

PENINGKATAN DAKTILITAS *HOLLOW PILE* DENGAN PENAMBAHAN *RATIO SPIRAL* DAN BETON COR SETEMPAT

Jaka Propika¹ dan Jenny Caroline²

^{1,2} Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan FTSP

Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arief Rahman Hakim No.100 Surabaya, 60117

Email: jakapropika@gmail.com¹, j_carol@ymail.com²

ABSTRACT

The precast hollow pile is a type of pile which has been commonly used in Indonesia. According to SNI 03-1726-2012 Section 7.14.2.2.5, pile as part of the structure must exhibit ductile behavior to dissipate the amount of energy due to an earthquake. At one point, it is imperative to note that the major damage occurs at the transfer between fine soil and coarse soil, thereby an improvement must be considered. Regardless of this term, however, previous studies have shown the results and also concluded that hollow pile structure cannot undergo the ductile behavior. Therefore, this present work attempts to provide more insight into this structure to obtain the more ductile behavior which can meet the requirement as stated in the provision. This research was based on the prediction, both in analytical and numerical analyses, by using sectional design approach and finite element package ABAQUS and XTRACT. In this study, three types of hollow pile structural model were considered, namely Model 1 (control specimen), Model 2 (modified in increase of spiral volumetric ratio in maximum condition with regards to ACI and SNI), and Model 3 (additional filler inside the hollow section with concrete compressive strength of 67.8 MPa). The results highlighted that Model 2 had the improvement of displacement and curvature ductility by 82.1% and 96.84%, respectively, compared to the control specimen. On the other hand, Model 3 showed an increase in displacement ductility of 88.97% while curvature ductility of 137.15%. Based on overall results, it can be concluded that the utilization of filler concrete and the influence of spiral volumetric ratio can lead to the structural upgrade concerning ductility, although in fact, these improvements have not been able to satisfy the requirement in the provision.

Keywords: hollow pile, displacement, curvature, ductility

ABSTRAK

Precast hollow pile adalah jenis tiang pancang yang banyak digunakan di Indonesia, Berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 7.14.2.2.5, tiang pancang sebagai bagian dari struktur harus mampu berperilaku daktil dalam mendisipasi energi akibat beban gempa terutama pada peralihan lapisan tanah lunak dan tanah keras. Penelitian sebelumnya menyimpulkan bahwa *hollow pile* tidak dapat berperilaku daktil sesuai dengan ketentuan yang disyaratkan, oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan mendapatkan *hollow pile* yang mampu berperilaku daktil sesuai dengan yang disyaratkan. Metode penelitian ini, dilakukan dengan analisa perhitungan manual dan finite element dengan program Abaqus 6.10 dan Xtract 3.6. Model benda uji di bagi menjadi tiga, yaitu model 1 (model validasi eksisting), model 2 (*hollow pile* dengan *ratio volumetric spiral* maksimum ACI dan SNI), dan model 3 *hollow pile* dengan penambahan material beton cor 67.8 MPa didalam rongga. Pada hasil penelitian, model 1 menunjukan hasil yang hampir sama dengan hasil eksperimental sebelumnya. Sedangkan, model 2 terjadi peningkatan daktilitas *displacement* sebesar 82.1 % dan daktilitas kurvatur sebesar 96.84%, model 3 terjadi peningkatan daktilitas *displacement* sebesar 88.97 % dan daktilitas kurvatur 137.15%. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan material beton cor dan *ratio volumetric spiral* memberikan dampak yang baik pada peningkatan nilai daktilitas tetapi belum cukup untuk memenuhi persyaratan minimum yang disyaratkan dalam peraturan di Indonesia.

Kata kunci: Tiang Pancang Bulat Berongga, Daktilitas Simpangan, Kurvatur, Daktilitas.

PENDAHULUAN

Tiang pancang merupakan bagian konstruksi yang digunakan untuk meneruskan beban permukaan ke tingkat permukaan yang lebih rendah didalam masa tanah, di Indonesia penggunaan tiang pancang sudah umum digunakan terutama jenis tiang pancang *prestress* beton bulat berongga (*prestress hollow pile*). Sebagai negara yang memiliki potensi gempa besar seperti Indonesia, perlu

