

PEMODELAN PRODUKTIVITAS *HYDRAULIC STATIC PILE DRIVER* MENGGUNAKAN MODEL ANALITIS PADA TANAH BERLANAU

Joko Yulianto Eko Warsito¹⁾, Jati Utomo Dwi Hatmoko²⁾

Teknik Bangunan SMK Negeri 2 Tarakan¹⁾

Teknik Sipil, Universitas Diponegoro²⁾

Abstract Rapid urban growth has caused an increase of infrastructure and building construction projects in recent years in terms of project scale and number. Many of which certainly involve the construction of deep foundation, including pile foundation. In particularly densely populated urban areas, the need for more environmentally friendly pile driving equipment, such as hydraulic static pile driver (HSPD), is therefore inevitable. The aim of this study is to give a problem solving about HSPD productivity using analytical model. The objective of this study is to produce curves model of HSPD productivity. An analytical model has been designed utilizing 252 data of point piling from the four projects and simulation, i.e. size of driven piles, piling depth, and cycle time. The result of model is nomogram of HSPD productivity against piling depth for 3 driven pile size such as equilateral triangle 32 cm, square 25 cm, and square 30 cm. The model average validity is 96.07% and deviation standard is 2.32%. The sensitivity value 95.154% for equilateral triangle 32 cm, 9.376 for square 25 cm, and 94.298% for square 30 cm of driven pile.

Key Words Productivity, HSPD, driven pile, nomogram, analytical

1. Pendahuluan

Tiang pancang telah digunakan sebagai pondasi bangunan gedung, jembatan, dan struktur lainnya sejak jaman dahulu. Berbagai teknologi pemancangan terus dikembangkan. Pemukul jatuh (*drop hammer*) merupakan teknik pemancangan tiang tertua menggunakan tenaga manusia yang terus dikembangkan hingga menggunakan tenaga diesel (*diesel hammers*) pada tahun 1930-an. Pemukul getar (*vibratory hammers*) dan pemukul hidrolis (*hydraulic hammers*) merupakan teknik pemancangan lainnya yang dikembangkan setelah pemukul diesel [1], sedangkan teknologi *press-in hydraulic pile drivers* muncul beberapa puluh tahun terakhir.

Tiang pancang dimasukkan ke dalam tanah melalui beberapa metode yaitu: pukulan, getaran, dan penekanan [2]. Metode pukulan menggunakan alat *drop hammer*, *single/double-acting hammer*, dan *diesel hammer*. Metode getaran menggunakan alat *vibratory hammer* [2, 3, 4]. Metode penekanan menggunakan alat *hydraulic presses* dengan sistem *jack-in* [3] atau *press-in hydraulic pile drivers* [5].

Jack-in hydraulic pile drivers terdiri dari 2 tipe yaitu *hydraulic crawler pile driver* dan *hydraulic static pile driver (HSPD)*. *Hydraulic crawler pile driver* mempunyai kapasitas tekan kecil dan untuk memancarkan tiang berukuran

kecil (misalnya bujursangkar 20 cm), sedangkan *HSPD* mempunyai kapasitas tekan 40 ton – 1.200 ton dan mampu memancarkan tiang berukuran lebih besar (misalnya bujursangkar 20 cm – 60 cm) [6]. *HSPD* digunakan untuk memasukkan tiang ke dalam tanah dengan menggabungkan teknik menggenggam dan mendorong atau menarik. Alat ini menggenggam dan mendorong tiang ke bawah. Selanjutnya pada akhir dorongan, tiang dilepaskan dan penggenggam (*grip*) meluncur ke atas untuk memulai proses mendorong berikutnya. *HSPD* dapat pula digunakan untuk menarik tiang yang terlanjur dipancarkan.

HSPD mulai digunakan di Indonesia sekitar 2007 dan makin sering digunakan akhir-akhir ini khususnya di perkotaan. Hal ini dapat diprediksi dari banyaknya proyek konstruksi di perkotaan khususnya di Pulau Jawa sebesar 46,31% pada 2010 [7] dan masih banyak lagi proyek konstruksi yang akan diselesaikan pada 2013 – 2017 [8, 9, 10]. Proyek-proyek konstruksi gedung dan infrastruktur terus meningkat seiring dengan perkembangan daerah perkotaan. Rata-rata proyek tersebut menggunakan pondasi tiang pancang sebagai desain pondasinya. Realisasi pekerjaan pondasi tiang pancang memerlukan proses pemancangan menggunakan alat pancang tertentu. Pada daerah perkotaan yang padat penduduk, pelaksanaan pemancangan memerlukan alat yang ramah lingkungan seperti *hydraulic static pile driver (HSPD)* agar

* Corresponding author. Email: ylnj@yahoo.com

Published online at <http://Jemis.ub.ac.id>

Copyright ©2016 JTI UB Publishing. All Rights Reserved

dampak proyek dapat diminimalkan. Penggunaan alat ini dapat mengurangi kerugian akibat komplain dari masyarakat sekitar yang terkena dampak dengan demikian keuntungan kontraktor tetap terjaga.

Keunggulan *HSPD* berkenaan dengan masalah lingkungan adalah: (1) cocok untuk memancang tiang di area yang memiliki ruang gerak terbatas karena tiang dapat dipancang dalam ukuran pendek dan disambung [5]; (2) memungkinkan tiang diinstalasi dekat struktur yang telah ada sebelumnya tanpa mengganggu aktivitas manusia [11]; (3) cocok untuk lokasi proyek pada daerah padat penduduk dan bangunan [12]; (4) teknik instalasi hampir bebas getaran dan sedikit kebisingan dibandingkan dengan sistem pemancangan yang lainnya [13, 11, 14, 5, 15]. Keunggulan *HSPD* berkenaan dengan masalah teknis yaitu: (1) tingkat konstruksi lebih cepat; (2) kerusakan tiang kecil; (3) lebih efisien dari pada metode pemancangan lainnya; (4) kualitas pemancangan dijamin mirip dengan uji tiang [13]; (5) gaya tekan dongkrak atau daya dukung tiang dapat dibaca langsung melalui manometer sehingga gaya tekan tiang dapat diketahui setiap mencapai kedalaman tertentu [16]. Kelemahan *HSPD* antara lain: (1) lapisan tanah permukaan harus padat agar alat tidak miring; (2) operator harus berpengalaman; (3) rute transportasi alat harus diperhatikan. Kelemahan ini dapat diantisipasi dengan persiapan awal sebelum pelaksanaan pemancangan.

