

PERILAKU CANGKANG TIPIS KOMPOSIT BAMBU BETON DENGAN PEMBEBANAN LENTUR

Bhondana B.B. Kridaningrat
Sri Murni Dewi
Achfas Zacoeb

Abstrak: Struktur cangkang umumnya menggunakan tulangan baja untuk kekuatan dan daktilitas. Penggunaan komposit anyaman bambu dapat digunakan sebagai alternatif tulangan pada struktur cangkang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan kapasitas beban dari cangkang yang berukuran (120 x 60) cm dengan sudut lengkung 54 derajat dengan variasi jarak tulangan bambu yaitu 10, 8, dan 6 cm. Masing-masing tiga benda uji, dan menggunakan model struktur cangkang 1 arah. Pembebanan dengan menggunakan beban garis pada 3 lokasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cangkang tipis dengan menggunakan variasi jarak tulangan bambu, tak terlihat adanya pengaruh yang signifikan. Simpulan yang dapat diambil bahwa dalam struktur cangkang bekerja gaya tekan penuh, tulangan hanya bekerja sebagai pengekang.

Kata-kata kunci: cangkang, bambu, komposit

Abstract: Thin Shell Behavior of a Concrete Bamboo Composite With Bend Loading. Shell structure is usually reinforced by steel for its strength and ductility. A woven-bamboo composite can be used as an alternative reinforcement on a shell structure. The purpose of this study was to compare the load capacity of the shell that has a size of (120 x 60) cm with a curve corner of 54 degree and bamboo bars spacing variation of 10, 8, and 6 cm. Each variation has three testing specimens, and uses one-way shell structure model. The load was set 3-points line-load. The result of study show that varying bamboo reinforcement space results in no significant difference between each thin shell. The conclusion is when the shell structure works in a full compression, the reinforcement functions as a confinement only.

Keywords: shell, bamboo, composite

Beton dibentuk oleh pengerasan campuran semen, air, agregat halus, agregat kasar, udara, dan kadang-kadang campuran bahan tambahan lainnya. Campuran yang masih plastis ini dicor ke

dalam acian dan dirawat untuk mempercepat reaksi hidrasi campuran semen-air, yang menyebabkan pengerasan beton. Bahan yang terbentuk ini mempunyai kekuatan tekan yang tinggi, dan ketahan-

Kridaningrat, Bhondana B.B. adalah Mahasiswa PPs Universitas Brawijaya Malang; Sri Murni Dewi dan Achfas Zacoeb adalah Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Alamat Kampus: Jl. Veteran Malang.

an terhadap tarik rendah, atau kira-kira kekuatan tariknya 0,10 kali kekuatan terhadap tekan. Maka penguatan tarik dan geser harus diberikan pada daerah tarik dari penampang (Nawi, 1998).

Bambu tersedia dalam jumlah yang cukup banyak dan harganya juga relatif lebih murah dibandingkan dengan kayu maupun baja. Bambu memiliki kuat tarik yang tinggi terhadap lentur pada arah lateral, maka dapat digunakan menjadi komposit dengan beton. Dengan kuat tarik yang tinggi maka bambu secara efektif dapat digunakan sebagai bahan bangunan yang andal, bambu dengan bahan beton sudah lama diupayakan dan diteliti (Dewi, 2005).

Dengan memberikan tulangan anyaman bambu pada cangkang komposit ini maka diharapkan anyaman bambu akan berfungsi sebagai tulangan pada saat cangkang mengalami lendutan. Lapisan anyaman bambu akan berperan serta dalam menahan lendutan yang terjadi bersama-sama dengan beton diharapkan akan menambah daktilitas dan kekuatan dari cangkang tersebut. Sehingga keruntuhan yang terjadi tidak membahayakan. Sifat fisik bambu adalah mempunyai banyak serat. Serat-serat inilah yang mempunyai pengaruh terhadap besarnya gaya normal yang dapat ditahan oleh bambu. Menurut penelitian para ahli, bambu memiliki tegangan tarik yang cukup besar terutama pada bagian kulitnya. Morisco pada tahun 1994-1999 melakukan penelitian kekuatan tarik beberapa jenis bambu. Hasil pengujian seperti yang tercantum pada Tabel 1.

Dinas Penelitian Masalah Bangunan (DPMB) melakukan penelitian sifat mekanika bambu pada tahun 1984, salah satunya adalah penelitian Modulus elastisitas bambu seperti pada Tabel 2. Pengujian dilakukan dengan bambu Apus, bambu Temen, dan bambu Petung. Bambu yang digunakan yang baik dan bebas cacat, berumur lebih dari tiga tahun, tinggi bambu

± 12 m. Dalam penelitian ini digunakan data kuat tarik bambu apus dengan buku, yaitu 55 Mpa dan modulus elastisitasnya sebesar 4.467 MPa. Yang akan digunakan datanya untuk analisis numeris menggunakan program komputer.

