{\theta} + k\theta = d \cdot f(t) = c_s d(v_0 + d\dot{\theta}) + k_s d(v_0 t + d\theta) \quad (1)$$

Pada saat *implement* bergerak maju, ujung pahat akan menekan tanah sehingga tahanan tanah $f(t)$ akan meningkat membuat pahat atau bagian elastis dari batang pahat terdefleksi sedangkan energinya disimpan dalam bentuk energi potensial. Pada saat $f(t)$ melebihi kekuatan tanah maka tanah akan terbongkar sehingga tahanan tanah $f(t)$ menjadi jauh berkurang selanjutnya batang pahat berosilasi sesuai dengan fenomena *self excited vibration*. Jelaslah bahwa tahanan tanah $f(t)$ selama operasi merupakan fungsi periodik dengan perioda T sehingga dapat dinyatakan dalam bentuk deret fourier sebagai berikut [12]:

$$f_t = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)\}, \quad \omega = 2\pi/T \quad (2)$$

dimana:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f_t dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f_t \cos(n\omega t) dt \quad \text{dan} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f_t \sin(n\omega t) dt \quad (3)$$

Jik $\omega_n^2 = k/j$, maka persamaan 1, 2 dan 3 akan memberikan respons getar dalam bentuk sudut $\theta(t)$ yang dalam kondisi *steady* dinyatakan sebagai [13]:

$$\theta(t) = \frac{d \cdot a_0}{2k} + \sum_{n=1}^{\infty} d \cdot \frac{a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)}{k \cdot \{1 - (n\omega/\omega_n)^2\}} \quad (4)$$

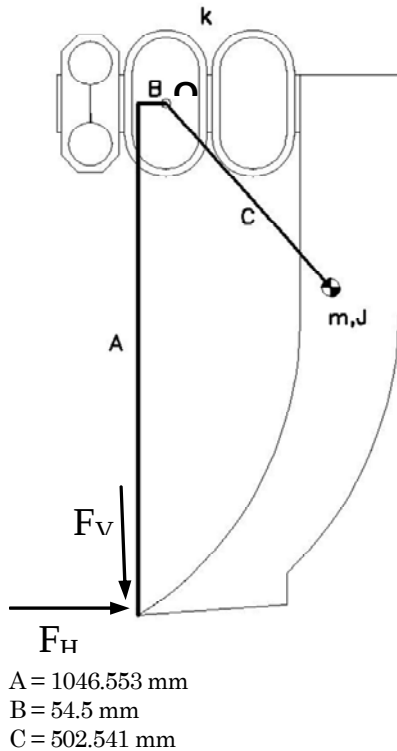
Pemodelan Dinamik Getaran Subsoiler

Pemodelan dinamik getaran batang *subsoiler* meliputi penentuan parameter getar yaitu menentukan nilai numerik dari kekakuan sistem getar serta memodelkan beban $f(t)$ akibat adanya gangguan secara alami.

Model getaran subsoiler pada Gambar 2 mempunyai parameter sistem dengan harga sebagai berikut: Kekakuan pegas $k = 495E+03$ Nm/rad. dengan inersia j terhadap pusat getar sebesar $= 22.9$ kg.m². Berdasarkan harga parameter ini, selanjutnya dapat ditentukan harga frekuensi pribadi $\omega_n = 147.03$ rad/dt atau $f_n = 23.4$ Hz

Gaya $f(t)$ berupa fungsi periodik ditunjukkan pada Gambar 3. Setiap siklus gaya dibagi menjadi empat tahap. Dari titik 1 ke titik 2, pahat bergerak maju melewati tanah yang telah terbongkar selanjutnya dari titik 2 ke titik 3 pahat bergerak maju membongkar tanah padat. Dari titik 3 ke titik 4 selanjutnya ke titik 5 pahat dalam kondisi bergerak mundur melalui tanah yang telah terbongkar. Besaran gaya untuk setiap tahap didasarkan pada hasil pengujian *unconfined test* yang dilakukan di Laboratorium Fisika Tanah Fateta IPB. Dari *unconfined test* didapatkan data kualitatif sebagai berikut:

- o Untuk tanah dengan kepadatan rendah yang setara dengan tanah yang telah terbongkar, gaya $f(t)$ sangat rendah dan besarnya konstan.
- o Untuk tanah padat, gaya $f(t)$ mempunyai tendensi berupa fungsi polinomial berderajat tiga terhadap waktu t .