adanya suatu jaminan bahwa tiang pancang yang diproduksi oleh pabrikan Indonesia sudah memenuhi persyaratan minimum ketahanan oleh beban lateral gempa. Hal tersebut sesuai dengan peraturan SNI 03-1726-2012 yang menyebutkan bahwa *precast prestressed piles* (PPP) untuk bangunan dengan katagori desain *seismic* (KDS) D sampai dengan F harus memiliki kemampuan daktilitas oleh beban siklik gempa rencana selain di ujung atas *precast prestressed pile* (PPP) tetapi juga oleh perbedaan situasi tanah pada elevasi yang berbeda [1]. Oleh sebab itu perlu adanya suatu penelitian terhadap modifikasi tiang pancang jenis *hollow pile* dari segi kemampuan daktilitas penampang tiang, hal ini disebabkan pada penelitian terdahulu menyimpulkan bahwa *hollow pile* tidak mampu berperilaku daktilitas oleh beban gempa.

Penelitian ini bertujuan mengetahui tingkat layan tiang pancang *hollow pile* dari segi daktilitas defleksi, kelengkungan dan parameter lain penentu daktilitas, guna mendapatkan kondisi ideal perkuatan pada tiang pancang beton berongga yang sesuai dengan peraturan SNI 03-1726-2012. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan pertimbangan serta masukan positif bagi para produsen tiang pancang serta bagi pelaku industri konstruksi di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur untuk mengalami simpangan pasca *elastic* yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa diatas beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelepasan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur tersebut tetap berdiri, walaupun sudah berada dalam kondisi diambang keruntuhan (SNI 03-1726-2002).

Faktor daktilitas dinyatakan dalam *term displacement, rotation* ataupun *curvature* :

$$\mu\Delta = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1)$$

$$\mu\phi = \frac{\phi u}{\phi y} \quad (2)$$

$$\mu\theta = \frac{\theta u}{\theta y} \quad (3)$$

dimana $\mu\Delta$ adalah daktilitas defleksi/lendutan, Δu adalah displacemen pada keadaan batas post-elastis dan Δy adalah displacement pada keadaan leleh yang pertama.

Berdasarkan SNI 2847-03-2002 dan *the seismic loading in the New Zeland Loading Code for ductility Frame*, suatu struktur disyaratkan paling sedikit mempunyai *factor displacement ductility* = 4, sedangkan *the tentative provisions of the ACT for ductility frames* mensyaratkan minimal 7. Besarnya *lateral displacement* dihitung dengan teory momen area, dimana pada saat leleh pertama :

$$\Delta y = \frac{\phi_y \cdot L}{2} + \frac{2L}{3} = \frac{\phi_y \cdot L^2}{3} \quad (4)$$

Lateral displacement pada saat *ultimate*:

$$\Delta u = \Delta y + \phi_p \cdot \left(1 - \frac{l_p}{2}\right) \quad (5)$$

$$\Delta u = \frac{\phi_y \cdot L^2}{3} + (\phi_u - \phi_y) \cdot l_p \cdot \left(1 - \frac{l_p}{2}\right) \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} = 1 + \left(\frac{\phi_u - \phi_y}{\phi_y}\right) \cdot \frac{l_p \cdot (1 - 0.5 \cdot l_p)}{L^2/3} \quad (7)$$

$$\frac{\phi_u}{\phi_y} = 1 + \frac{L^2(\mu - 1)}{3l_p(L - 0.5l_p)} \quad (8)$$

dengan L = Tinggi tiang pancang, μ = displacement ductility, l_p = panjang sendi plastis

Analisa moment kurvature didasarkan pada pendekatan *Strain Compatibility – Force Equilibrium*, dimana analisa ini menggunakan teknik interaksi untuk mendapatkan nilai tinggi garis netral *KD* yang memenuhi *force equilibrium* [2].

Besarnya *Moment-curvature* ϕ dapat diperoleh dari :

Saat Crack:

$$M_{cr} = \frac{f_r I}{y_{bottom}} \quad (9)$$

$$\phi_{cr} = \frac{f_r / E_c}{y_{bottom}} \quad (10)$$

Saat leleh pertama :

$$M_y = A_s \cdot f_y \cdot jd \quad (11)$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d(1-k)} \quad (12)$$

Saat ultimate:

$$M_u = 0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (13)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cc}}{kd} \quad (14)$$

Daktilitas Curvature

$$\mu\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (15)$$

Dimana f_r = Modulus rupture, jd = jarak dari pusat gaya tekan tulangan dan beton ke pusat tarik, I = inersia penampang, ε_{cc} = regangan beton terkekang, kD = tinggi garis netral.