Keunggulan *HSPD* dari sisi lingkungan itu sudah sesuai dengan konsep bangunan ramah lingkungan (*green building*) yang proses pelaksanaan pembangunannya dikenal dengan *green construction* (konstruksi ramah lingkungan). Konsep ini menuntut pengusaha konstruksi untuk mengimplementasikannya mulai dari perencanaan, desain, hingga pembangunan konstruksinya. Oleh karena itu, kegiatan pembangunan konstruksi, khususnya pekerjaan pondasi pada aspek pemancangan, hendaknya juga harus memperhatikan konsep ramah lingkungan. Keunggulan *HSPD* dari sisi teknis itu juga menunjukkan efisiensi pembiayaan karena tidak harus dilakukan uji daya dukung tiang.

Produktivitas merupakan tolok ukur keberhasilan suatu pekerjaan [17]. Keakuratan prediksi produktivitas diperlukan secara efektif untuk perencanaan dan kontrol operasi konstruksi. Beberapa pakar memberikan alasan pentingnya produktivitas. Rasing [18]

menuliskan bahwa produktivitas lebih penting dari pada pendapatan dan keuntungan, karena pendapatan dan keuntungan hanya menentukan hasil akhir sedangkan produktivitas menentukan efisiensi, efektivitas, dan kebijakan. Jika perusahaan tidak menghasilkan hasil yang diharapkan maka laporan produktivitas yang diperiksa dan bukan laporan keuntungan. Riley [19] menuliskan bahwa produktivitas yang tinggi dapat mendorong untuk mengurangi biaya, meningkatkan daya saing dan kinerja, keuntungan yang lebih tinggi, gaji yang lebih tinggi, dan pertumbuhan ekonomi. Uraian produktivitas tersebut berlaku pula untuk kontraktor peralatan konstruksi di mana keberhasilan akan diperoleh apabila estimasi produktivitas dilakukan secara akurat. Khusus produktivitas peralatan pemancangan menggunakan *HSPD*, kontraktor perlu meningkatkan kemampuan estimasi produktivitas peralatan sehingga diperlukan acuan estimasi produktivitas *HSPD*.

Penelitian tentang produktivitas *HSPD* masih terbatas. Beberapa diantaranya yaitu Sumito dan Antonioes [20] dan Wenas dan Gendo [21]. Sumito dan Antonioes [20] meneliti produktivitas alat *HSPD* Sunwad ZYJ 320 pada sebuah proyek bangunan apartemen 24 lantai. Pemancangan menggunakan tiang pancang beton *spun pile* berdiameter 50 cm sampai kedalaman 26 m dengan 1 sambungan tiang pancang. Produktivitas pemancangan rata-rata sebesar 0,509 m/menit. Wenas dan Gendo [21] meneliti produktivitas alat *HSPD* Sunwad ZYJ 120 pada proyek *showroom* 3 lantai. Pemancangan menggunakan tiang pancang beton bujurangkar 25 cm sampai kedalaman 12 m dengan 1 sambungan tiang pancang. Produktivitas pemancangan sebesar 0,6634 m/menit. Kedua penelitian itu mengumpulkan seluruh data durasi aktivitas pemancangan dari lapangan dalam suatu proyek dan dianalisis dengan statistik non-parametrik jenis *one sample Kolmogorov Smirnov test*.

Produktivitas alat pancang hasil penelitian Sumito dan Antonioes [20] dan Wenas dan Gendo [21] memberikan gambaran nilai produktivitas alat pancang yang berbeda-beda. Hal ini karena adanya perbedaan kondisi lapangan sehingga hasil produktivitas alat tidak dapat digeneralisasi untuk kondisi lapangan yang lain. Hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan kondisi lapangan akan mempengaruhi produktivitas alat. Oleh karena itu, diperlukan bentuk produktivitas alat yang

aplikatif yang dapat digunakan pada pekerjaan pemancangan berikutnya, karena pekerjaan pemancangan berikutnya dimungkinkan memiliki kondisi lapangan yang berbeda., memberikan gambaran nilai produktivitas alat pancang yang berbeda-beda. Hal ini karena adanya perbedaan kondisi lapangan sehingga hasil penelitian tidak dapat digeneralisasi untuk kondisi lapangan yang lain. Oleh karena itu, diperlukan bentuk produktivitas alat yang aplikatif yang dapat digunakan pada pekerjaan pemancangan berikutnya.

Faktor-faktor penting produktivitas *HSPD* yang tersirat pada perilaku tanah di dalam tanah [2], yaitu: jenis tanah, ukuran tiang pancang, kedalaman pemancangan, dan waktu siklus. Jenis tanah menyebabkan perbedaan kapasitas daya dukung dan gesekan tanah. Ukuran tiang pancang meliputi penampang dan panjang tiang pancang yang tergantung pada beban konstruksi dan kedalaman pemancangan. Kedalaman pemancangan dapat berbeda-beda sesuai perencanaan. Waktu siklus pemancangan berkaitan dengan banyaknya aktivitas pemancangan yang tergantung pada panjang tiang pancang dan kedalaman pemancangan. Semua faktor tersebut sangat mempengaruhi produktivitas *HSPD*.

Bervariasinya faktor-faktor produktivitas tersebut tidak mudah untuk diselesaikan secara sederhana sehingga diperlukan pemodelan untuk mendapatkan bentuk produktivitas yang aplikatif. Melalui pemodelan produktivitas pemancangan akan diperoleh model produktivitas alat *HSPD* yang dapat mengetahui produktivitas pada kedalaman yang tidak diteliti dan dapat memprediksi efek perubahannya bila dilakukan perubahan pada masukannya. Pemodelan analitis sebagai salah satu cara untuk membuat model nomogram produktivitas *HSPD*. Proses pemancangan terdiri dari beberapa aktivitas dengan durasi waktu tertentu sehingga dapat digunakan metode analitis untuk memodelkan produktivitas.

Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana model nomogram produktivitas *HSPD*. Maksud penelitian ini adalah untuk memberikan solusi masalah tentang produktivitas *HSPD* menggunakan model analitis. Tujuan penelitian yang ingin dicapai adalah menghasilkan model nomogram produktivitas *HSPD*. Manfaat hasil penelitian bagi praktisi untuk merencanakan dan estimasi waktu penggunaan *HSPD* pada proyek konstruksi. Lingkup permasalahan penelitian ini

terbatas pada: kelompok tiang pancang dalam satu *pile cap* pada proyek bangunan gedung bertingkat menengah, alat *HSPD* seri ZYC 120B-B, tiang pancang beton bujursangkar ukuran kecil dan segitiga dengan panjang 6 m dan 8 m hasil pabrikasi, dan kedalaman pemancangan 6 – 24 m.

2. Metodologi

Terdapat banyak variabel yang mempengaruhi produktivitas *HSPD* pada tanah berlanau namun tidak mungkin dipertimbangkan semuanya dalam satu penelitian. Penelitian ini hanya konsentrasi pada variabel utama, yaitu: ukuran tiang pancang, kedalaman pemancangan, dan waktu siklus yang ditunjukkan pada Tabel 1. Masing-masing variabel utama terdiri dari beberapa parameter yang diprediksi akan memberikan perbedaan hasil.

Tabel 1. Parameter Variabel Utama

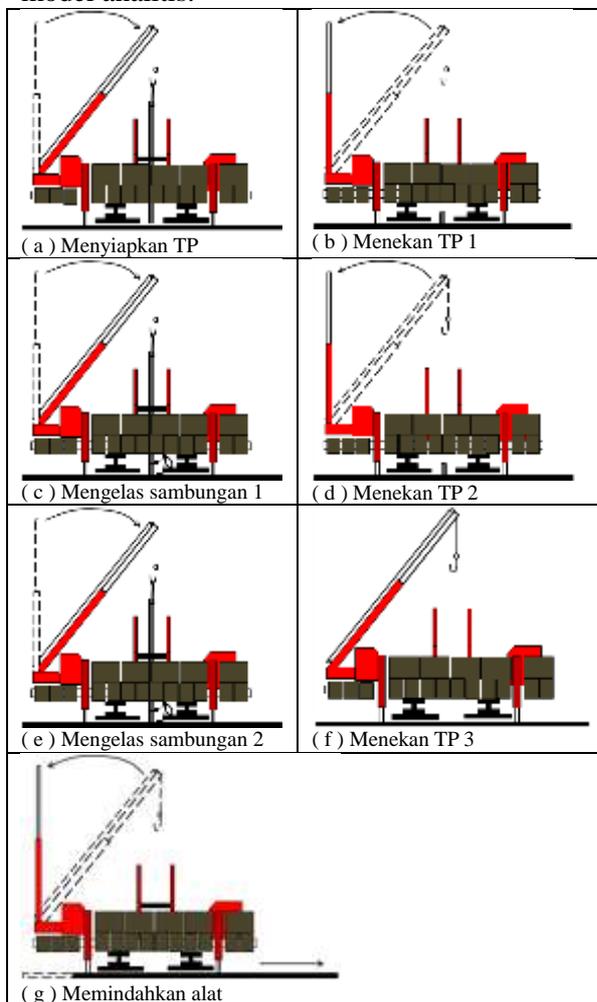
Variabel Utama		Parameter			
Ukuran tiang pancang (cm)	Penampang	△ 32x32x32	□ 25x25	□ 30x30	
	Panjang	600		800	
Kedalaman pemancangan (m)		6	12	18	24
Waktu siklus		Tertentu dan tidak tentu			

Waktu siklus merupakan kumpulan waktu dari awal hingga akhir aktivitas yang diperlukan untuk proses pemancangan. Aktivitas pemancangan terdiri dari tahap-tahap yang ditentukan secara detail seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dengan urutan aktivitas sebagai berikut: (a) menyiapkan tiang pancang; (b) menekan tiang pancang ke-1; (c) mengelas sambungan ke-1; (d) menekan tiang pancang ke-2; (e) mengelas sambungan ke-2; (f) menekan tiang pancang ke-3; (g) memindahkan alat menuju titik pancang berikutnya. Waktu aktivitas (a), aktivitas (c), dan aktivitas (f) tidak terjadi perbedaan yang signifikan sehingga dikatakan sebagai waktu tertentu, sedang waktu aktivitas (b), (d), dan (f) merupakan waktu paling bervariasi karena tergantung pada ukuran penampang tiang pancang, dan kedalaman pemancangan sehingga disebut dengan waktu tidak tentu.

Data waktu siklus pada semua kombinasi yaitu 12 kelompok data, dibagi menjadi 2 bagian yaitu 70% untuk pemodelan dan 30% untuk validasi model. Data pemodelan

dikoreksi dengan nilai *performance rating* (PR) sehingga diperoleh waktu siklus normal. Prediksi nilai PR mengacu pada tabel *Westinghouse Performance Rating* yang ditunjukkan pada Tabel 2. Durasi waktu siklus pemancangan diestimasi dari nilai rata-rata statistik kumpulan data berdistribusi normal.

Salah satu metode pemodelan produktivitas yaitu metode perhitungan analitis [22]. Metode analitis menggunakan rumusan konvensional melalui perhitungan secara manual. Desain umum model analitis akan diaplikasikan untuk jenis tanah berlanau dengan ukuran penampang, dan kedalaman pemancangan yang berbeda. Langkah-langkah berikut dipertimbangkan dalam desain umum model analitis.



