

Evaluasi kelayakan struktur rangka kuda-kuda berbahan dasar pipa PVC untuk HUNTARA

Rifat Syauqi Hazairin¹, Mochamad Teguh^{1*}

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, D.I. Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Feasibility evaluation
Truss structure
PVC pipe
Temporary Shelter
(Huntara)

Abstract

Indonesia is a country that has a high risk of natural disasters because it is located on the Pacific Ring of Fire, which is the most seismically and volcanically active region in the world, where more than 75% of volcanic activity occurs. This condition makes the government continue to strive to create temporary shelters because it is a human need. Because of the urgency of these temporary houses, it is necessary to have an alternative solution for constructing them with low prices, readily available materials, and resistant to earthquakes. PVC pipe is one of the alternative materials that can be used for this temporary house. This research tests part of the building structure, focusing on the truss structure. Before starting the truss testing, axial and flexural strength testing is required. The average axial test of both specimens was 36.16 kN. The flexural strength test was divided into two length variations, i.e., 1 and 2 meters. The average maximum load of 4.145 kN was achieved by the 1-meter pipe length. Meanwhile, the lesser load of 2.12 kN occurred by the span of 2-meter pipe length. Two different models of the truss structure were tested while undergoing numerical analysis. Based on the tests, models 1 and 2 can receive loads up to 14,433 kN and 10.71 kN, respectively. In the numerical analysis aimed at verifying the laboratory test results, model 1 reached appropriate results, but model 2 produced satisfactory results due to eccentricity problems.

Corresponding Author:

Mochamad Teguh
m.teguh@uui.ac.id

Copyright © 2024 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

Indonesia merupakan salah satu negara, yang memiliki kerentanan tinggi terhadap kejadian bencana alam, seperti: gempa, tsunami, dan erupsi gunung berapi. Potensi kejadian bencana alam ini menjadi konsekuensi logis, karena secara geografis Indonesia terletak pada jalur cincin api pasifik, yang merupakan area di muka bumi ini, yang paling aktif secara seismik dan lebih dari 75% merupakan kejadian kegiatan vulkanik (USGS, 2001). Mengingat tingkat kerawanan terhadap bencana alam, yang cukup tinggi, maka

pemerintah Indonesia sebagai pemangku kepentingan bertanggung jawab terhadap permasalahan yang dihadapi masyarakat terdampak bencana alam. UU Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana telah menjelaskan bahwa bencana dikategorikan sebagai peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat yang disebabkan, baik oleh faktor alam dan/atau faktor non alam maupun faktor manusia, sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis. Pembangunan hunian sementara dituntut

untuk dikerjakan dalam waktu yang singkat, karena kebutuhan primer dari manusia akan tempat tinggal dan pertimbangan ketepatan pengerjaannya (Agung dan Nugraheni, 2019). Mengingat Huntara ini urgensinya tinggi, maka diperlukan solusi alternatif untuk pembangunan Huntara ini dengan prinsip dasar harga yang murah dan terjangkau, material yang mudah didapat, dan tahan terhadap gempa (Teguh. dkk, 2019). Untuk memenuhi kebutuhan Huntara ini diperlukan beberapa inovasi solutif, antara lain penggunaan material bahan bangunan inovatif, yang telah tersedia, yaitu pipa paralon PVC dan papan GRC untuk struktur rangka batang kuda-kuda, struktur portal, dan dinding partisi.

Pipa PVC merupakan salah satu alternatif material yang dapat digunakan untuk Huntara ini. Kelebihan yang dimiliki oleh Pipa PVC ini adalah sangat mudah ditemukan di lapangan, tahan air, ringan, dan murah (SNI 06-0084-2002). Pipa PVC sudah lazim digunakan untuk keperluan instalasi saluran air, dan pemipaan dalam pembangunan gedung dan infrastruktur lainnya. Kualitas pipa PVC untuk kebutuhan tersebut telah teruji dengan baik karena memiliki kualitas bahan yang handal. Penggunaan pipa PVC sebagai material konstruksi bangunan rumah tinggal sederhana masih terbatas dan perlu dilakukan pengujian kehandalan material tersebut di laboratorium.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan struktur rangka kuda-kuda dengan bahan dasar pipa PVC. Dua model struktur rangka kuda-kuda skala penuh diuji dengan beban vertikal pada titik puncak kuda-kuda hingga mencapai beban ultimit. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi inisiasi awal dalam lingkup pengujian material pipa PVC sebagai inovasi material bahan bangunan untuk struktur rangka kuda-kuda Huntara.

Landasan Teori

Material pipa PVC

Pipa PVC yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Rucika*. Pipa PVC ini merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pembuangan air hujan di rumah-rumah

sederhana. Terdapat 2 jenis pipa yang tersedia, “*RUCIKA JIS*” dan “*RUCIKA STANDARD*”. Perbedaan dari kedua jenis ini adalah pada standarisasinya, “*RUCIKA JIS*” mengacu pada standard yang ditetapkan oleh JIS (*Japanese Industrial Standard*). Perbedaan fisik yang menjadi pembeda adalah ketebalan pipa berjenis “*RUCIKA JIS*” mempunyai ketebalan diatas pipa berjenis “*RUCIKA STANDARD*”, dan dari segi harga “*RUCIKA JIS*” lebih mahal 2x lipat dibandingkan dengan “*RUCIKA STANDARD*”.