Besarnya moment dihitung dari penjumlahan momen akibat gaya-gaya yang ada pada penampang, yaitu :

a. Momen akibat baja pratekan

$$M_{sp} = A_{sp} \times f_{sp} \times di \quad (16)$$

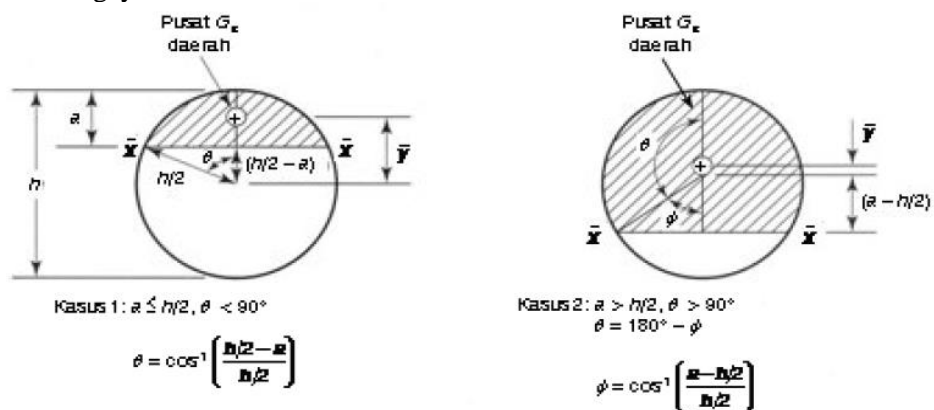
dengan A_{sp} = luas penampang baja pratekan, f_{sp} = adalah tegangan baja pratekan, dan di = jarak dari garis tengah penampang ke tendon pratekan.

b. Moment akibat baja lunak longitudinal

$$M_{sl} = A_{sl} \times f_{sl} \times di \quad (17)$$

dengan A_{sl} = luas penampang baja lunak longitudinal, f_{sl} = adalah tegangan baja lunak longitudinal, dan di = jarak dari garis tengah penampang ke tulangan lunak longitudinal.

c. Momen akibat gaya tekan beton



Gambar 1. Area Keruntuhan Beton Tiang Pancang.

Sehingga, momen yang terjadi akibat beton dirumuskan sebagai berikut:

$$M_c = 0.85 \cdot f'_c \cdot \bar{A}_c \cdot \bar{y} \quad (18)$$

Moment total untuk tiang pancang prestress beton berongga adalah:

$$M_u = M_{sp} + M_{sl} + M_c \quad (19)$$

Pemasangan tulangan pengekan pada tiang pancang berfungsi meningkatkan tegangan inti beton sebelum terjadinya keruntuhan, sehingga akan meningkatkan nilai daktilitas tiang pancang tersebut [3]. Tegangan beton terkekang dirumuskan:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (20)$$

Dimana, f'_{co} adalah kuat tekan beton tidak terkekang, dan f'_l adalah tekanan *effective lateral* yang digunakan di inti beton oleh baja pengekan saat tegangan leleh.

Desain Tulangan Pengekan Tiang

- a. SNI 03-2847-2002 pasal 23.4.4. *Rasio volumetric* tulangan spiral atau sengkang cincin, ρ_s tidak boleh kurang dari pada yang persamaan ini:

$$\rho_s = 0.12 f'_c / f_{yh} \quad (21)$$

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} \quad (22)$$

Dimana f_{yh} adalah kuat leleh tulangan transversal yang disyaratkan.

- b. SNI 03-1726-2012 pasal 7.14.2.25 pengekan untuk tiang prategang katagori desain *seismic* D sampai F harus memenuhi:

$$\rho_s = 0.25 \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1.0 \right) \left[0.5 + \frac{1.4 P}{f'_c A_g} \right] \quad (23)$$

Tetapi tidak boleh kurang dari

$$\rho_s = 0.12 \left(\frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left[0.5 + \frac{1.4 P}{f'_c A_g} \right] \quad (24)$$

- c. Jurnal PCI edisi September – Oktober 1983 [4]:

$$\rho_s = 0.45 \cdot \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f'_c A_g} \right) \quad (25)$$