Tabel 1. Kuat Tarik bambu

Jenis Bambu	Tanpa Buku (MPa)	Dengan Buku (MPa)
Bambu Ori	291	128
Bambu Petung	190	116
Bambu Wulung	166	147
Bambu Legi	288	126
Bambu Tutul	216	74
Bambu Apus	151	55

(Sumber: Morisco, 1996)

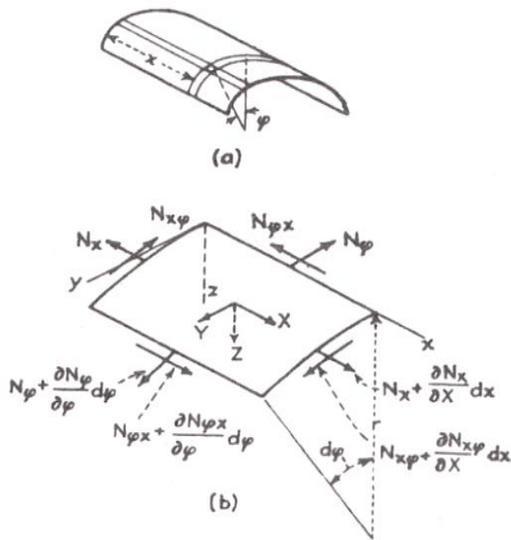
Tabel 2. Modulus Elastisitas Bambu

Jenis Bambu	E_{bambu}	
	Dengan Buku	Tanpa Buku
Apus	4.467	7.796
Temen	9.193	2.435
Petung	12.533	18.989

(Sumber: Morisco, 1996)

Cangkang beton merupakan sebuah bidang lengkung yang lebar, cangkang memiliki ketebalan yang jauh lebih kecil dan memberikan kekakuan yang lebih besar jika dibandingkan dengan dimensi struktur yang lain. Struktur ini banyak digunakan dalam bidang teknik sipil, misalnya pada struktur arsitektural, atap (*arc*), jembatan, bendungan tinggi, kubah, anggar, dan sebagainya (Tedesko, 2004).

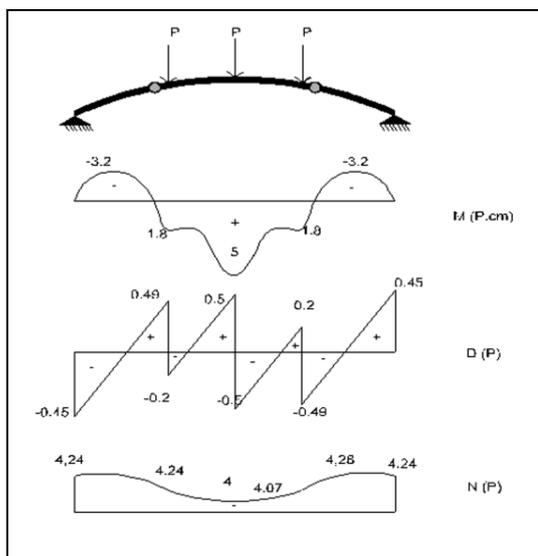
Dalam pembahasan cangkang silindris kita dapat melihat potongan sepanjang dx dan selebar dy dari cangkang terhadap penampang keseluruhan geometri (a) dan divisualisasikan juga skema gaya-gaya yang terjadi pada potongan tersebut (b) dan kita anggap bahwa rusuk cangkang tersebut horisontal dan sejajar terhadap sumbu x seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Gaya pada Penampang Cangkang

(Sumber: Thimosenko dan Krieger, 1959)

Cangkang silindris yang dibebani secara simetris terhadap sumbunya. Dalam penerapan praktis, sering dihadapkan pada permasalahan cangkang silindris yang bundar dan mengalami pembebanan gaya yang terbagi rata terhadap sumbu silindrisnya. Dengan menggunakan persamaan matematis dan statika sederhana untuk mengetahui kelengkungan dari cangkang dan reaksi tumpuan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Statika pada Cangkang

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku struktur cangkang tipis komposit beton-bambu pracetak pada skala eksperimental, dan pengaruh variasi jarak tulangan anyaman bambu terhadap kekuatan struktur cangkang tipis komposit beton-bambu pracetak.