Sifat fisik pipa menurut *Handbook Rucika Standard* dengan berat jenis 1,40 g/cm³, koefisien muai panjang 8x10⁻² Mm/m.°C, konduktivitas 0,15 W/m.°C, modulus elastisitas 3000 N/mm², dan resistensi permukaan > 10¹² Ω. Tabel 1 memperlihatkan beberapa macam ukuran dari pipa PVC yang dirujuk dari *Handbook Rucika Standard*.

Tabel 1. Ukuran pipa PVC

No.	Diameter	
	(mm)	(inch)
1	22	½
2	26	¾
3	32	1
4	42	1 ¼
5	48	1 ½
6	60	2
7	76	2 ½
8	89	3
9	114	4
10	140	5
11	165	6
12	216	8
13	267	10
14	318	12

Terdapat pembagian kelas dari pipa PVC dengan merk *Rucika* ini, yaitu kelas AW dan Kelas D. Kelas AW ini dirancang untuk menahan tekanan sebesar 10 bar atau setara dengan 10,2 kg/cm², dan berfungsi untuk menyalurkan air dari pompa yang mempunyai tekanan khusus. Sedangkan untuk pipa dengan kelas D dirancang untuk menahan tekanan sebesar 5 bar atau setara dengan 5,1 kg/cm², dan biasanya digunakan sebagai pipa air limbah, air hujan, dan ventilasi. Perbedaan kelas ini ada pada ketebalan dari setiap jenisnya, pipa kelas AW mempunyai

ketebalan yang lebih dibandingkan kelas D. Untuk daftar ketebalan dari pipa PVC berdasarkan *Handbook Rucika Standard* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Daftar ketebalan pipa PVC

No.	Diameter (inch)	Ketebalan	
		AW	D
1	½	1,5	-
2	¾	1,8	-
3	1	2	-
4	1 ¼	2,3	1,3
5	1 ½	2,3	1,3
6	2	2,3	1,3
7	2 ½	2,6	1,4
8	3	3,1	1,6
9	4	4,1	2
10	5	5,4	2,6
11	6	6,4	3
12	8	8,3	4,2
13	10	10,3	5,2
14	12	12,2	6,2

Untuk membuat pipa PVC menjadi suatu rangkaian *plumbing*, *Rucika* menyediakan beberapa model sambungan yang tersedia di lapangan, antara lain: *90° Elbow*, *45° Elbow*, *Y-Branch*, *Tee*, dan *Large Radius Tee*.

Kuat tekan

Kuat tekan adalah kemampuan dari suatu benda uji untuk menerima gaya aksial, yang menyebabkan benda uji mengalami keruntuhan atau kehancuran. Persamaan dari kuat tekan dapat menggunakan Persamaan (1).

$$F = \frac{P}{A} \tag{1}$$

Keterangan,

- F = kuat tekan (MPa),
- P = beban maksimum (N), dan
- A = luas penampang (mm²).

Secara umum pipa ini berbentuk silinder, sehingga perlu rumus tambahan untuk menghitung luas penampangnya. Persamaan (2) merupakan persamaan untuk menghitung luas penampang dari silinder berongga.

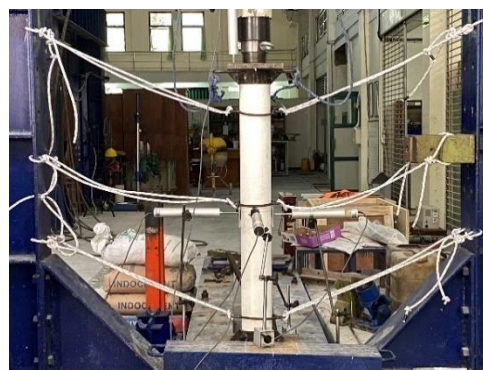
$$A = \frac{1}{4} \times \pi \times (D^2 - (D - 2tb)^2) \tag{2}$$

Keterangan,

- A = luas penampang (mm²);

- D = diameter luar pipa (mm);
- tb = tebal pipa (mm).

Gambar 1 menunjukkan model pemasangan benda uji tekan pada pipa paralon dengan beban aksial sentris.



Gambar 1. Uji tekan dengan beban aksial sentris

Kuat lentur

Kuat lentur merupakan representasi dari tegangan tarik yang diperoleh dari pembagian antara momen lentur dengan momen penahan penampang benda, dimulai ketika benda uji saat awal dibebani sampai dengan benda uji mengalami kerusakan. Untuk pengujian kuat lentur ini, benda uji diletakkan pada 2 titik tumpuan dan pada tengah bentangan dipasang beban terpusat (sisi atas pipa) serta di bawah titik beban dipasang LVDT (sisi bawah pipa) untuk mengukur lendutan yang terjadi setiap kenaikan beban. Menurut SNI 03-4154-1996 kuat lentur dapat ditentukan menggunakan Persamaan (3).

$$F_s = \frac{3 P L}{2 b d^2} \tag{3}$$

Keterangan,

- F_s = kuat lentur (MPa);
- P = beban maksimum (N);
- L = panjang bentang bersih (mm);
- b = lebar penampang (mm);
- d = tinggi penampang (mm).