Atau

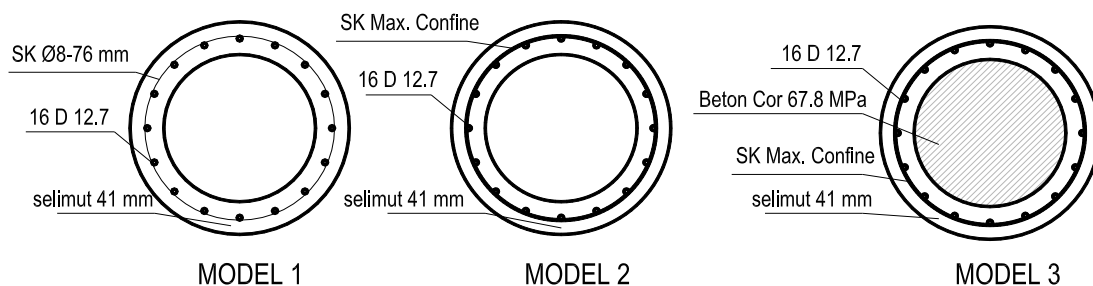
$$\rho_s = 0.12 \cdot \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f'_c A_g} \right) \quad (26)$$

METODOLOGI

Spesifikasi dan Pemodelan *Hollow Pile*

Permodelan benda uji sesuai dengan hasil ekperimental [5]:

Dimensi Luar	= 610 mm	<i>Tensile Load Strand</i>	= 18700 Kg
Dimensi Dalam	= 422 mm	<i>Spiral Wire</i>	= Ø8-76
Panjang Tiang	= 7310 mm	Mutu Baja Spiral	= 647 MPa
Mutu Beton	= 67.8 MPa	<i>Axial akibat prestress</i>	= 890 kN
Mutu <i>Strand</i>	= Ø 12.7 mm	Jarak perletakan sendi	= 0.605



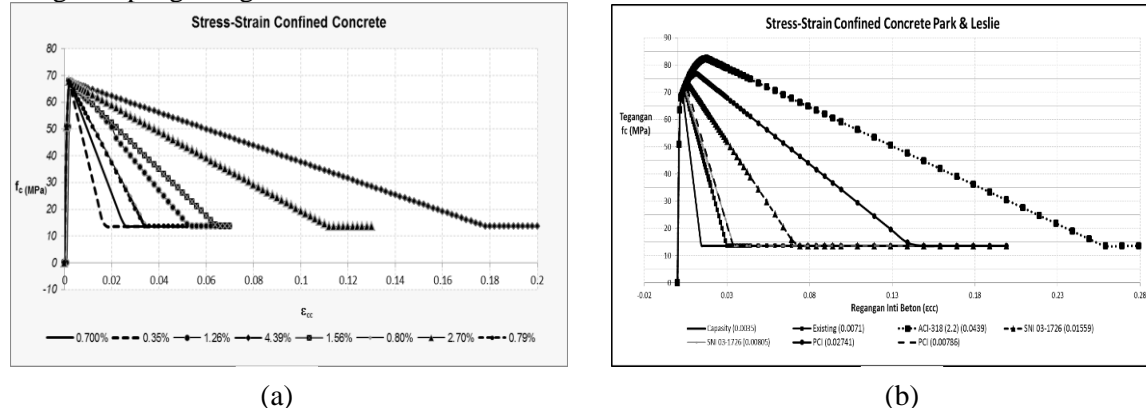
Gambar 2. Permodelan *Hollow Pile* Penelitian.

Pendefinisi Beban dan *Boundary Condition*

Hollow Pile dimodelkan dengan perletakan sendi-sendi dengan menggunakan pin penjepit pada jarak 0.605 m dari ujung tiang. Sementara beban axial diberikan sebesar 890 kN atau 10% pada kedua ujung *hollow* akibat gaya *prestress*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh pengekanan



Gambar 3. Hubungan Tegangan-Regangan dengan Metode Kent- Park dan Park - Leslie.

Pada gambar (a), Hubungan tegangan-regangan metode Kent-Park menunjukkan pengaruh penambahan ratio spiral terhadap peningkatan regangan pada hollow pile, sementara gambar (b) dengan Metode Park-Leslie menunjukkan pengaruh yang bervariasi terhadap peningkatan tegangan pada inti beton dan juga regangan yang dihasilkan.