Gambar 1. Tahap Pemancangan

2.1 Waktu Aktivitas Mesin Crane

Aktivitas mesin crane adalah menyiapkan tiang pancang pertama, kedua, ketiga, dan ruyung. Aktivitas menyiapkan tiang pancang kedua, ketiga, dan ruyung dilakukan bersamaan waktu dengan waktu tekan yang

diperlukan oleh mesin HSPD sehingga hanya menyiapkan tiang pancang pertama yang diperhitungkan sebagai waktu aktivitas mesin crane yang meliputi 4 sub-aktivitas: (a) mengikat tiang pancang, (b) mengangkat tiang pancang, (c) memutar lengan crane, dan (d) menurunkan tiang pancang. Dengan demikian waktu menyiapkan tiang pancang dapat dihitung dengan Persamaan (1) yang dimodifikasi dari [23].

$$W_{siap} = \sum_{j=1}^a w_j \tag{Pers. 1}$$

di mana:

w_{siap} = waktu menyiapkan tiang pancang

w_j = waktu sub-aktivitas j

a = banyaknya sub-aktivitas maksimum

j = sub-aktivitas

Tabel 2. Westinghouse Performance Rating

KECAKAPAN		USAHA	
+ 0,15 A1	Super	+ 0,13 A1	Super
+ 0,13 A2		+ 0,12 A2	
+ 0,11 B1	Baik	+ 0,10 B1	Baik
+ 0,08 B2	sekali	+ 0,08 B2	sekali
+ 0,06 C1	Baik	+ 0,05 C1	Baik
+ 0,03 C2		+ 0,02 C2	
0,00 D	Rata-rata	0,00 D	Rata-rata
- 0,05 E1	Sedang	- 0,04 E1	Sedang
- 0,10 E2		- 0,08 E2	
- 0,16 F1	Buruk	- 0,12 F1	Buruk
- 0,22 F2		- 0,17 F2	
KONDISI		KONSISTENSI	
+ 0,06 A	Ideal	+ 0,04 A	Ideal
+ 0,04 B	Baik	+ 0,03 B	Baik
	sekali		sekali
+ 0,02 C	Baik	+ 0,01 C	Baik
0,00 D	Rata-rata	0,00 D	Rata-rata
- 0,03 E	Sedang	- 0,02 E	Sedang
- 0,07 F	Buruk	- 0,04 F	Buruk

Westinghouse Company dalam [24]

2.2 Waktu Aktivitas Mesin Las

Mesin las melakukan pekerjaan mengelas sambungan tiang pancang menggunakan las ikat pada sudut-sudut sisi sambungan. Waktu aktivitas mesin las terdiri dari 4 sub-aktivitas, yaitu: (a) mengikat kutub negatif pada sambungan tiang, (b) mengelas ikat pada sudut-sudut 2 sisi sambungan, (c) pindah posisi pengelasan, (d) mengelas ikat pada sudut yang lain. Analog dengan Persamaan (1) maka waktu pengelasan sambungan tiang pancang dapat dihitung dengan Persamaan (2).

$$W_{las} = \sum_{j=1}^a w_j \tag{Pers.2}$$

di mana:

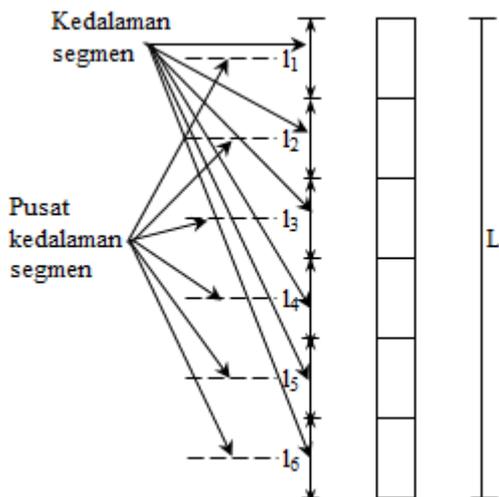
w_{las} = waktu las sambungan tiang pancang

Waktu pengelasan dapat bernilai nol bila pemancangan tanpa sambungan, bernilai $1 \times w_{las}$ bila menggunakan 1 sambungan, dan bernilai $2 \times w_{las}$ bila menggunakan 2 sambungan. Paragraf dimulai dengan pemberian spasi inden 1 cm untuk baris pertama, dan antar paragraf tanpa diberi jarak 1 baris spasi.

2.3 Waktu Aktivitas Mesin HSPD

Mesin HSPD melakukan aktivitas menekan tiang pancang dan memindahkan alat ke titik pancang berikutnya. Aktivitas menekan tiang pancang terdiri dari 4 sub-aktivitas yaitu: (a) menjepit tiang pancang dengan *grip*, (b) menekan tiang pancang, (c) melonggarkan jepitan *grip*, dan (d) menaikkan posisi *grip*. Sub-aktivitas tersebut dilakukan secara berulang-ulang hingga seluruh panjang tiang pancang masuk ke dalam tanah.

Kedalaman pemancangan (L) dibagi menjadi segmen-segmen kecil dengan kedalaman yang sama (l_i) untuk memudahkan perhitungan waktu siklus, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Waktu tekan di awal dan akhir kedalaman berbeda, oleh karena itu kedalaman pemancangan dibagi menjadi segmen-segmen kecil agar perbedaan waktu antara bagian atas dan bawah segmen menjadi kecil. Dengan demikian diasumsikan bahwa waktu tekan tiap segmen tidak berubah sehingga dapat digunakan waktu tekan rata-rata pada titik tengah masing-masing segmen yang mewakili seluruh kedalaman segmen.



Gambar 2. Segmen Kedalaman Pemancangan

Aktivitas memindahkan alat ke titik berikutnya terdiri dari 4 sub-aktivitas yaitu: (a) menurunkan kaki dalam dan menaikkan kaki luar, (b) menggerakkan maju kaki luar, (c)

menurunkan kaki luar dan menaikkan kaki dalam, dan (d) menggerakkan maju roda kaki hidrolis. Sub-aktivitas tersebut dilakukan secara berulang-ulang dalam beberapa tahap hingga alat siap pada titik pancang berikutnya.