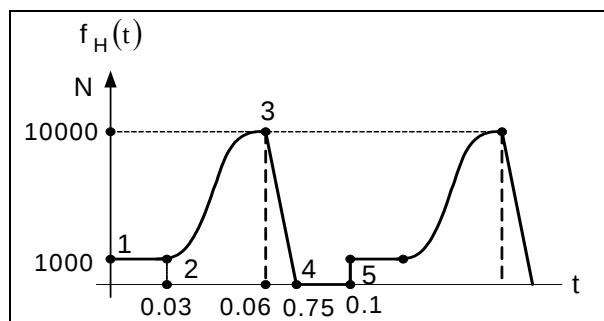


Gambar 2. Model Getar Subsoiler ke 1

Besar gaya F_{mak} dicari dengan menggunakan model Gill [14]. Untuk *subsoiling* dengan kedalaman potong 0.4 m, gaya F_{mak} dalam arah horisontal besarnya sekitar 10000 N. Di ujung pahat bekerja dua gaya yaitu gaya pada arah horisontal dan vertikal yang besarnya diambil 25 % terhadap gaya pada arah horisontal. Untuk perioda gaya sebesar 0.1 detik, maka gaya $f(t)$ dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} f_H(t) &= 1000 \text{ N} & 0 < t < 0.03 \\ &= -187.5 t^3 + 4E06 t^2 - 6E04 t - 800 & 0.03 < t < 0.06 \\ &= -6.67E05 t + 5E04 & 0.06 < t < 0.075 \\ &= 0 & 0.075 < t < 0.1 \end{aligned} \quad (5a)$$

$$F_V(t) = 0.25 f_H(t) \quad (5b)$$



Gambar 3. Grafik Gaya Potong Tanah sebagai Fungsi dari Waktu

Gangguan alami yang berpotensi dalam menggetarkan batang *subsoiler* berupa momen dari $f(t)$

terhadap pusat getar yaitu $M_I(t) = Bx f_H(t) + Ax F_V(t)$. Jika A = 1.046 m dan B = .055 m, maka besar $M_I(t)$ adalah:

$$\begin{aligned} M_I(t) &= 1060 & 0 < t < 0.03 \\ &= -198.7 t^3 + 4.24E06 t^2 - 63585 t - 848 & 0.03 < t < 0.06 \\ &= -706E03 t + 53E03 & 0.06 < t < 0.075 \\ &= 0 & 0.075 < t < 0.1 \end{aligned} \quad (6)$$

Persamaan diferensial dari getaran sistem menjadi:

$$22.9\ddot{\theta} + 495E03\theta = M_I(t) \quad (7)$$

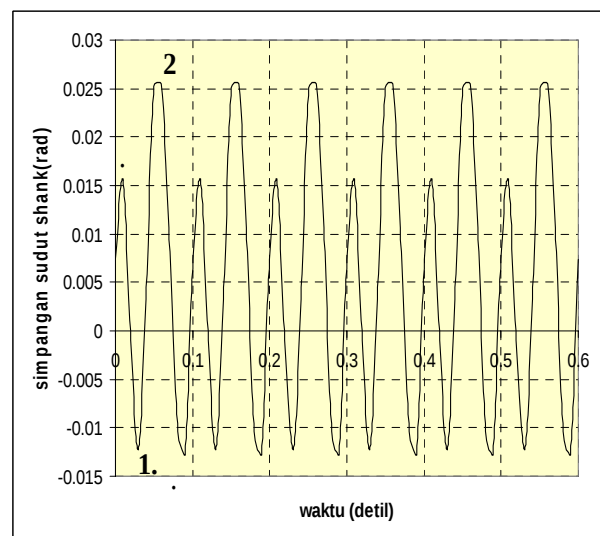
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan menggunakan Persamaan 4 dan 7, maka dapat ditentukan respon getaran dari *subsoiler shank* dalam bentuk simpangan sudut θ sebagai fungsi dari waktu t . Respon getaran yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan respon getaran yang terjadi, dapat diungkapkan bahwa respon getaran dari *subsoiler shank* merupakan fungsi periodik dengan periode yang bersesuaian dengan periode gangguan yaitu sebesar 0,1 detik.