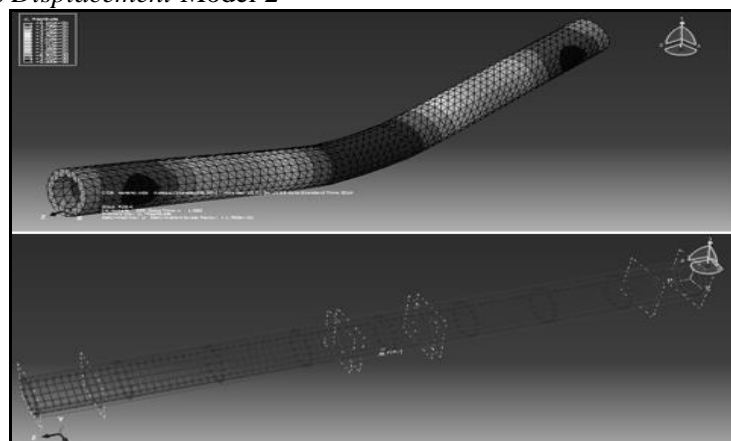
Daktilitas *Displacement*

a. Analisa Daktilitas *Displacement* Model 1

Nilai daktilitas displacement dihitung berdasarkan rumus (3) sampai (7). Hasil analisis manual prediksi *displacement* yang terjadi pada model 1 adalah sebesar:

$$\frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{55.41}{52.85} = 1.04 \quad (27)$$

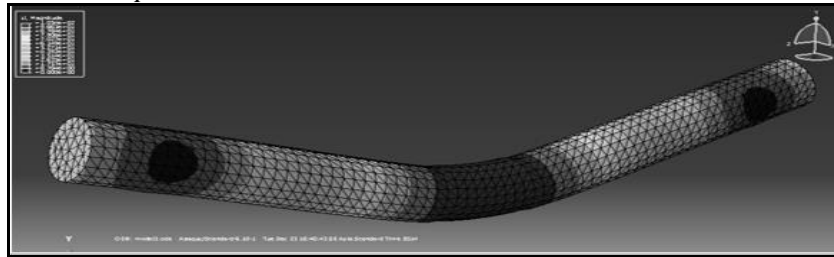
b. Analisa Daktilitas *Displacement* Model 2



Gambar 4. Analisa Permodelan dan Grafik *displacement* model 2

Berdasarkan gambar grafik 4 diatas, kondisi hollow pile mulai mengalami kelelahan pertama pada displacemen 45 cm, sedangkan untuk kondisi kelelahan ultimate masih berada diatas 100 mm.

c. Analisa Daktilitas *Displacement* Model 3



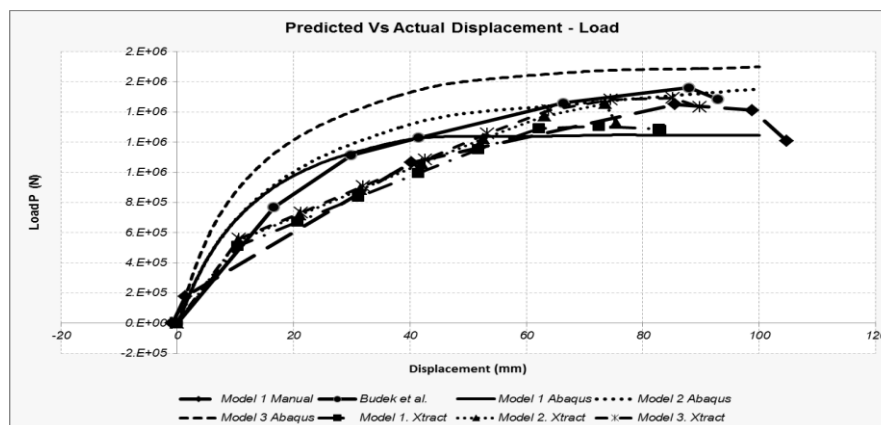
Gambar 5. Analisa Permodelan dan Grafik *displacement* model 3

Pada gambar 5, peningkatan daktilitas diikuti dengan peningkatan kekuatan *lateral force*. Pada model 3 kelelahan pertama terjadi saat *displacement* mencapai 45 mm dengan gaya lateral sebesar 2000 kN sementara kondisi *ultimate* terjadi lebih dari 100 mm.

Perbandingan Nilai Daktilitas *Displacement*

Tabel 1. Perbandingan Hasil Analisa Momen Kurvatur Model 1,2 dan 3 ABAQUS.