METODE

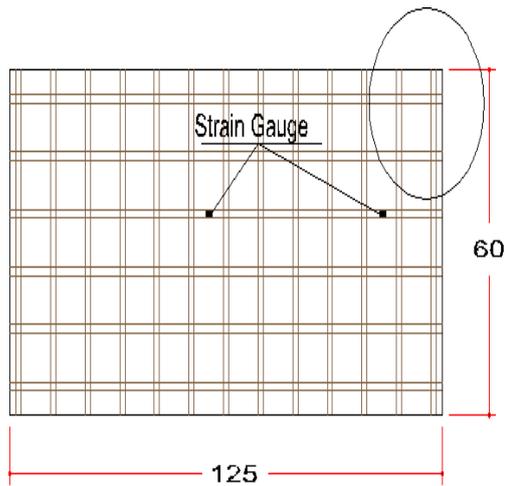
Model Eksperimen Cangkang

Jumlah benda uji dalam penelitian ini adalah 9 (sembilan) unit yang terdiri dari 3 (tiga) buah cangkang tipe A dengan jarak tulangan bambu 10 cm, 3 (tiga) buah cangkang tipe B dengan jarak tulangan bambu 8 cm, dan 3 (tiga) buah cangkang tipe C dengan jarak tulangan bambu 6 cm.

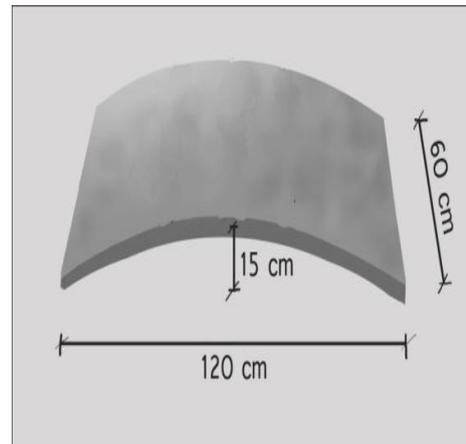
Masing-masing benda uji terdiri dari cangkang beton dengan tebal 2 cm diberi tulangan bambu dalam dua arah x dan y yang berada di tengah penampang cangkang (tulangan tengah) dan dengan luas per lajur tulangan bambu yaitu sebesar 1,5 x 0,2 cm, $f_{sb} = 55$ MPa modulus elastisitas searah serat bambu sebesar 4.467 MPa. Hasil penelitian yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis menggunakan ANOVA satu arah. Pemodelan benda uji menggunakan tulangan anyaman bambu seperti terlihat pada Gambar 3.

Setting Up Eksperimen

Pada setiap tipe variasi cangkang (*shell*) dipasang *DG* (*Dial Gauge*) dengan jumlah dan letak yang sama, dan dengan penumpuan sederhana. Penentuan jumlah dan letak *DG* didasarkan pada hasil pemodelan awal struktur dengan program bantu. Hasil dari pemodelan tersebut menampilkan perilaku deformasi struktur jika dibebani, *DG* dipasang pada titik-titik yang dapat merepresentasikan perilaku struktur yang terdeformasi. Pemberian beban, kondisi tumpuan, jumlah, dan posisi *DG* pada cangkang tampak samping dan atas dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



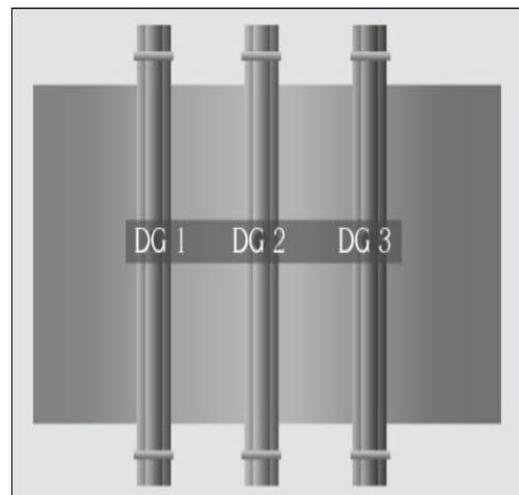
(a) Penulangan dan Posisi *Strain Gauge*
 Gambar 3. Benda Uji Cangkang