Waktu menekan tiang pancang (w_{tekan}) dapat dihitung dengan Persamaan (3) dan waktu pindah alat ke titik pancang berikutnya (w_{pindah}) dengan Persamaan (4) yang dimodifikasi dari [23].

$$W_{tekan} = \sum_{l=1}^b \sum_{j=1}^a w_{lj} \tag{Pers.3}$$

$$W_{pindah} = \sum_{f=1}^e \sum_{j=1}^a w_{fj} \tag{Pers.4}$$

di mana:

- w_{fj} = waktu sub-aktivitas j pada tahap f
- w_{lj} = waktu sub-aktivitas j pada segmen l
- a = banyaknya sub-aktivitas maksimum
- b = banyaknya segmen maksimum
- e = banyaknya tahap maksimum
- f = tahap
- j = sub-aktivitas
- l = segmen

2.4 Menentukan Waktu Siklus

Waktu siklus aktivitas pemancangan (w_s) merupakan penjumlahan waktu menyiapkan tiang pancang (w_{siap}), waktu pengelasan sambungan tiang (w_{las}), waktu tekan tiang pancang (w_{tekan}), dan waktu pindah alat ke titik pancang berikutnya (w_{pindah}), yang diusulkan dihitung dengan Persamaan (5).

$$W_s = w_{siap} + w_{tekan} + s \cdot w_{las} + w_{pindah} \tag{Pers.5}$$

di mana:

- w_s = waktu siklus aktivitas pemancangan
- s = banyaknya sambungan las = 0, 1, 2

2.5 Menentukan Model Produktivitas

Produktivitas dalam industri konstruksi dapat dideskripsikan dalam terminologi faktor kinerja, angka produksi, angka satuan orang-jam, dan lainnya [25]. Produktivitas dapat digambarkan secara sederhana dengan sebuah perbandingan antara *output* dan *input* [26, 24]. Produktivitas HSPD dapat dimengerti sebagai sejumlah unit produk yang dihasilkan tiap jam, tiap hari, atau periode waktu lainnya.

Produktivitas HSPD dinyatakan dalam satuan titik/jam sedangkan w_s dalam menit maka perlu konversi ke jam menggunakan 60 menit/jam. Satu siklus aktivitas pemancangan menghasilkan 1 titik pancang. Oleh karena itu untuk menentukan produktivitas, 60 menit/jam

harus dibagi dengan *ws* sehingga menghasilkan banyaknya titik pancang yang dapat dipancangkan tiap jam.

Hasil ini mempertimbangkan waktu produktif 60 menit/jam, hal ini tidak realistis. Hasil ini hanya mempertimbangkan faktor kuantitatif pada produktivitas dan mengabaikan faktor kualitatif, seperti: efisiensi operator, kondisi cuaca, kondisi lokasi kerja, manajemen pekerjaan, masalah mesin, dll. Oleh karena itu, faktor kualitatif harus dipertimbangkan dalam model dengan faktor koreksi (FK) untuk mendapatkan estimasi produktivitas aktual [23]. FK merujuk pada Tabel 3 dan Tabel 4 sehingga estimasi produktivitas aktual diusulkan dengan Persamaan (6).

$$EP = \frac{60}{ws} FK \quad (\text{Pers.6})$$

di mana:

EP = produktivitas estimasi (titik/jam)

FK = faktor koreksi

Tabel 3. Efisiensi Kerja

Kondisi Operasi Alat	Pemeliharaan Mesin				
	Baik sekali	Baik	Sedang	Buruk	Buruk sekali
Baik sekali	0,83	0,81	0,76	0,70	0,63
Baik	0,78	0,75	0,71	0,65	0,60
Sedang	0,72	0,69	0,65	0,60	0,54
Buruk	0,63	0,61	0,57	0,52	0,45
Buruk sekali	0,52	0,50	0,47	0,42	0,32

Sumber: Rochmanhadi [27]

Tabel 4. Efisiensi Operator

Keterampilan Operator	Efisiensi Operator
Baik sekali	1,00
Rata-rata	0,75
Buruk	0,60

Sumber: Caterpillar [28]

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Model

Data observasi lapangan meliputi: data sondir, data tiang pancang, data kedalaman pemancangan, dan data waktu aktivitas pemancangan. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan dari 4 proyek bangunan gedung di Semarang dan Gresik pada pemancangan tiang pancang Δ32 cm untuk kedalaman pemancangan 9 m, 12 m, 16 m, dan □ 30 cm untuk kedalaman pemancangan 24 m.

Data sondir diplot dalam grafik klasifikasi tanah yang diberikan oleh [29] sehingga diperoleh jenis tanah lanau dengan

komposisi 6,25% - 13,04% lempung, 50% - 81,25% lanau, dan 11,11% - 41,67% pasir. Komposisi tersebut digunakan untuk simulasi konsistensi tanah pada kedalaman pemancangan yang tidak diteliti yaitu 6 m dan 18 m. Simulasi waktu tekan mengacu pada konsep gaya-gaya pada pemancangan dan sifat-sifat segitiga sebangun. Simulasi waktu tekan dilakukan untuk berbagai ukuran penampang tiang pancang pada keempat kedalaman pemancangan sehingga terpenuhi seluruh kebutuhan data yaitu 12 kelompok data.

Kelompok data sebanyak 70% digunakan untuk pemodelan dan 30% untuk validasi model. Komponen waktu siklus dalam Persamaan (5) sebanyak 70% dikoreksi dengan *PR* sehingga diperoleh waktu normal. *PR* diprediksi peneliti berdasar pengamatan pengamatan kinerja pekerja dan operator, nilai *PR* ditunjukkan pada Tabel 5. Uji Kolmogorov-Smirnov menunjukkan data berdistribusi normal sehingga nilai rata-ratanya dapat mewakili kelompok data.