Puncak getaran terjadi pada ujung pahat yaitu pada titik 1 (0.03 detik, -0.0123 rad.) dan titik 2 (0.06 det, 0.0255 rad). Jika jarak antara ujung pahat dengan pusat getar adalah sebesar 1048 mm, maka simpangan maksimum $d_{1,2}$ yang terjadi adalah:

$$d_{1,2} = (0.0255 + 0.0126) * 1048 \text{ mm} = 40. \text{ mm}$$

Pada beban statis yang bekerja di ujung pahat sebesar $F_h = 10000 \text{ N}$ dan $F_v = 2500 \text{ N}$, defleksi statisnya adalah $d_{st} = M_{1,mak}/k = ((10000)(1.0465) + (2500)(0.0545))/495000 = 0.0214$ radial atau setara dengan 22.4 mm. Defleksi statis ini lebih kecil dibandingkan dengan defleksi dalam kondisi bergetar. Kondisi ini terjadi karena penyebut pada Persamaan 4 besarnya lebih kecil dari satu.

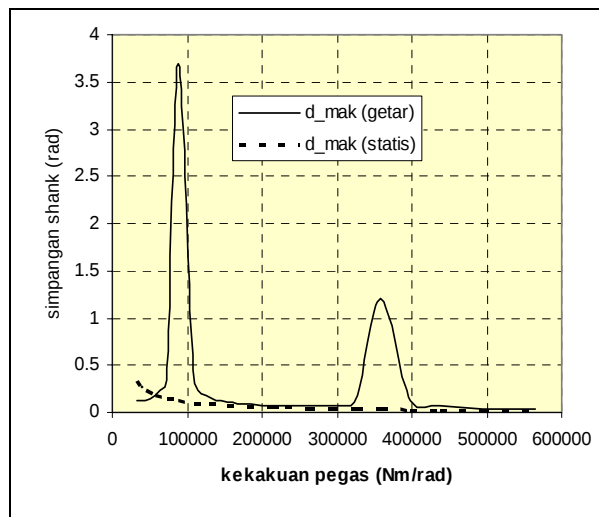


Gambar 4. Respon Getaran dari Model Subsoiler ke 1

Faktor pembagi (penyebut) dari repon getar $\theta(t)$ pada persamaan 4 adalah:

$$p_n = 1 - (n\omega / \omega_n)^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \omega_n = \sqrt{k / j}$$

Jika besar frekuensi gangguan ω dan momen inersia massa J sudah ditentukan, maka faktor dominan yang mempengaruhi simpangan maksimum dari getaran *shank* adalah kekakuan pegas k . Guna melihat pengaruh kekakuan pegas terhadap getaran *subsoiler shank*, maka kekakuan pegas divariasi dari dibawah 32546 Nm/rad (frekuensi pribadi dibawah 10 Hz.) hingga diatas 495000 Nm/rad (frekuensi pribadi diatas 20 Hz). Grafik dari simpangan maksimum *shank* sebagai fungsi dari kekakuan pegas baik dalam kondisi statis maupun dalam kondisi getar ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan simpangan maksimum yang terjadi, defleksi statis akan semakin kecil dengan semakin tingginya nilai kekakuan pegas. Pada kekakuan pegas dibawah 60000 Nm/rad, defleksi statisnya akan lebih besar dari defleksi dalam kondisi bergetar, selebihnya akan terjadi hal yang sebaliknya.



Gambar 5. Simpangan *Shank* θ sebagai Fungsi dari Kekakuan Pegas k

Penomona resonansi terjadi dua kali yaitu pada kekakuan pegas k sekitar 90000 Nm/rad ($f_n = 10$ Hz, $n=1$) dan pada kekakuan pegas k sekitar 360000 Nm/rad ($f_n = 20$ Hz, $n = 2$) sehingga *subsoiler shank* akan bergetar hebat. Pada daerah di sekitar resonansi ini, *velocity ratio* nya memungkinkan berharga lebih besar dari satu. Kondisi ini sangat diperlukan *subsoiler shank* untuk menurunkan *draft* yang diperlukan guna membongkar kepadatan tanah. Kendati demikian perlu diperhatikan pengaruh getaran yang ditransmisikan ke *implement* dan yang ke traktor [3]. Demikian pula perlu diperhatikan pengaruh getaran pada regangan pegas karena dengan semakin besarnya defleksi dapat meng-

akibatkan pegas dalam kondisi plastis sehingga tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Berntsen [9], maka pegas dengan kekakuan rendah akan sesuai jika digunakan untuk membongkar tanah dengan kepadatan rendah sedangkan pegas dengan kekakuan tinggi akan sesuai jika digunakan untuk membongkar tanah padat.