Node	Budek et al		Manual		Xtract M1		Xtract M2		Xtract M3	
	Load (P) N	Displacement mm	Load (P) N	Displacement mm	Load (P) N	Displacement mm	Load (P) N	Displacement mm	Load (P) N	Displacement mm
0	0	0.00	0	-0.82	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	768293	16.59	177449	1.41	509327	10.36	548390	10.51	558931	10.65
2	1114024	29.86	804229	40.49	673024	20.72	717093	21.02	730566	21.29
3	1229268	41.48	990072	68.42	836722	31.07	887083	31.53	907305	31.94
4	1459756	66.36	1123210	88.04	995707	41.44	1059005	42.04	1085321	42.60
5	1562195	87.93	1176501	109.28	1150390	51.79	1221698	52.56	1257381	53.25
6	1485366	92.90	1076114	123.40	1289707	62.15	1371727	63.08	1410300	63.87
7			877559	138.85	1304000	72.50	1456937	73.56	1482613	74.52
8			711350	157.02	1287024	82.85	1322790	75.45	1491333	85.17
9			572116	168.93	1278049	83.02			1433270	89.75



Gambar 6. Perbandingan *Analitycal Displacement vs Load*.

Berdasarkan gambar 6, dapat disimpulkan bahwa, kemampuan ber-*displacement hollow* mengalami penurunan dengan adanya penambahan *ratio volumetric spiral* dan penambahan material beton cor. Tetapi kapasitas beban lateral yang dapat di tanggung mengalami peningkatan.

Adanya penambahan *ratio volumetric spiral* dan penambahan material beton cor kedalam rongga, berdampak cukup efektif dalam meningkatkan nilai daktilitas *displacement hollow pile*, hal ini dapat ditunjukan juga pada gambar 4 permodelan ABAQUS.

Pada model 2 peningkatan daktilitas *displacement* yang terjadi sebesar 82.1%, Sedangkan pada model 3 peningkatan daktilitas *displacement* sebesar 88.97 % jika dibandingkan dengan hasil eksperimental [5].

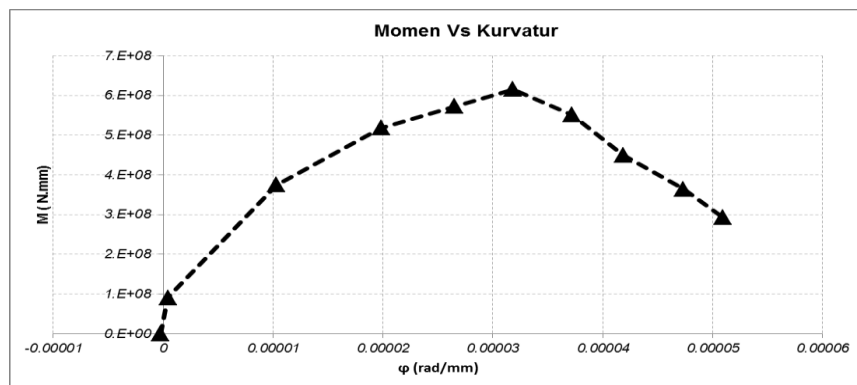
Perbandingan Daktilitas Kurvatur

Dalam analisa momen dan kurvatur penampang prestress, di perlukan setidaknya empat data kondisi penampang, yaitu saat penampang tiang pancang mengalami *decompression* akibat tegangan awal prestress, saat kondisi crack, leleh dan saat ultimate, analisa momen-kurvatur menggunakan rumus (6) sampai (12) dan juga dilakukan analisa try and error tiap peningkatan regangan 0.001 pada beton.

Tabel 2. Hasil Analisa Manual Daktilitas Kurvatur 0.001-0.008.