Tabel 5. *PR* Operator dan Pekerja *HSPD*

Kriteria	<i>W</i> _{siap} , <i>W</i> _{tekan} , <i>W</i> _{pindah}	<i>W</i> _{las}
Kecakapan	0,03	-0,10
Usaha	-0,08	-0,08
Kondisi	-0,03	-0,03
Konsistensi	-0,04	-0,04
Jumlah	-0,12	-0,25
<i>PR</i>	0,88	0,75

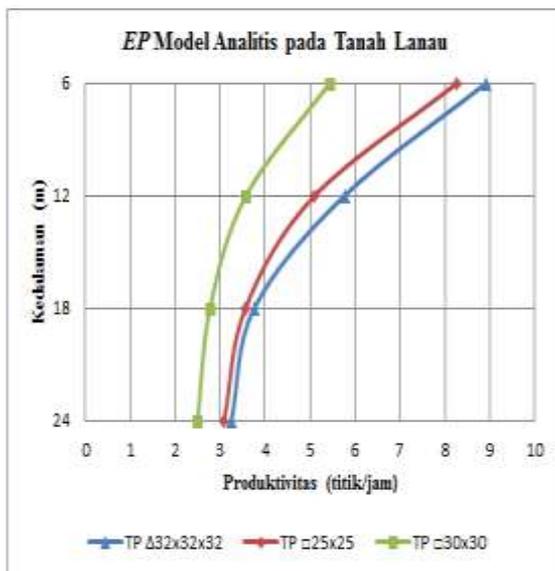
3.2 Estimasi Produktivitas *HSPD*

Model analitis yang ditunjukkan dengan Persamaan (6) telah diterapkan pada 70% data dan nilai *FK* tertentu untuk estimasi produktivitas *HSPD*. *FK* diusulkan berdasar kondisi yang diobservasi sebesar (0,83 x 1,00) yang diestimasi menggunakan Tabel 3 pada kondisi operasi alat dan pemeliharaan mesin baik sekali (0,83) dan Tabel 4 pada keterampilan operator baik sekali (1,00).

Produktivitas *HSPD* pada tanah lanau ditentukan dengan mempertimbangkan variabel-variabel yang berbeda, yaitu ukuran penampang tiang pancang, kedalaman pemancangan, banyaknya tiang pancang tiap titik pancang (BTP), dan waktu aktivitas pemancangan. Hasil model yang dibangun ditunjukkan pada Gambar 3. Nomogram hasil model menggambarkan estimasi produktivitas aktual *HSPD* pada tanah lanau dalam satuan titik/jam untuk 3 ukuran penampang tiang pancang (Δ32x32x32 cm, □25x25 cm, □30x30

cm) pada kedalaman pemancangan 6 – 24 m menggunakan panjang tiang pancang 6 m (untuk kedalaman pemancangan 6, 12, dan 18 m) dan 8 m (untuk kedalaman pemancangan 24 m) serta sambungan las ikat.

Nomogram berbentuk melengkung disebabkan oleh perbedaan waktu pengelasan yang mempengaruhi produktivitas pada masing-masing kedalaman pemancangan. Pada kedalaman 6 m tidak terdapat waktu pengelasan sedang pada kedalaman 12 m terdapat 1 x waktu pengelasan dan pada kedalaman 24 m terdapat 2 x waktu pengelasan. Adanya waktu pengelasan ini mengakibatkan penurunan produktivitas yang tajam antara kedalaman 6 m dan 12 m sedangkan penambahan waktu pengelasan menunjukkan penurunan produktivitas lebih kecil seperti terlihat antara kedalaman 12 m dan 18 m. Pada kedalaman 18 m dan 24 m menggunakan banyaknya waktu pengelasan yang sama sehingga penurunan produktivitasnya hanya dipengaruhi oleh perbedaan waktu tekan. Perbedaan ukuran penampang tiang pancang mempengaruhi besarnya produktivitas, makin luas penampangnya maka produktivitas makin kecil.



Gambar 3. Produktivitas HSPD pada Tanah Lanau

3.3 Validasi Model

Validasi merupakan hal penting yang harus diterapkan agar model dapat digunakan dalam praktek secara valid. Hasil model produktivitas harus divalidasi sehingga dapat digunakan untuk estimasi produktivitas HSPD. Model produktivitas dalam Persamaan (6) digunakan untuk menghitung produktivitas aktual pada kumpulan data validasi yaitu 30%

data. Kumpulan data validasi dibagi dalam 4 kelompok kedalaman pemancangan, yaitu 6 m, 12 m, 18 m, dan 24 m. Tiap kelompok data dikategorikan menurut ukuran penampang tiang pancang, yaitu Δ32x32x32 cm, □25x25 cm, dan □30x30 cm. Produktivitas model analitis diaplikasikan pada tiap kategori itu.

Nilai validasi (NV) diperoleh dengan membandingkan produktivitas estimasi hasil model (EP) dengan produktivitas aktual (AP) yang ditunjukkan dengan Persamaan (7). Jika produktivitas estimasi hasil model menyediakan angka-angka yang dekat dengan produktivitas aktual yang dihitung dari kumpulan data validasi, maka model valid dan dapat digunakan untuk mewakili produktivitas HSPD secara praktis.

$$NV = \frac{EP}{AP} \quad \text{(Pers.7)}$$

NV telah dihitung untuk tiap data validasi dengan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 6. Nilai validasi terendah pada □25x25 kedalaman 6 m yaitu 0,930. Hal ini mengindikasikan bahwa model mempunyai 93% kecocokan. NV telah menjadi desain untuk memeriksa derajat kecocokan model yang didesain. Angka NV pada Tabel 6 menunjukkan bahwa 100% output model mempunyai kecocokan lebih dari 90%. Hal ini mengekspresikan kecocokan yang bagus dan dapat diterima.

Tabel 6. Nilai Validasi (NV)

Kedalaman (m)	Ukuran penampang tiang pancang (cm)		
	Δ32x32x32	□25x25	□30x30
6	0,937	0,930	0,947
12	0,971	0,958	0,958
18	0,966	0,974	0,962
24	0,968	0,974	0,985
Rata-rata	0,9607		
Standar Deviasi	2,32		

3.4 Sensitivitas Model

Uji sensitivitas dimaksudkan untuk memeriksa konsistensi dan kestabilan hasil model. Apabila keluaran model menunjukkan pola yang sama berarti model dinyatakan konsisten dan stabil. Bila terdapat penyimpangan maka besar penyimpangan diukur untuk menentukan tingkat kepercayaan model. Persentase sensitivitas model dihitung dengan Persamaan (8) yang dimodifikasi dari Teori Bayes.