Model pengujian pipa terhadap beban lentur disajikan pada Gambar 2, dengan beban terpusat dipasang di titik tengah bentangan.



Gambar 2. Uji lentur dengan beban terpusat

Metode Penelitian

Pengantar

Penelitian ini difokuskan pada pengujian struktur rangka kuda-kuda memakai bahan dasar dari pipa paralon PVC kosong, yang berkualitas. Ragam pengujiannya mencakup material, kuat tekan, dan kuat lentur. Skema pembebanan disesuaikan dengan objek pengujian. Untuk evaluasi kinerja struktur rangka kuda-kuda, beban terpusat vertikal dipasang pada titik puncak kuda-kuda. Pengujian 2 unit elemen material digunakan pipa kosong berdiameter 3” dengan panjang 1 meter dan 2 meter. Selanjutnya hasil pengujian laboratorium terhadap 2 model kuda-kuda dibandingkan dengan hasil analisis struktur dua dimensi menggunakan software SAP2000.

Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pipa PVC diameter 3”;
2. sambungan Pipa PVC (90° Elbow, Y-Branch, dan Tee);
3. lem pipa.

Benda uji

Rincian benda uji pipa PVC yang akan digunakan adalah sebagai berikut.

1. Pengujian elemen
 Pengujian elemen dibagi menjadi 2 bagian yaitu pengujian kuat tekan dan pengujian kuat lentur.
 - a. Kuat tekan
 Rincian dari benda uji yang digunakan untuk pengujian kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rincian benda uji tekan

Panjang Pipa (m)	Diameter Pipa (inch)	Jumlah Sampel	Kode Sampel
1	3	2	TKN1 TKN2

- b. Kuat lentur
 Rincian dari benda uji yang dipakai untuk pengujian kuat lentur dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rincian benda uji lentur

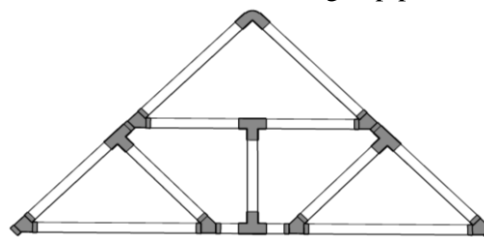
Panjang Pipa (m)	Diameter Pipa (inch)	Jumlah Sampel	Kode Sampel
1	3	2	LTR11 LTR21 LTR12
2	3	3	LTR22 LTR32

Gambar 3 menunjukkan pipa PVC, yang dipakai untuk pengujian elemen.

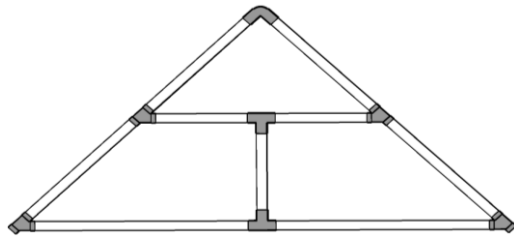


Gambar 3. Pipa PVC

2. Pengujian kuda-kuda
 Pada pengujian kuda-kuda ini terdapat 2 model yang berbeda. Permodelan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5 berikut. Model kuda-kuda ini berbeda bentuk strukturnya, dan berbeda dengan model kuda-kuda dari bahan dasar kayu, baja ringan, dan besi disebabkan oleh keterbatasan model sambungan pipa PVC.



Gambar 4. Struktur kuda-kuda model 1



Gambar 5. Struktur kuda-kuda model 2

Teknik pengumpulan data

Teknik pengumpulan data masing-masing pengujian berbeda-beda dan disesuaikan dengan objek pengujianya. Berikut teknik pengumpulan data dalam penelitian ini.

1. Pengujian kuat tekan

Untuk pengujian ini, benda uji berupa unit elemen pipa dipasang berdiri tegak pada *loading frame* dan dibebani beban vertikal sentris. Untuk menjaga posisi benda uji tetap berdiri vertikal, maka beberapa utas tali diikatkan pada bagian atas dan bawah pipa, untuk mengantisipasi pergerakan benda uji bila lepas kontrol ketika beban maksimum tercapai. Untuk memperoleh data setiap langkah pembebanan dan simpangan lateral di titik tengah pipa, maka pada titik *load cell* dipasang kabel yang terhubung dengan komputer dan *data logger*, demikian juga LVDT dipasang di titik tengah pipa, yang juga terhubung dengan komputer dan *data logger*. Dari kedua instrumen tersebut data pembebanan dan defleksi lateral untuk 2 benda uji diperoleh secara lengkap.