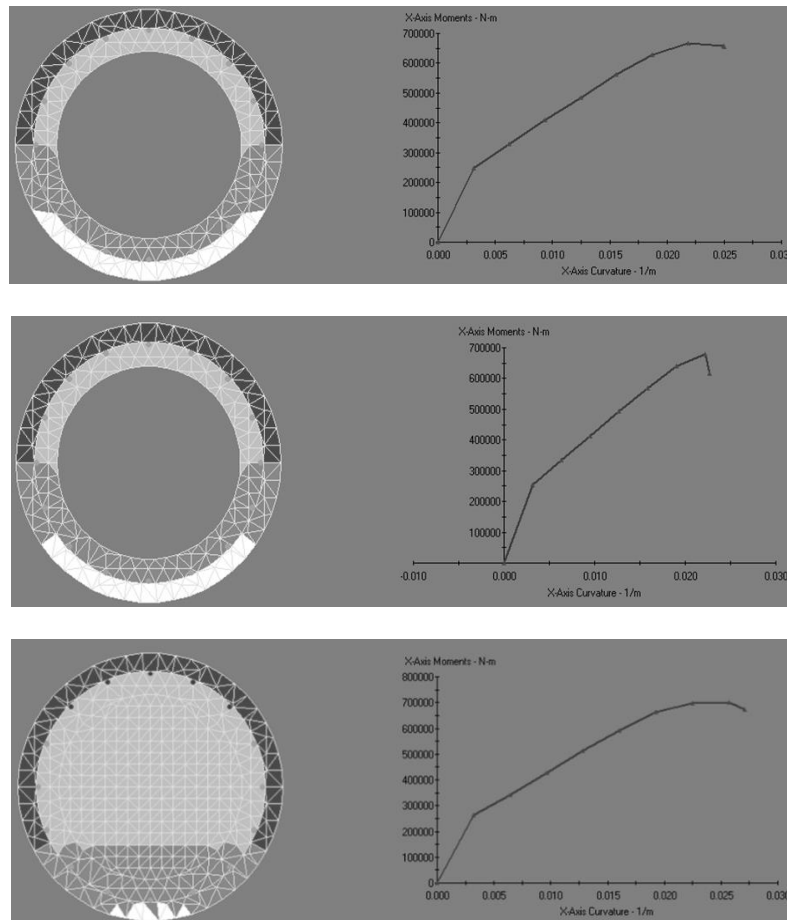
REGANGAN BETON SERAT ATAS					
	0.001	0.002	0.003	0.004	
Tinggi Garis Netral (mm)	96.99050018	100.9151651	113.0572807	125.7254981	
Moment (N.mm)	374476320.4	518094603.4	572393784.3	614961927.3	
Kurvature (Rad/mm)	1.03103E-05	1.98186E-05	2.65352E-05	3.18153E-05	

REGANGAN BETON SERAT ATAS					
	0.005	0.006	0.007	0.008	
Tinggi Garis Netral (mm)	134.44616	143.3746244	147.9133872	157.1330658	
Moment (N.mm)	551508388	449748857.4	364566897.2	293209205.2	
Kurvature (Rad/mm)	3.719E-05	4.18484E-05	4.7325E-05	5.09123E-05	



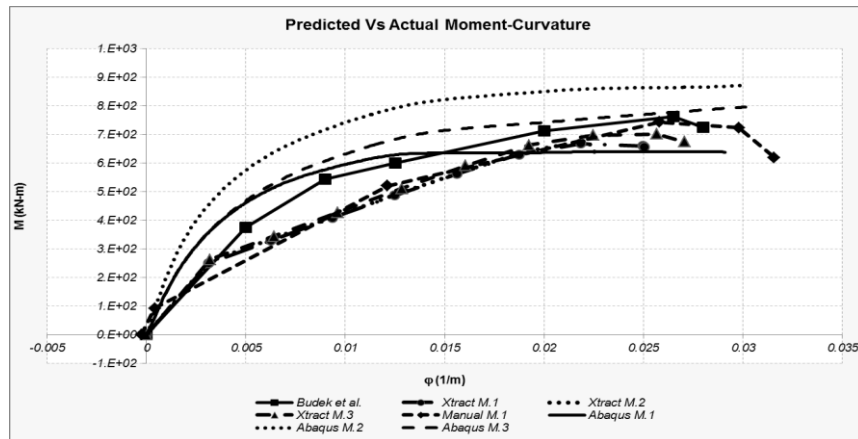
Gambar 7. Grafik Momen dan Kurvatur Analisa Perhitungan Manual.

Model Extract



Gambar 8. XTRACT Analisa Hubungan Momen dan Kurvatur Model 1,2 dan 3.

Berdasarkan hasil analisa dengan program EXTRACT, pada model 1, momen saat leleh pertama = 520.3 kN.m, kurvatur leleh = 0.01213 1/m, dan momen saat *ultimate* = 655 kN.m dengan kurvatur *ultimate* = 0.02502 1/m, sehingga didapatkan daktilitas curvature $\phi_u/\phi_y = 2.06$. Untuk model 2, moment saat leleh pertama sebesar 321.6 kN.m dengan kurvature 0.005603 1/m, dan moment saat *ultimate* sebesar 616.3 kN.m dengan kurvature sebesar 0.02274 1/m, sehingga didapatkan daktilitas kurvature = 4.058. Sedangkan untuk model 3, moment saat leleh pertama = 321.6 kN.m dengan kurvature = 0.005603 1/m, dan moment saat *ultimate* sebesar 829.9 kN.m dengan kurvatur sebesar 0.02317 1/m, sehingga didapatkan daktilitas curvature = 4,13.