$$R = 100\% \{1 - c\}^{\frac{1}{m+1}} \quad \text{(Pers.8)}$$

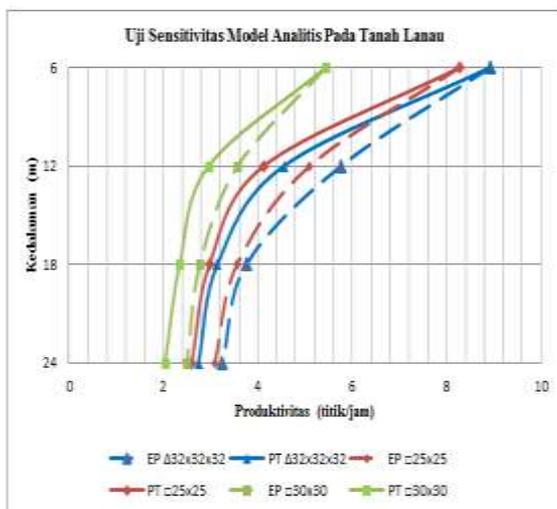
di mana:

- R = persentase sensitivitas model
- c = rata-rata mutlak penyimpangan
- m = jumlah model yang diuji = 1

Analisis sensitivitas dilakukan dengan merubah masukan model yaitu panjang tiang pancang sehingga menghasilkan produktivitas terapan (PT). Panjang tiang pancang dalam uji sensitivitas adalah 6 m untuk kedalaman 6 m, 4 m untuk kedalaman 12 m, 6 m dan 4 m untuk kedalaman 18 m, dan 6 m untuk kedalaman 24 m. Hasil analisis sensitivitas ditunjukkan pada Tabel 7 dan Gambar 4. Tabel 7 menunjukkan nilai sensitivitas model terendah 94,298% dan model produktivitas terapan pada Gambar 4 menunjukkan pola yang sama. Hal ini mengekspresikan keakuratan yang bagus dan dapat diterima.

Tabel 7. Nilai Sensitivitas Model

Kedalaman (m)	Penyimpangan		
	C _{Δ32x32x32}	C _{□25x25}	C _{□30x30}
6	0,000	0,000	0,000
12	0,197	0,172	0,181
18	0,099	0,103	0,126
24	0,082	0,086	0,135
c _{rata-rata}	0,095	0,090	0,111
R	95,154	95,376	94,298



Gambar 4. Uji Sensitivitas Model

3.5 Implementasi Hasil

Bentuk nomogram produktivitas *HSPD* pada Gambar 3 dapat dikembangkan untuk berbagai kondisi, misalnya:

- 1) Pada kondisi faktor kualitatif produktivitas yang lain dengan nilai FK tertentu maka hasil nomogram Gambar 3 dikalikan dengan FK/0,83 sehingga sehingga *EP* dapat ditentukan dengan Persamaan (9).

$$EP = EP_{MA} \frac{FK}{0,83} \quad (\text{Pers.9})$$

- 2) Bila dikehendaki satuan produktivitas dalam m³/jam maka hasil model dikalikan dengan kedalaman pemancangan.
- 3) Bila dikehendaki produktivitas dalam sehari maka hasil model dikalikan dengan jumlah jam kerja harian.

Hasil metode analitis ini dapat digunakan dengan persyaratan sebagai berikut:

- 1) Pemancangan menggunakan *HSPD ZYC 120B-B*. Jenis alat pancang lainnya mempunyai tahap pemancangan yang berbeda sehingga langkah-langkah desainnya juga berbeda.
- 2) Data deterministik. Metode analitis bersifat tertentu sehingga diperlukan data deterministik. Penggunaan data stokastik akan mempersulit perhitungan karena banyaknya kombinasi peluang penggunaan data.
- 3) Mengukur *w_{siap}*, *w_{tekan}*, *w_{las}*, dan *w_{pindah}*. Mengukur masing-masing waktu aktivitas dapat memperkecil kesalahan dibandingkan dengan mengukur waktu siklus secara langsung. Masing-masing aktivitas dapat diamati dan mudah diberikan koreksi apabila terdapat hal-hal yang menyebabkan kesalahan pengamatan.
- 4) Pemancangan dalam 1 *pile cap*. Pemancangan dalam 1 *pile cap* memerlukan *w_{pindah}* yang relatif sama dibandingkan antar *pile caps*.

4. Kesimpulan

Sebuah model nomogram telah didesain untuk mengestimasi produktivitas *HSPD* menggunakan teknik konvensional (analitis). Hasil produktivitas *HSPD* dapat dirangkum dalam Tabel 8.

Tabel 8. Nilai Produktivitas *HSPD*

Kedalaman (m)	Ukuran penampang tiang pancang (cm)		
	Δ32x32x32	□25x25	□30x30
6	8,913	8,267	5,431
12	5,763	5,098	3,572
18	3,756	3,560	2,771
24	3,248	3,087	2,494

Model telah divalidasi untuk menjamin keakuratannya dalam analisis produktivitas. Konsep nilai validitas (NV) telah didesain untuk memeriksa keakuratannya. Sebanyak

100% *output* model mempunyai NV lebih dari 90% sehingga model valid dan akurat dengan rata-rata NV sebesar 96,07% dan standar deviasi 2,32%. Analisis sensitivitas *output* model menunjukkan nilai sensitivitas sebesar 95,154% untuk tiang pancang segitiga sama sisi 32 cm; 95,376% untuk tiang pancang bujursangkar 25 cm; dan 94,298% untuk tiang pancang bujursangkar 30 cm. Dengan demikian model nomogram produktivitas HSPD merupakan model yang valid dan akurat untuk merencanakan dan estimasi waktu penggunaan HSPD pada proyek konstruksi

Bentuk matematika model analitis pada Persamaan (6) dan hasil model yang diperoleh dapat dikembangkan untuk berbagai kondisi, misalnya: penggunaan FK dapat diubah sesuai kondisi faktor kualitatif produktivitas yang akan direncanakan sehingga diperoleh model nomogram tersendiri dan satuan produktivitas dapat diubah sesuai kebutuhan. Metode analitis ini dapat digunakan dengan persyaratan sebagai berikut: pemancangan menggunakan HSPD ZYC 120B-B, data deterministik, mengukur W_{siap} , W_{tekan} , W_{las} , dan W_{pindah} , dan pemancangan dalam 1 *pile cap*.