(b) Pemodelan 3 Dimensi



Gambar 4. Rancangan Eksperimen

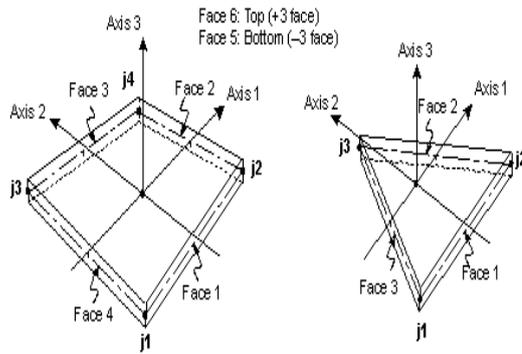


Gambar 5. Tampak Atas Pembebanan

Analisis Numeris Cangkang (*Shell*) dengan *Numerical Analysis Program (NAP)*

NAP merupakan salah satu program komputer berbasis elemen hingga untuk keperluan analisis dan desain suatu struktur. Elemen *shell* digunakan untuk menganalisis (evaluasi) struktur yang kurang baik jika dimodelkan dengan elemen *frame*, sebagaimana elemen *shell* dapat disederhanakan menjadi elemen *membrane*, *plate* dan *shell* (Wiryanto, 2005).

Penyusunan elemen *shell* ditentukan dari titik nodal yang dihubungkan. Jika dipakai empat nodal (j_1 , j_2 , j_3 , dan j_4) maka akan menjadi elemen *Quadrilateral* (segi-empat). Sedangkan jika tiga titik nodal (j_1 , j_2 , dan j_3) maka akan menjadi elemen *Triangular* (segi-tiga). Seperti terlihat pada Gambar 6. Adanya dua bentuk elemen tersebut akan memungkinkan elemen-elemen yang digunakan dalam pembuatan model struktur 2D dapat saling terhubung pada nodal-nodalnya.



(a) *Quadrilateral* (b) *Triangular*

Gambar 6. Pemodelan Numeris Cangkang

(Sumber: Wiryanto, 2005)

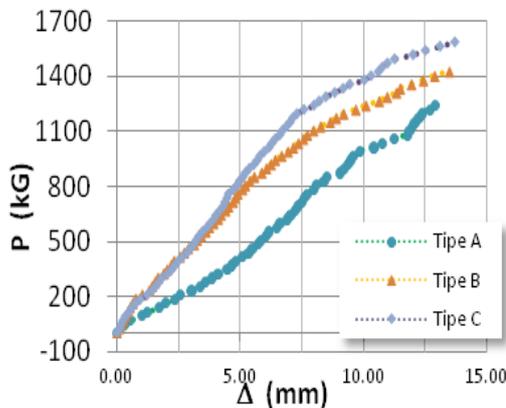
Variabel Penelitian

Variabel bebas (*independent variable*), yaitu jarak *tulangan bambu*, dan beban tahap. Variabel terikat (*dependent variable*), yaitu beban batas, beban retak, lendutan, regangan, dan pola retak.

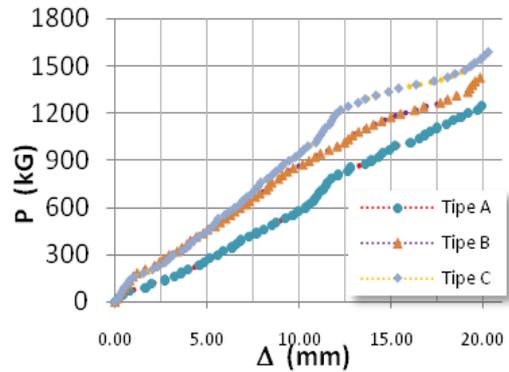
HASIL

Hasil Eksprimen

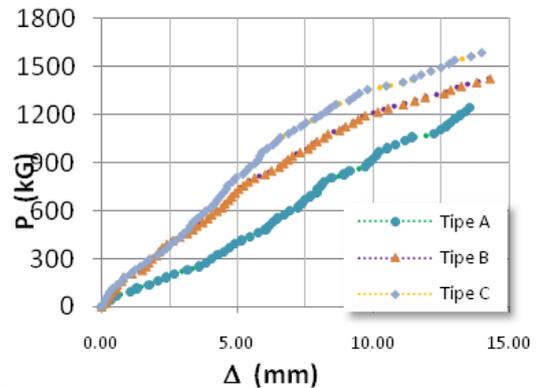
Pengujian cangkang dilakukan dengan menggunakan 3 buah *dial gauge* yang diletakkan seperti pada Gambar 6. Maka grafik hubungan beban (P) dan lendutan (Δ) pada cangkang dapat dilihat pada Gambar 7, 8, dan 9.