2. Pengujian kuat lentur

Untuk pengujian kuat lentur, benda uji diletakkan di atas 2 tumpuan, yang ditumpu sederhana di kedua ujungnya. Kedua tumpuan diletakkan di atas gelagar baja, yang berada tepat di tengah-tengah bentangan *loading frame*, sehingga memudahkan pemasangan *load cell* dan LVDT. Beban lentur berupa beban terpusat diletakkan di titik tengah pipa paralon dan di bawahnya dipasang instrumen LVDT. Kedua instrumen tersebut disambung ke komputer dan *data logger* untuk merekam data pembebanan dan defleksi vertikal atau lendutan. Pemberian beban dilakukan

secara perlahan supaya lebih teliti perekaman data beban dan defleksi vertikal. Panjang bentangan bersih ditentukan sepanjang pipa dikurangi 5 cm masing-masing untuk titik tumpuan kiri dan kanan. Jumlah sampel pengujian ini ada 4 buah dengan panjang pipa adalah 1 meter sebanyak 2 buah dan pipa dengan panjang 2 meter sebanyak 2 buah.

3. Pengujian kuda-kuda

Struktur rangka kuda-kuda dibentuk dari pipa PVC kosong yang dirangkai dengan sambungan pipa PVC fabrikasi (bukan hasil rekayasa) dengan cara membentuk struktur rangka batang yang dirancang, dan penyambungannya digunakan lem khusus untuk pipa paralon, yang memiliki daya rekat yang kuat. Kualitas sambungan pada kuda-kuda ini sangat dipengaruhi oleh ketrampilan, ketelitian, kecermatan teknisi dalam penyambungan 2-3 atau lebih batang yang bertemu dalam satu titik buhul. Panjang bidang-sambung dan perataan lem menjadi kunci kekuatan dari sambungan pipa paralon baik pada batang tekan maupun batang tarik. Pada pengujian kuda-kuda ini, beban terpusat diberikan dengan memasang *load cell* pada titik puncak kuda-kuda dan LVDT dipasang di titik tersebut dan di tengah bentangan kuda-kuda pada batang bawah untuk mengukur lendutan setiap pertambahan beban, dan untuk melihat efek *out of plane* eksentrisitas (efek puntir) dipasang 2 LVDT pada bagian samping kuda-kuda bagian atas dan bawah.

4. Analisis numerik

Analisis numerik digunakan *software* SAP 2000. Dengan bentangan, titik beban, dan titik tinjauan yang sama dengan pengujian kuda-kuda di laboratorium, namun tidak semua parameter pengujian laboratorium bisa diperhitungkan dalam analisis numerik. Hasil pengujian dari kedua metode (laboratorium dan numerik) kemudian dibandingkan sebagai evaluasi kinerja struktur rangka batang kuda-kuda berbahan dasar pipa paralon kosong (tanpa diisi dengan mortar) dan disambung dengan sambungan paralon fabrikasi.

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk menilai kelayakan dari struktur rangka kuda-kuda berbahan dasar pipa PVC. Ragam pengujian ini mencakup pengujian unit elemen, kuat tekan, kuat lentur, dan pengujian 2 model kuda-kuda yang berbeda.

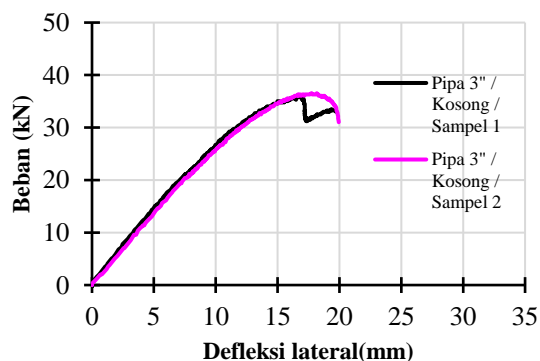
Pengujian kuat tekan

Data sampel benda uji kuat tekan ini dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data sampel uji tekan

No. Sampel	Ukuran (in)	Berat (kg)	Panjang (cm)	Kode Sampel
1	3	1,53	97,00	TKN1
2	3	1,50	96,75	TKN2

Pada pengujian kuat tekan, sampel 1 dapat menerima beban dan defleksi maksimum masing-masing sebesar 35,80 kN, dan 33,01 mm. Kemudian pada pengujian pada sampel 2 ini mempunyai perilaku yang relatif sama dengan benda uji sampel 1, dengan kuat tekan maksimum yang didapat adalah sebesar 36,54 kN dan defleksi lateral maksimum 19,94 mm. Gambar 6 menunjukkan grafik perbandingan hasil pengujian kuat tekan antara sampel 1 dan sampel 2. Dari hasil pengujian 2 sampel memperlihatkan tren grafik hubungan beban dan defleksi lateral sama untuk mencapai kinerja puncaknya, kecuali perilaku sampel 1 menuju puncak pembebanan mengalami sedikit instabilitas dari *load cell*.



Gambar 6. Perbandingan kuat tekan sampel 1 dan sampel 2

Kerusakan pada pipa membuktikan bahwa pipa paralon memiliki keterbatasan kekuatan

(lemah) di dalam menahan tekuk. Gambar 7 dan 8 menunjukkan pola kerusakan pipa kosong, yang diuji beban vertikal sentris mengakibatkan pipa mengalami kelenturan besar pada satu arah (*lateral buckling*) pada sampel 1 dan sampel 2.