Daftar Pustaka

- [1] Fellenius, B. H. (2009), *Basics of Foundation Design*, Electronic Edition, www.Fellenius.net.
- [2] Bowles, J. E. (1996), *Foundation Analysis and Design*, Fifth Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc., Singapore.
- [3] PDCA (Pile Driving Contractors Association). (2003), “*Driven Piles are Tested Piles*”, <http://www.piledrivers.org/files/uploads/272d1300-0887-4849-bdb0-044b9ff8859.pdf>, diakses pada hari Sabtu, 14 April 2012 Pk. 12.08 WIB.
- [4] U.S. Army Corps of Engineers. (2004), *Pile Driving Equipment*, Department of The Army, Washington, DC 20314-1000.
- [5] Peurifoy, R. L.; Schexnayder, C. J.; and Shapira, A. (2006), *Construction Planning, Equipment, and Methods*, Seventh Edition, McGraw-Hill, New York.
- [6] Tianwei. (2013), “*ZYC Series Hydraulic Static Pile Driver*”, <http://tianweiengineering.itrademarket.com/1711337/>, diakses pada hari Senin, 14 Januari 2013 Pk. 18.23 WIB.
- [7] Badan Pusat Statistik (BPS). (2012), *Data Runtun Statistik Konstruksi 1990 – 2010*, Badan Pusat Statistik, Jakarta, Indonesia.
- [8] Citradata. (2013a), “*Proyek Hotel di Indonesia Tahun 2010 – 2012*”, http://citradataconstruction.com/data/psr/d_ata_22.pdf, diakses pada hari Minggu, 28 April 2013 Pk. 24.04 WIB.
- [9] Citradata. (2013b), “*Analisa Perkembangan Proyek Superblok di Indonesia Tahun 2000 – 2012*”, http://citradataconstruction.com/data/psr/d_ata_23.pdf, diakses pada hari Minggu, 28 April 2013 Pk. 24.02 WIB.
- [10] Citradata. (2013c), “*Analisa Perkembangan Proyek Apartemen Tahun 2003 – 2012*”, http://citradataconstruction.com/data/psr/d_ata_24.pdf, diakses pada hari Minggu, 28 April 2013 Pk. 24.00 WIB.
- [11] White, D.; Finlay, T.; Bolton, M.; and Bearss, G. (2002), “*Press-in Piling: Ground Vibration and Noise During Pile Installation*”, *ASCE Special Publication* Vol. 116, pp. 363 – 371.
- [12] BPP (Berdikari Pondasi Perkasa). (2009), “*Pile Jacking*”, <http://www.ptbppid.com/services.html>, diakses pada hari Sabtu, 28 April 2012 Pk. 10.02 WIB.
- [13] Tan, S. M. and Ling, C. H. (2001), “*The Use of High Capacity Hydraulic Injection Piles for Buildings in Limes-Stone Ex-Tin Mining Sites in Kuala Lumpur*”, *Proceeding, 14th SEAGC*, Hong Kong.
- [14] Deeks, A. D., White, D. J. and Bolton, M. D. (2005), “*A Comparison of Jacked, Driven and Bored Piles in Sand*”, *ICSMGE Osaka*, Vol. 2, pp. 2103 – 2106.
- [15] Chan, R. K. S. (2006), “*Foundation Design and Construction*”, *Geo Publication* No.1.
- [16] Pertiwi, D. (2006), “*Korelasi Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Dengan Menggunakan Data-Data Sondir dan Jack in Pile*”, *Jurnal Aksial*, Vol. 8, No.1, Hal. 36 – 42.
- [17] Hwang, S., Liu, L. Y. (2010), “*Contemporaneous Time Series and Forecasting Methodologies for Predicting*

- Short-Term Productivity”, *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 136, No. 9, pp. 1047 – 1055.
- [18] Rasing, M. (2010), “Importance of Productivity”, <http://ezinearticles.com/3872391>, diakses pada hari Senin, 14 Januari 2013 Pk. 19.08 WIB.
- [19] Riley, G. (2012), “Unit 2 Macro: The Importance of Productivity”, <http://www.tutor2u.net/blog/index.php/economics/comments/uk-economy-revision-productivity>, diakses pada hari Senin, 14 Januari 2013 Pk. 19.12 WIB.
- [20] Sumito, P. N. dan Antonioes, P. G., Limanto. S., Kusuma, J. H. (2009), *Studi Awal Produktivitas Alat Pancang Jack-In Pile*, Skripsi Sarjana tidak dipublikasikan, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- [21] Wenas, A. dan Gendo, R., Limanto. S., Kusuma, J. H. (2010), *Produktivitas Pemancangan Tiang Pancang Dengan Jack-In Pile Pada Proyek Showroom*, Skripsi Sarjana tidak dipublikasikan, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- [22] Han, S.; Hong, T.; Kim, G.; and Lee, S. (2011), “Technical Comparisons of Simulation-Based Productivity Prediction Methodologies by Means of Estimation Tools Focusing on Conventional Earthmovings”, *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 17, No. 2, pp. 265 – 277.
- [23] Zayed, T. M. and Halpin, D. W. (2005), “Deterministic Models for Assessing Productivity and Cost of Bored Pile”, *Journal of Construction Management and Economics* (June 2005) 23, pp. 531 – 543.
- [24] Wignjosoebroto, S. (2008), *Ergonomi Studi Gerak dan Waktu Teknik Analisis untuk Meningkatkan Produktivitas Kerja*, Edisi Pertama Cetakan Keempat, Prima Ginting, Surabaya.
- [25] Dozzi, S. P. and AbouRizk, S. M. (1993), *Productivity in Construction*, National Research Council Ottawa, Ontario, Canada.
- [26] Park, H-S. (2006), “Conceptual Framework of Construction Productivity Estimation”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 311 – 317.
- [27] Rochmanhadi. (1985), *Perhitungan Biaya Pelaksanaan Pekerjaan dengan Menggunakan Alat-Alat Berat*, Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- [28] Caterpillar. (2012), *Caterpillar Performance Handbook*, Edition 42, Caterpillar Inc., Peoria, Illinois, U. S. A.
- [29] Robertson, P. K.; Campanella, R. G.; and Wightman, A. (1983), “SPT – CPT Correlations”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 11, pp. 1449 – 1459.