KESIMPULAN

Pada makalah ini telah diturunkan persamaan matematik getaran *subsoiler shank* yang diakibatkan oleh gangguan alami dari variasi gaya potong tanah. Getaran *Subsoiler* dimodelkan sebagai getaran dengan satu derajat kebebasan. Gangguan alami dimodelkan sebagai fungsi periodik dengan perioda 0.1 detik. Berdasarkan hasil perhitungan dari persamaan matematik dapat diungkapkan bahwa, *subsoiler shank* bergetar secara periodik dengan perioda yang sama dengan perioda gangguannya. Elastisitas pegas berpengaruh terhadap besar simpangan maksimum getaran *subsoiler shank*. Pada kondisi tertentu terjadi dua kali penomona resonansi yaitu pada frekuensi $f = f_n = 10$ Hz dan pada frekuensi $f = 2*f_n = 20$ Hz sehingga *subsoiler shank* bergetar hebat dan kondisi ini diharapkan mampu menurunkan tahanan tanah secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Radite P.A.S., Wawan Hermawan., Suastawa I.N., Pengembangan Subsoiler Getar 2-Bajak, *Gakuryoku*, Vol. IX No. 2, 2003, pp 181-186.
2. Radite P.A.S dan Suastawa I.N., *Analisis gerak dan Karakteristik Penggetar Togel untuk Bajak Singkal.*, Seminar dan Kongres PERTETA, Yogyakarta. 1998.
3. Bandalan E.P., Salokhe V.M., Gupta C.P., Niyamapa T., *Performance of an oscilating subsoiler in breaking a hardpan.* Journal of Terramechanics 36, 1999, pp. 117-125.
4. Niyamapa, T., Salokhe, M. V., Force and pressure distribution under vibratory tillage tool, *Journal of Terramechanics* 37, 2000a, pp. 139-150.
5. Niyamapa T. and Salokhe M. V., *Soil Disturbance And Force Mechanics of Vibrating Tillage Tool*, Journal of Terramechanics 37, 2000b, pp. 151-166.
6. Butson, J. M. dan Rackham, H.D., *Vibratory Soil Cutting I. Soil Tank Studies of Draught and Power Requirements*, *J. agric. Egg Res.* 26, 1981b, pp. 409-418.

7. Butson. J. M.dan Rackham, H.D., *Vibratory Soil Cutting II. An Improved Mathematical Model*, *J. agric. Engng Research*, 26, 1981a, pp. 419-439.
8. Kofoed S. S., *Kinematics and Power Requirement of Oscillating Tillage Tools*, *J. agric. Egg Res.* 14 (1), 1969, pp. 54-73.
9. Berntsen R., Berre B., Torp T., Aasen H., *Tine force established by a two-level and the draught requirement of rigid and flexible tines*. *Soil and Tillage Research* 90, 2006, pp. 230-241.
10. Qiu Lichun and Li Baofa, *Experimental Study on the Self-Excited Vibration Subsoiler for Reducing Draft Force*, *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 116 960, 2000, pp. 72-76.
11. Bandoko, *Self-Excited Vibration Subsoiler*, unpublished, Under Graduated Thesis, Mechanical Engineering Department of Tarumanegara University, 2008.
12. Kreyszig E., *Advanced Engineering Mathematics*, John Willey & Son, Singapore, 1988.
13. Meirovitch. L., *Element of Vibration Analysis*, McGraw-Hill inc, Singapore, 1986.
14. Gill W.R. and Vanden Berg. *Soil Dynamics in Tillage and Traction*. USDARS Agriculture Handbook No. 316 U.S., Washington D.C 20402: Government Printing Office, 1968.