Gambar 7. Perbandingan Grafik Beban dan Lendutan Rerata DG1



Gambar 8. Perbandingan Grafik Beban dan Lendutan Rerata DG2



Gambar 9. Perbandingan Grafik Beban dan Lendutan Rerata DG3

Dari Gambar 7, 8, dan 9, dapat diketahui bahwa beban maksimum dari cangkang tipe A sebesar 1242 kg, tipe B sebesar 1380 kg, dan tipe C sebesar 1530 kg, dengan $f'c$ sebesar 27,10 MPa, maka tidak begitu memberikan perbedaan yang signifikan pada beban maksimum di setiap variasi cangkang, sedangkan lendutan di $P = 966$ kg pada setiap variasi cangkang dapat dilihat pada Tabel 3.

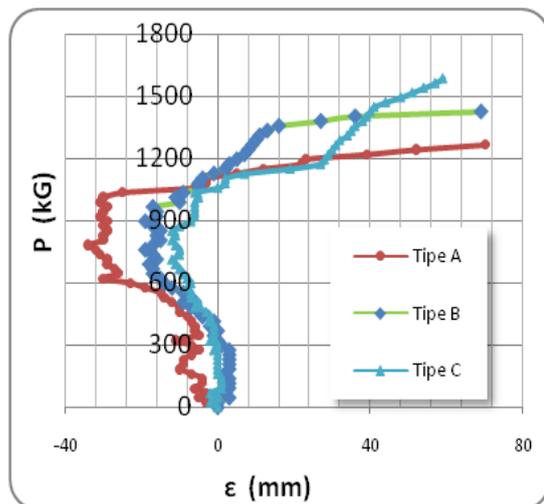
Tabel 3. Lendutan Cangkang Rerata di $P = 966$ kg

DG	Tipe Cangkang		
	A	B	C
1	9,60	6,70	5,80
2	14,70	11,30	10,50
3	10,20	7,31	5,95

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan nilai lendutan dari setiap variasi cangkang, berarti bahwa angka tulangan berpengaruh pada stabilitas cangkang.

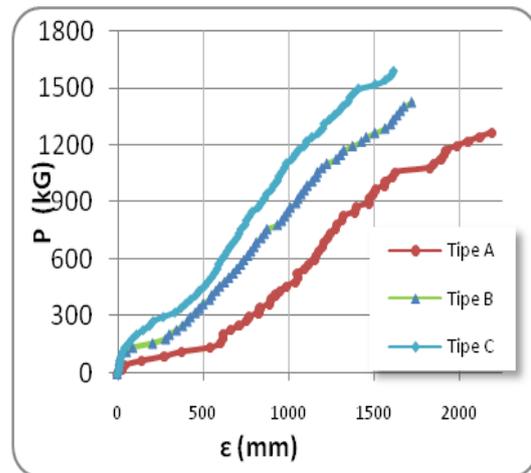
Hubungan Beban dan Regangan

Perbandingan yang dapat diamati yaitu antara variasi jarak tulangan bambu 10 cm (tipe A), 8 cm (tipe B), dan 6 cm (tipe C). Grafik perbandingan beban (P) dan regangan (ϵ) setiap variasi cangkang pada regangan ujung dan tengah sesuai dengan Gambar 4 (a) dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11.



Gambar 10. Grafik Hubungan Beban dan Regangan Ujung Cangkang

Gambar 10 menunjukkan bahwa pada ujung terjadi regangan tarik 0-400, regangan tekan 400-1100 kg. Pada regangan tarik dengan pembebanan 1100 keatas hingga terjadi runtuh. Gambar 11 menunjukkan bahwa pada regangan tengah dan bertambah secara proporsional pada beban 0-140 kg. Regangan semakin meningkat sampai retak awal pada beban 140-400 kg, Regangan kembali stabil pada beban 400-1200 kg, dan meningkat hingga runtuh.



Gambar 11. Grafik Hubungan Beban dan Regangan Tengah Cangkang

Hubungan Jarak Tulangan Bambu, Lendutan dan Kapasitas Beban

Analisis statistik dengan menggunakan ANOVA satu arah dapat dilihat pada Tabel 4 dan 5.

Tabel 4. Analisis pada Lendutan di P = 966 kg

SK	DB	(JK)	(KT)	f.h	F.t
Variasi	3	29,90	14,90	2,10	3,50
Galat	9	43,80	7,30		

Tabel 5. Analisis pada Beban Maksimum

SK	DB	JK	KT	f.h	F.t
Variasi	3	102038	51,10	2,50	3,50
Galat	9	120377	20,10		

Pada Tabel 4 menunjukkan hasil analisis lendutan cangkang dengan f_{hitung} lebih kecil daripada F_{tabel} maka dapat diinterpretasikan tidak ada pengaruh variasi jarak tulangan bambu terhadap lendutan cangkang. Tabel 5 menunjukkan bahwa f_{hitung} lebih kecil daripada F_{tabel} , maka dapat diinterpretasikan tidak ada pengaruh yang signifikan variasi jarak tulangan bambu terhadap beban maksimum pada cangkang.