Gambar 7. Kerusakan sampel 1 pasca diuji tekan



Gambar 8. Kerusakan sampel 2 pasca diuji tekan

Bentuk kerusakan pipa setelah mencapai beban maksimum, mengalami kelenturan satu arah dan pipa mengalami pengecilan tampang karena fleksibilitas sifat dasar dari material pipa PVC kosong. Pola kerusakan akan sangat berbeda apabila pipa diisi dengan material mortar dengan komposisi campuran tertentu.

Pengujian kuat lentur

Tabel 6 memperlihatkan data dari 5 sampel benda uji pengujian lentur.

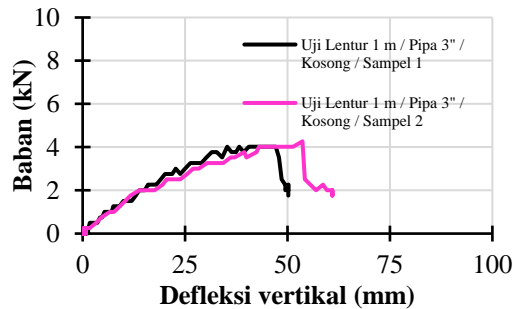
Tabel 6. Data sampel uji lentur

No. Sampel	Bentang (m)	Berat (kg)	Panjang (cm)	Kode Sampel
1	1	1,600	99,700	LTR11
2		1,580	99,800	LTR12
1	2	2,558	194	LTR12
2		2,556	194	LTR22
3		2,569	194	LTR32

Hasil pengujian lentur diuraikan sebagai berikut ini.

1. Pipa PVC kosong panjang 1 meter

Pada pengujian lentur sampel 1 didapatkan beban lentur dan defleksi vertikal maksimum berturut-turut sebesar 4,02 kN dan 50,26 mm. Sedangkan pada pengujian lentur sampel 2 dicapai beban lentur dan defleksi vertikal maksimum masing-masing sebesar 4,27 kN dan 60.9 mm. Grafik hubungan antara beban dan defleksi vertikal dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik hubungan beban dan defleksi vertikal

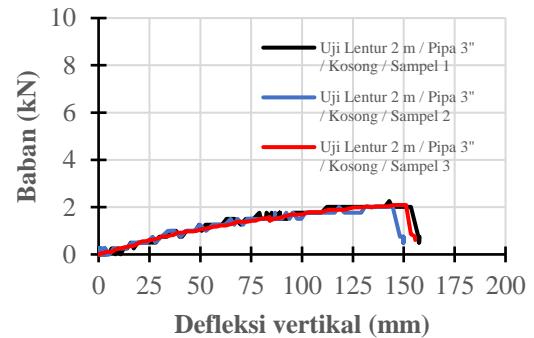
Tipikal kerusakan lentur pada 2 sampel yang diuji dengan beban lentur diletakkan di tengah bentangan pipa diperlihatkan pada Gambar 10. Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa sampel 2 mampu menahan beban maksimum yang relatif sama besar, tetapi lebih lentur karena defleksi vertikal atau lendutannya lebih besar, sehingga daktilitas simpangan sampel 2 lebih besar dari sampel 1.



Gambar 10. Tipikal kerusakan lentur pasca pembebanan

2. Pipa PVC kosong panjang 2 meter

Untuk benda uji dengan bentangan 2 meter dari segi perilaku pipa relatif tidak ada perbedaan, penurunan kekuatan lentur disebabkan oleh pipa yang lebih panjang. Pada pengujian lentur sampel 1 beban lentur dan lendutan maksimum sebesar 2,260 kN dan 157,54 mm. Untuk pengujian lentur sampel 2 dicapai beban lentur dan defleksi vertikal maksimum berturut-turut sebesar 2,01 kN dan 149,67 mm, sedangkan beban lentur maksimum yang dapat ditahan oleh sampel 3 sebesar 2,09 kN dan 155,47 mm. Gambar 11 memperlihatkan tren tingkat keseragaman dari 3 sampel pipa kosong yang diuji terhadap beban lentur relatif sama, tetapi terdapat sedikit perbedaan defleksi vertikal di antara ketiga sampel itu. Perlu dicatat bahwa pipa PVC dengan bentangan lebih panjang, yang diberikan beban lentur akan menghasilkan kelenturan yang lebih tinggi dan sebaliknya beban yang dicapai rendah dan sebaliknya (Gambar 12).