Gambar 9. Perbandingan *Analitical* Momen dan Kurvatur.

Tabel 3. Perbandingan Hasil Analisa Momen Kurvatur Model 1,2 dan 3.

Analisis Momen (kN.m)						Persentase Perbandingan			
Kondisi	Manual	XTRATCT M.1	XTRATCT M.2	XTRATCT M.3	Budek et al	Manual	XTRATCT M.1	XTRATCT M.2	XTRATCT M.3
Leleh	519.64	520.30	321.6	321.6	550	5.52%	5.40%	41.53%	41.53%
Ultimate	748.76	655.00	616.3	673.6	725	3.28%	9.66%	14.99%	7.09%
Analisis Momen (kN.m)						Persentase Perbandingan			
Kondisi	Manual	XTRATCT M.1	XTRATCT M.2	XTRATCT M.3	Budek et al	Manual	XTRATCT M.1	XTRATCT M.2	XTRATCT M.3
Leleh	0.013062	0.012130	0.005603	0.005603	0.011	18.74%	10.27%	49.06%	49.06%
Ultimate	0.025974	0.025020	0.02274	0.02706	0.028	7.24%	10.64%	18.79%	3.36%
Daktilitas Kurvatur						Persentase Perbandingan			
Manual	XTRATCT M.1	XTRATCT M.2	XTRATCT M.3	Budek et al	Manual	XTRATCT M.1	XTRATCT M.2	XTRATCT M.3	
1.988586	2.062000	4.059000	4.83	2.545454	21.88%	18.99%	59.46%	89.75%	

KESIMPULAN

Hasil analisa tiang pancang *hollow pile eksisting* diameter 600 mm dengan menggunakan analisa manual, eksperimental, *finite element* Abaqus dan Xtract, menunjukan hasil *hollow pile eksisting* tidak dapat berperilaku daktail, hal ini ditunjukan dari nilai daktilitas kurvatur eksperimental sebesar 2.54, *analytical manual* sebesar 2.15 dan hasil analisa Xtract sebesar 2.062. sedangkan batas minimum yang disyaratkan dalam peraturan SNI maupun ACI adalah 4 untuk daktilitas *displacement* dan 16 untuk daktilitas kurvatur. Hasil perbandingan momen-kurvatur *predicted vs actual*, dapat di simpulkan bahwa peningkatan nilai daktilitas kurvatur akibat penambahan *ratio volumetric spiral* terhadap hasil eksperimental Budek et al adalah 96.84%, sedangkan peningkatan daktilitas kurvatur akibat penambahan material beton cor 67.8 MPa adalah 137.15%. Hal ini menunjukan bahwa penamban material beton cor kedalam rongga memberikan dampak lebih efektif jika di dibandingkan dengan penambahan *ratio volumetric spiral*. Hasil Perbandingan daktilitas *displacement* menunjukan adanya peningkatan daktilitas sebesar 82.1% pada model 2, Sedangkan pada model 3 peningkatan daktilitas *displacement* sebesar 88.97 % jika dibandingkan dengan hasil eksperimental Budek dkk. Hasil analisa keseluruhan ketiga model menunjukan bahwa modifikasi *hollow pile* dengan penambahan spiral dan material pengisi beton masih belum cukup memenuhi batas minimum yang disyaratkan oleh peraturan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Purwono, R.,Tavio.,Imran, I.,Raka, (2009) I.G.P., *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002) Dilengkapai Penjelasan (S-2002)*, ITSPRESS, Surabaya.
- [2] Ha, T.L., Sutono, R., (1986) "*Daktilitas Tiang Pancang Bulat Berongga*", Skripsi S1, no. 241 S, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya.

- [3] Tavio, Kusuma, B. (2010) “Studi Analisa Pengaruh Pengekangan Terhadap Kapasitas Interaksi P-M Tiang Pancang Prategang”, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 4 Sanur, Bali, Jurusan Teknik Sipil ITS*, Surabaya, Juni 2010.
- [4] Park, R., Falconer, T.J., (1982). “*Ductility of Prestressed Concrete Pile Under Seismic Loading*”, Department of Civil Engineering, University Of Canterbury Christchurch New Zealand. Research Report No. 82-6.
- [5] Budek, A.M, Benzoni, G., dan Priestley, M.J.N. (1997). “*Eksperimental Investigation of Ductility of In-Ground Hinges in Solid and Hollow Prestressed Piles*”, Division of Structural Engineering University of California, San Diego La Jolla California, Report No. SSRP 97/17.