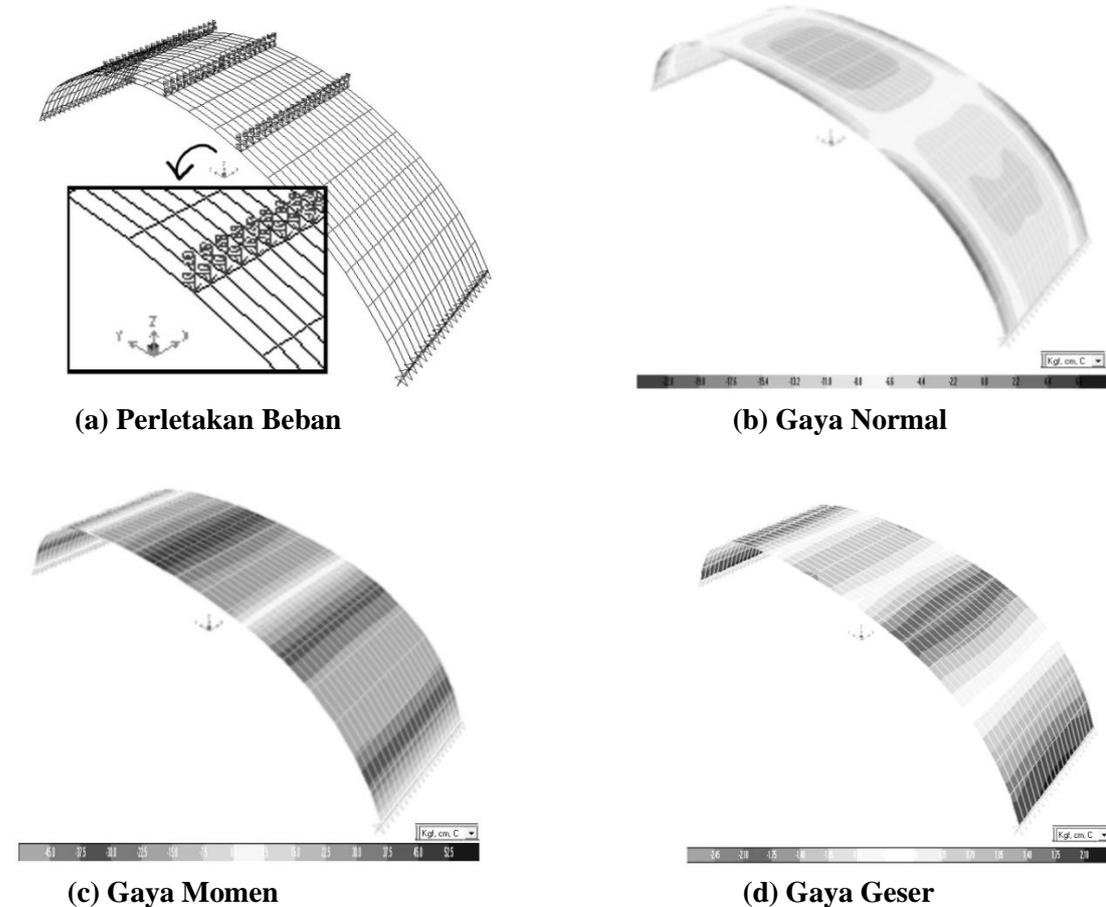
Hasil Analisis Numeris

Beban maksimum dari hasil eksperimen dan menghasilkan lendutan tertentu, dibandingkan dengan beban analisis numeris menggunakan perangkat lunak *Numerical Analysis Program (NAP)*. Pemodelan dan hasil perhitungan numerik, dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 12.