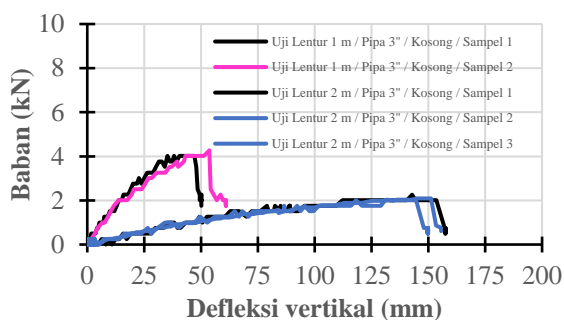


Gambar 11. Grafik hubungan beban dan defleksi vertikal



Gambar 11. Tipikal kerusakan batang lentur pasca diuji

Pola kerusakan dari ketiga sampel relatif serupa, yaitu mengalami kelenturan searah bidang dan pada pipa di titik pembebanan mengalami perubahan bentuk tampang, mengecil dan pipih seperti terlihat pada Gambar 12. Grafik perbandingan dari dua kelompok sampel tersebut memperjelas uraian di atas (Gambar 13).



Gambar 13. Perbandingan kuat lentur

Pengujian struktur kuda-kuda

Perakitan benda uji kuda-kuda ini mengalami banyak kendala terutama pada saat penyambungan pipa menggunakan lem pipa. Benda uji kuda-kuda model 1 sudah sempat diuji, namun terdapat kegagalan pada bagian sambungan terutama pada bagian tarik dikarenakan pengeliman yang tidak merata. Kemudian kegagalan tersebut menjadi bahan evaluasi cara menyambungkan sambungan dengan baik.

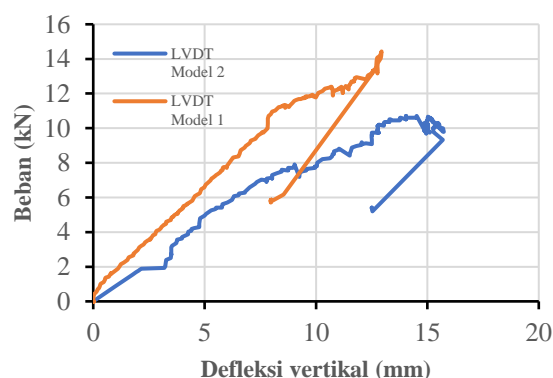
1. Kuda-kuda Model 1

Dari segi permodelan, kuda-kuda model 1 ini memiliki tingkat kekakuan yang cukup baik. Dari pengujian struktur rangka kuda-kuda di laboratorium dapat dilihat pada Gambar 14.

Kuda-kuda model 1 dapat menerima beban 14,433 kN dengan defleksi vertikal (lendutan) pada titik tinjau sebesar 25,512 mm. Dalam pengujian ini, kuda-kuda tidak terjadi kerusakan, namun pembebanan dihentikan ketika mencapai beban maksimum dengan alasan keamanan.

2. Kuda-kuda model 2

Kuda-kuda model 2 ini memiliki bentuk yang cukup sederhana dan diharapkan mempunyai kekuatan yang setara dengan model 1 agar bisa dijadikan alternatif karena perakitan kuda-kuda model 2 lebih simpel. Dari pengujian struktur rangka kuda-kuda ternyata kekuatan model 2 hanya mampu menahan beban 10,71 kN dengan lendutan pada titik tinjau sebesar 20,95 mm seperti terlihat dengan jelas dalam Gambar 14.

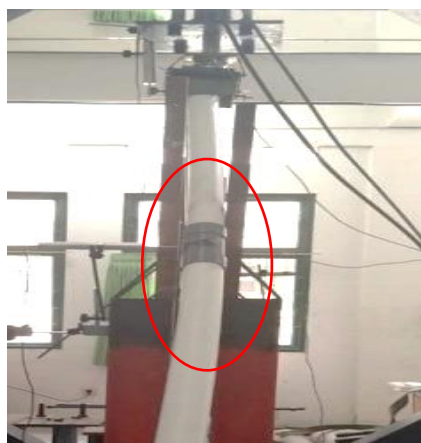


Gambar 14. Perbandingan kuda-kuda model 1 dan model 2

Pada pengujian ini, pembebanan dihentikan setelah mencapai beban maksimum karena telah terjadi eksentrisitas yang cukup besar pada bagian sambungan batang diagonal, yang dapat membahayakan keselamatan peneliti. Kondisi kuda-kuda model 2 ini dapat dilihat pada Gambar 15. Rekapitulasi beban maksimum dapat dirinci dalam Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi hasil pengujian kuda-kuda

No	Sampel	Beban Maksimum (kN)	Defleksi vertikal (mm)
1	Model 1	14,433	25,512
2	Model 2	10,71	20,948



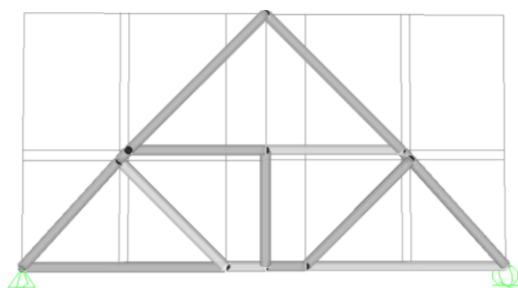
Gambar 15. Kondisi kuda-kuda model 2 setelah diuji

Analisis numerik

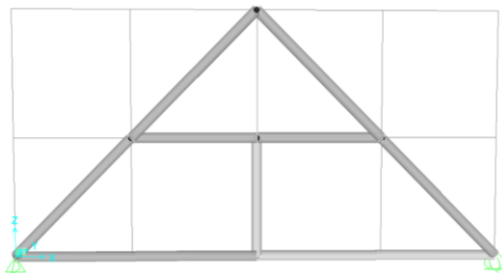
Analisis numerik ini dimaksudkan untuk membandingkan seberapa besar perbedaan kinerja kuda-kuda yang dihasilkan dari pengujian laboratorium dengan analisis numerik menggunakan *software SAP 2000*.