Pada analisis numeris digunakan dengan beban tahap seperti pada pembebanan pada eksperimen, dan hasil dari lendutan maksimum secara numeris pada pembebanan maksimum terlihat pada Tabel 6, maka terlihat adanya perbedaan yang signifikan terhadap perbandingan hasil dari eksperimen dan numeris dengan rasio antara hasil numeris dibanding eksperimen

Tabel 6. Perbandingan Rerata Maksimum Hasil Eksperimen dan Analisis Numeris

TIPE Cangkang	P maks (kG)	Δ (mm)								
		DG1			DG2			DG3		
		Eks	Numerik	Rasio	Eks	Numerik	Rasio	Eks	Numerik	Rasio
Type A	1242	13,03	7,35	0,56	20,17	10,75	0,53	13,63	7,35	0,54
Type B	1380	12,98	6,95	0,54	20,33	10,12	0,50	13,85	6,95	0,50
Type C	1530	13,36	6,4	0,48	20,60	9,88	0,48	14,17	6,40	0,45



Gambar 12. Diagram Gaya dan Lendutan Hasil Analisis Numerik

men minimum sebesar 0,45 yaitu pada pada DG3 cangkang tipe C. Pada Gambar 12 terlihat pola pembebanan dan sistem *meshing area* (a) serta skema diagram gaya dan pola deformasi pada hasil numeris cangkang bambu-beton komposit menggunakan perangkat lunak NAP, di mana terdapat interaksi gaya momen (lentur) positif maksimum di tengah bentang bawah cangkang dan maksimum negatif di perempat bentang (b), serta gaya tegak lurus sumbu cangkang (c), dan gaya tekan searah sumbu cangkang (d), di mana gaya normal tekan lebih dominan dikarenakan struktur berperilaku tekan penuh, sesuai prediksi secara teoritis seperti pada Gambar 12.

Pola Retak Cangkang

Pada setiap variasi cangkang (tipe A, sampai tipe C), memiliki pola retak dan retak awal (*initial crack*) yang hampir serupa seperti terlihat pada Gambar 13.

Pada Gambar 13 terlihat pola retak dimulai dari bagian tengah bawah cangkang



(a) Tampak Bawah Cangkang

yang berada di $\frac{1}{4}$ penampang cangkang di kiri dan kanan, dan mulai mengarah pada keretakan tekan, dimana retak tersebut mulai mengarah ke daerah tumpuan (b).

PEMBAHASAN

Anton Tedekso dan beberapa peneliti-an serta disainnya mengenai struktur cangkang beton untuk atap anggar, gudang, dan aula pasar menegaskan efektifitas penggunaan struktur cangkang yang sangat luar biasa dan telah diterapkan di berbagai konstruksi di dunia, serta dibuktikan dalam penelitian ini, beliau juga menegaskan bahwa penggunaan struktur cangkang dengan perbedaan biaya yang tidak signifikan dibandingkan struktur pelat, dapat memberikan kekakuan yang lebih besar serta aplikasinya di lapangan yang dinilai tak begitu sulit dan kompleks, maka struktur cangkang adalah inovasi yang brilian di dunia akonstruksi dunia (Tedekso, 1950).



(b) Tampak Samping Cangkang

Gambar 13. Pola Retak Cangkang

kang tepat di titik dial gauge 2 diletakkan (a). Retak awal ini merupakan retak lentur atau tarik di mana kekuatan struktur sepenuhnya masih dipikul oleh beton tarik, pada tahap pemberian beban berikutnya sampai mencapai $\frac{2}{3}$ beban puncak, keretakan tarik semakin banyak dan panjang, lalu terjadi retak di bagian atas cangkang

Dari hasil eksperimen ini, dengan menggunakan struktur cangkang dengan tebal 2 cm dan panjang bentang 120 cm serta penyetaraan dari penelitian Tedekso, 2004. yang memiliki tebal 13 cm dengan panjang bentang 10 m, maka terbukti bahwa struktur cangkang memiliki kekuatan yang lebih besar yaitu dengan

beban lentur (P) berkisar antara 1300 sampai 1500 kg dibandingkan dengan pelat yang hanya memberikan beban vertikal batas sebesar 100 sampai dengan 200 kg dengan ketebalan dan bentang yang sama (Bhondana, 2005).

Dari hasil pengamatan lendutan cangkang pun menunjukkan hasil yang menjanjikan pada penelitian ini dimana cangkang tidak retak selama masih bersifat elastis, walau pun telah mencapai beban batasnya lendutan yang dihasilkan masih dapat diterima, sama halnya pada penelitian oleh *Dyckerhoff* dan *Widmann* (1935) yang telah mendisain penelitian paling inovatif di eranya pada tahun 1950. Dari Gambar 7 sampai dengan 9 yang menunjukkan hubungan beban dan lendutan pada cangkang silindris yang juga merepresentasikan hubungan momen dan kelengkungan (*moment curvature*) data hasil eksperimen ini dapat dilihat bahwa perilaku struktur cangkang tidak jauh berbeda dengan hasil uji yang dilakukan *Polak* dan *Vecchio* (Gambar 10) yang dalam pembahasannya menjelaskan bahwa cangkang memiliki sifat statis tidak tentu tingkat tinggi dan memiliki lebih dari satu orde keruntuhan maka dari gambar hubungan antara momen dan kelengkungan terlihat adanya perkuatan lagi setelah retak dan pada kondisi stabilitas orde yang lebih tinggi, dan dari hasil analisa numeris yang menggunakan program *NAP* menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan hasil eksperimen dan analisis *Polak* dan *Vecchio* dikarenakan cangkang memberikan perilaku lentur, dan *NAP* hanya dapat menganalisis struktur dalam kondisi elastis, maka perlu digunakan model kekakuan tarik (*tension stiffening model*) yang dikembangkan untuk menganalisis perilaku membran terhadap beban lentur (*Polak and Vecchio, 1994*).

Pengaruh angka tulangan dan luasan tulangan pada struktur cangkang tidak menunjukkan angka yang signifikan, ter-

bukti dari data penelitian secara statistik terlihat pada Tabel 4 dan 5, maka banyak penelitian dan analisis numerik tidak memperhitungkan angka dan luasan tulangan serta hal ini juga dibuktikan dari beberapa penelitian dan analisis teoritis para peneliti sebelumnya maka diperoleh simpulan bahwa cangkang memiliki perilaku struktur tekan dan lentur sekaligus dan terlihat pula dari perilaku retak pada cangkang, memberi cangkang dalam pembebanan lentur memberikan perilaku tekan (*membrane*) lebih dominan dan tertekuk pada orde ke tiga (Tedesko, 2004).

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan dari penelitian ini yaitu: (1) setiap tipe cangkang pracetak bambu komposit, memiliki nilai hubungan beban dan lendutan yang sama, yaitu setelah retak pertama cangkang mengalami penurunan kekuatan, setelah itu kembali menguat pada pembebanan berikutnya hingga retak kedua dan seterusnya, dan cangkang tertekuk pada orde ke tiga; dan (2) dari hasil eksperimen dan analisis statistik tidak terlihat adanya pengaruh yang signifikan dari variasi jarak tulangan terhadap kekuatan cangkang komposit beton-bambu, hal ini membuktikan bahwa beton bekerja sepenuhnya dan akan lebih baik menggunakan beton mutu tinggi.

Dapat disarankan dalam penelitian selanjutnya: (1) menggunakan tipe dan jenis cangkang yang lain; (2) menggunakan beton mutu tinggi, sehingga dapat dibandingkan seberapa signifikan perbedaannya dengan menggunakan beton mutu biasa; (3) menggunakan struktur cangkang dua arah yang diharapkan dapat lebih memberikan informasi mengenai perilaku cangkang; (4) memperhitungkan karakteristik agregat, dan (5) menggunakan asumsi yang lebih tepat pada analisis numerik.

DAFTAR RUJUKAN

- Bhondana, B. 2010. *Pengaruh Variasi Jarak Shear Conector dan Proporsi Campuran terhadap Kapasitas Lentur Pelat Lapis Gedek dengan Menggunakan Agregat Kasar Limbah Beton*. Skripsi tidak diterbitkan. Malang: Universitas Brawijaya Malang.
- Dewi, S. 2005. *Perilaku Pelat Lapis Komposit Bambu Spesi Pada Beban in-Plane dan Beban Lentur*. Disertasi tidak diterbitkan. Surabaya: Program Pascasarjan Institut Teknologi Surabaya.
- Dyckerhoff & Widmann. 1935. *Verzeichnis Der Ausgefuehrten Schalenbauten*. Princeton Tedesco Archive, New York: Princeton.
- Morisco. 1996. *Bambu sebagai Bahan Rekayasa*. Yogyakarta: Fakultas Teknik Sipil dan Arsitektur UGM.
- Nawi, E.G. 1998. *Beton Bertulang, suatu Pendekatan Dasar*. Terjemahan Bambang Suryoatmono. Bandung: PT Refika Aditama.
- Polak, M.A. & Vecchio, F.J. 1994. Reinforced Concrete Shell Element Subjected to Bending and Membrane Load. *ACI JOURNALS*, 91: 262-268.
- Tedesko, A. & Tedekso, A. 2004. The Introduction of Thin Shell Concrete Roof in United States. *ASCE JOURNALS*, 130 (11):1639-1650.
- Timoshenko, S.P. & Krieger, S.W. 1959. *Theory Plates and Shells*. McGraw Hill Kogakusha, Ltd.
- Wiryanto, D. 2005. *Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan SAP 2000*. Jakarta: Elex Media Komputindo.