1. Permodelan

Permodelan kuda-kuda model 1 dan model 2 dapat dilihat pada Gambar 16 dan 17.



Gambar 16. Permodelan SAP 2000 Kuda-Kuda Model 1

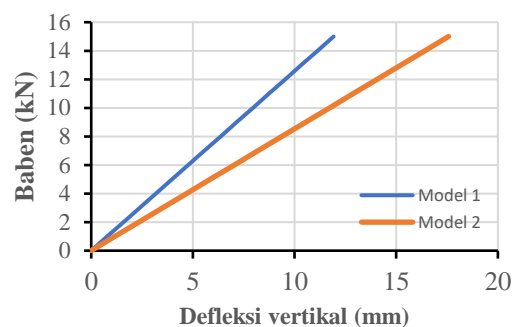


Gambar 17. Permodelan SAP 2000 kuda-kuda model 2

2. Analisis data

Dalam penelitian ini, analisis struktur rangka kuda-kuda dilakukan dengan sistem dua dimensi karena model dan pembebanan yang relatif sederhana, sehingga input geometri struktur dan material tidak terlalu kompleks. Konsekuensinya, tidak semua variabel dalam pengujian laboratorium bisa diakomodasi dalam analisis struktur ini, dan dampaknya beban maksimum yang dapat ditahan kedua model kuda-kuda masih bersifat linier elastik.

Hasil analisis struktur kedua sampel diplot dalam satu grafik sebagaimana terlihat pada Gambar 18. Meskipun hasil analisis struktur belum termasuk kategori analisis yang kompleks (*advanced structural analysis*), namun grafik hubungan respon beban dan lendutan cukup bisa memberikan gambaran sederhana bahwa model 1 ini mempunyai kemampuan lebih besar dalam menahan kekuatan dibandingkan model 2.

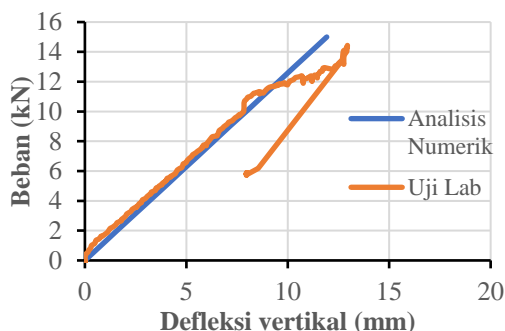


Gambar 18. Perbandingan hasil analisis kuda-kuda model 1 dan model 2

Komparasi pengujian laboratorium dengan analisis numerik

1. Model 1

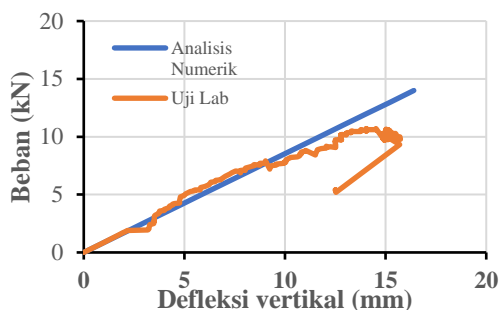
Grafik antara pengujian laboratorium dengan hasil analisis numerik pada titik tinjauan yang sama menghasilkan kinerja kekuatan relatif mendekati satu sama lain, sehingga hasil analisis ini telah terverifikasi dengan baik. Grafik perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 19 berikut.



Gambar 19. Grafik perbandingan Model 1

2. Model 2

Hasil kinerja pengujian laboratorium dengan hasil analisis numerik antara model 1 dan model 2 memiliki tren yang mirip, perbedaannya terletak pada kemampuan struktur dalam menahan beban vertikal. Pada model 2 terdapat ketidak-beraturan dari hasil pengujian laboratorium, dikarenakan adanya eksentrisitas yang membuat benda uji membengkok. Grafik perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 12. Grafik perbandingan Model 2

Evaluasi kelayakan struktur

Struktur rangka kuda-kuda yang berbahan dasar pipa PVC kosong ini memang terdapat beberapa kekurangan, salah satunya adalah tingkat kerumitan pada saat pemasangan pipa ke sambungannya. Mengingat pipa paralon yang digunakan berdiameter cukup besar, menyulitkan pemasangannya karena akan membutuhkan tenaga 3-4 orang untuk menyetel sambungannya agar presisi dan tidak mengalami puntiran, terutama pada sambungan, yang terdiri dari pertemuan 2-4 batang dalam satu titik buhul. Dua model kuda-kuda ini terlihat dengan jelas perbedaan

bentuk dan sambungannya yang lebih kompleks. Mengingat keterbatasan bentuk sambungan pipa paralon dari fabrikasi sangat terbatas, maka sambungan kedua batang diagonal, batang vertikal, dan batang bawah pada model 1 tidak memungkinkan dipertemukan dalam satu titik buhul, sebagaimana layaknya bentuk/model kuda-kuda dari bahan kayu, aluminium, dan baja. Perakitan kuda-kuda berbahan dasar pipa PVC ini juga dibutuhkan kecermatan dan ketelitian dikarenakan apabila dalam penyambungan pipa tidak simetris nantinya struktur ini tidak akan bekerja dengan baik dan berpotensi mengalami puntir akibat adanya eksentrisitas.

Keterbatasan sambungan juga menjadi masalah, dikarenakan permodelan yang akan dibuat nantinya tidak sesuai dengan struktur rangka kuda-kuda pada umumnya, sehingga perlu penelitian lebih lanjut dan komprehensif menggunakan inovasi dari kombinasi material lain. Pemanfaatan keterbatasan sambungan pipa ini dapat dilihat dari permodelan kuda-kuda, baik model 1 dan model 2. Dengan capaian kinerja struktural kedua benda uji ini, maka kuda-kuda model 1 lebih baik dibandingkan model 2 dan direkomendasi untuk digunakan sebagai bagian dari struktur atap dari rumah Huntara.

Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini diuraikan berikut ini.

1. Kuat tekan rata-rata dari kedua benda uji adalah 36,16 kN. Masalah kekuatan tekan yang kurang ini bisa diatasi dengan mengisi pipa kosong dengan material mortar, yang baik, sehingga kuat tekannya meningkat.
2. Uji kuat lentur pada pipa panjang 1 meter mampu menahan beban maksimum rata-rata adalah 4,145 kN, sedangkan untuk pipa, yang memiliki panjang 2 m, menghasilkan kuat lentur yang lebih rendah sebesar 2,12 kN.
3. Pengujian 2 model struktur rangka kuda-kuda memiliki kinerja sebagai berikut:

model 1 mampu menerima beban hingga 14,433 kN, lebih tinggi 26% dibandingkan pada model 2 sebesar 10,71 kN.

4. Pada analisis numerik yang bertujuan untuk memverifikasi hasil dari pengujian laboratorium, model 1 mendapatkan hasil yang sesuai, namun untuk model 2 tidak mendapatkan hasil yang memuaskan dikarenakan adanya eksentrisitas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ketua Tim Peneliti, Hibah Kampus Lestari, UII, No. Kontrak: Hibah Kampus Lestari, UII. Nomor Kontrak: 5156/Rek.10/BPP/XII/2022. yang telah memberi izin menggunakan sebagian data penelitian beliau, yang didanai oleh Universitas Islam Indonesia.

Daftar Pustaka

ASTM F 2261 – 06. *Standard Test Method for Pressure Rating Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe Fittings, Schedule 40 and 80 Socket-Type*. American Association State.

Agung, W. and Nugraheni, F. 'Desain Hunian Sementara Dengan Rumah Sistem *Knockdown* Tahan Tsunami Menggunakan Material Baja *Canai* Dingin Untuk Rekonstruksi Bencana Gempa Mataram, Nusa Tenggara Barat.' *Jurnal Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia*. ISBN : 978-602-6215-79-6. Yogyakarta

Hadi, S., Takwin, R. N. A., dan Dani, A. (2016). Uji Kekuatan Tekan dan Kekuatan Lentur Pipa Air PVC, *Jurnal Logic*. Vol. 16. No.1. Maret 2016.

Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan. (2016). *Konstruksi Rumah Sederhana*. http://ciptakarya.pu.go.id/bangkim/simpp/portal/assets/public/03_Konstruksi_Rumah_Sederhana_2017.pdf

Rahman, A. P., Listiani, A., Susanti, E., Musthafa, H., Sena, P.G., Shafna, S. E. (2020). *ANTARA: Antisipasi Bencana Dengan Huntara, Nuansa Cendekia*, Bandung. Santoso, W.E. and Panjaitan,

T.W.S. (2016) 'Pembuatan Prototipe Hunian Sementara untuk Pengungsi di Indonesia', 4.

SNI 03-1729-2002. *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung*. Depeartemen Pekerjaan Umum.

SNI 06-0084-2002. *Pipa PVC untuk saluran minum*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

SNI 03-4154-1996. *Metode Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Balok Uji Sederhana yang Dibebeani Terpusat Langsung*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

Teguh, M, Rahmayanti, N, Hidayat, M. Z. R. (2023). Kelayakan Elemen Struktur pada Usaha Rintisan Prototipe T-21 Hunian Sementara berbahan dasar Paralon dan GRC. Laporan Penelitian Hibah Kampus Lestari, UII. SK. Kontrak: 5156/Rek.10/BPP/XII/2022. <https://fcep.uui.ac.id/wp-content/uploads/2023/10/Executive-Summary-of-Green-Metric-Laporan-Akhir-Penelitian-Green-Metric-UII.pdf>

UU Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana.