

Numerical and Experimental Analysis of Cantilever Beam with Various Shaft Orientation

Jhon Malta^{1,*}, Ahmad Bukhari² dan Mulyadi Bur¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas - Padang

²Alumni Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas - Padang

*Korespondensi: jhonmalta@ft.unand.ac.id

Abstract. This research deals with the deflection of a cantilever beam with difference of shaft orientation. This cantilever beam is modeled as two segments with variation of shaft orientation 30o, 60o, and 90o and under a loading of static external force with the direction 0o, 30o, 45o, 60o, and 90o due to reference axis. The vertical and horizontal deflections are determined numerically by using the Autodesk Inventor software and compared experimentally. The results show that the beam has a characteristic of asymmetric bending in which the direction of deflection is not parallel to the direction of force loading. Besides, the beam will be twisted. The difference of shaft orientation influences the stiffness of beam. The biggest difference of deflections between numerical simulation and experimental result is 10,72% with the direction of force loading is 30o. Nevertheless, the deflection obtained numerically (1.75 mm) or experimentally (1.56 mm) is the smallest deflection.

Abstrak. Pada penelitian ini dikaji lendutan balok jepit yang diberi pembebanan pada ujung balok dengan orientasi penampang berbeda. Balok jepit dimodelkan menjadi dua segmen dengan variasi sudut sumbu utama sebesar 30°, 60°, dan 90° dengan arah gaya pembebanan statik divariasikan dengan kemiringan 0°, 30°, 45°, 60°, dan 90°. Lendutan vertikal dan horizontal terhadap sumbu acuan dihitung secara numerik menggunakan software Autodesk Inventor 2013 dan dibandingkan dengan pengukuran secara eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem balok dengan orientasi penampang yang berbeda memiliki sifat *asymmetric bending* yaitu jika balok diberi pembebanan dalam arah lateral maka arah lendutan tidak sejajar dengan garis kerja gaya. Selain itu balok juga akan terpuntir. Selain itu perbedaan orientasi penampang pada balok jepit menyebabkan nilai kekakuan pada batang berbeda sehingga lendutan yang terjadi juga tidak sama sesuai dengan arah kemiringan gaya yang diberikan. Semakin besar nilai kekakuan sistem maka lendutan akan semakin kecil, begitu juga sebaliknya. Berdasarkan hasil simulasi numerik dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor dan dibandingkan dengan hasil yang diperoleh secara eksperimen diperoleh bahwa perbedaan maksimum lendutan adalah sebesar 10,72% dengan posisi kemiringan gaya 30° dengan lendutan sebesar 1,75 mm (simulasi numerik) dan sebesar 1,56 mm (eksperimen). Lendutan yang terukur ini merupakan lendutan terendah sehingga perbedaan yang relatif kecil saja akan memberikan perbedaan hasil yang relatif besar dalam persentase.

Kata kunci: lendutan, Autodesk Inventor, beda orientasi penampang

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

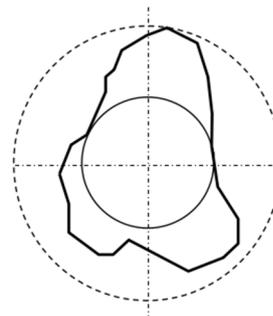
Pendahuluan

Proses bubut adalah proses pemesinan untuk menghasilkan bagian-bagian mesin berbentuk silindris yang dikerjakan dengan menggunakan mesin bubut. Salah satu contoh produk hasil proses bubut adalah poros. Proses bubut yang ideal akan menghasilkan produk yang bulat sempurna.

Proses manufaktur untuk poros yang tidak ideal menghasilkan poros tidak bulat sempurna. Ditinjau secara mikro gambar poros tidak bulat sempurna jika diukur dengan alat ukur kebulatan dapat dilihat pada gambar 1.

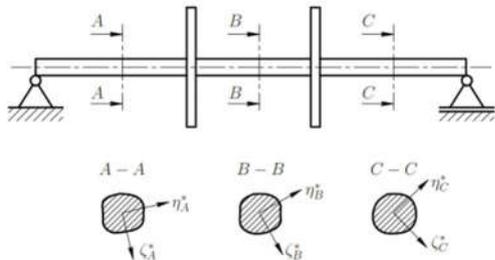
Peninjauan penampang sepanjang poros terlihat tidak simetris diakibatkan poros tidak bulat sempurna. Jika penampang tidak bulat sempurna maka

sumbu utama penampang (*principle axes*) sepanjang poros tidak seragam. Ini terlihat jika penampang dipotong per bagian seperti terlihat pada gambar 2.



Gambar 1. Poros dengan penampang tidak bulat sempurna diukur dengan alat ukur kebulatan

Pada gambar 2 tersebut terlihat bahwa penampang poros pada bagian potongan tidak seragam di sepanjang batang. Batang dipotong menjadi tiga bagian. Pada potongan A-A sumbu utama tidak sama dengan sumbu utama penampang potongan B-B dan begitu juga dengan penampang potongan C-C [1].

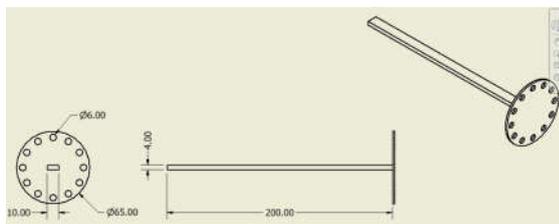


Gambar 2. Penampang dan sumbu utamanya yang tidak seragam secara mikro [1]

Berdasarkan fakta bahwa sumbu utama penampang tidak seragam sepanjang batang, maka dikaji pengaruh lendutan batang yang diberi pembebanan pada balok jepit dengan penampang tidak simetris. Penelitian tentang lendutan pada balok jepit dengan arah sumbu utama yg tidak seragam di sepanjang batang sudah dilakukan oleh King [2]. Pada penelitian tersebut, sistem balok jepit dimodelkan dengan batang berpenampang segiempat persegi panjang dan terdiri dari dua segmen dengan sudut orientasi antara kedua segmen tersebut 90°. Model balok jepit tersebut dikaji dengan menggunakan teori *Finite Element Analysis* dan diselesaikan dengan metode numerik. Meskipun demikian, model balok jepit yang dilakukan pada referensi [2] masih terbatas pada kasus balok jepit dengan dua segmen dan sudut orientasinya 90° saja. Pada penelitian ini akan dikaji secara numerik dan eksperimental lendutan balok jepit dengan penampang segiempat persegi panjang yang dimodelkan menjadi dua segmen dengan variasi sudut sumbu utama yang lebih banyak.

Metode Penelitian

Model balok jepit dibuat dari material baja plat SS400 dengan profil penampang empat persegi panjang dengan ketebalan 4 mm, lebar 10 mm, dan panjang batang 200 mm. Untuk satu segmen, dimensi alat uji dapat dilihat pada gambar 3.

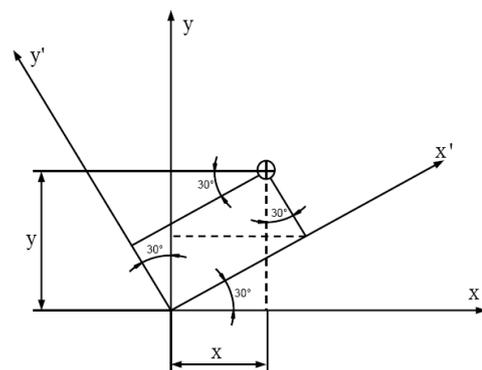


Gambar 3. Model balok uji satu segmen

Pengujian dilakukan pada balok uji yang terdiri dari dua segmen yang disambung dengan menggunakan baut. Posisi balok dijepit secara vertikal pada bagian atas agar berat sendiri dari batang dapat diabaikan dan pada bagian ujung bawah balok tidak dijepit melainkan diberi pembebanan. Pada ujung balok yang tidak dijepit dipasang dua buah *dial gauge* untuk mengukur perpindahan balok pada sumbu x dan y koordinat lokal, seperti yang terlihat pada gambar 4.



Gambar 4. Alat uji balok jepit dengan orientasi penampang berbeda



Gambar 5. Sumbu koordinat global dan koordinat lokal

Sumbu x' dan y' yang dipasangkan *dial gauge* adalah sumbu acuan untuk menghitung perpindahan kedua sumbu dalam koordinat lokal. Selanjutnya untuk mendapatkan perpindahan sumbu x dan y dalam koordinat global dapat dilihat pada Gambar 5, di mana hubungan kinematik antara koordinat lokal dan koordinat global dapat dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$x = x' \cos \theta - y' \sin \theta \tag{1}$$

$$y = x' \sin \theta + y' \cos \theta \tag{2}$$

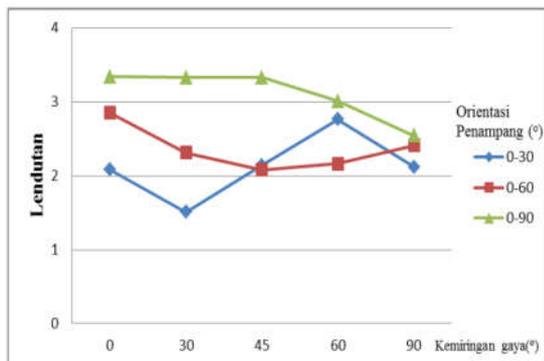
Variasi sudut orientasi sumbu utama penampang yang digunakan pada penelitian ini sebanyak tiga variasi sudut yaitu 30°, 60°, dan 90°. Pembebanan pada pengujian ini adalah beban statik sebesar 10 Newton pada ujung batang yang tidak terjepit.

Di samping dikaji secara eksperimental, pemodelan balok jepit ini juga dianalisis secara numerik dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor 2013.

Pada penelitian ini, lendutan balok jepit dengan orientasi penampang berbeda dianalisis secara eksperimental dan numerik dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor 2013. Data yang diperoleh dari eksperimental adalah nilai lendutan dalam koordinat lokal dari ujung batang yang tidak dijepit dengan orientasi sumbu utama penampang antara batang 1 dan batang 2 berbeda. Selanjutnya, besaran lendutan dalam koordinat lokal dikonversikan ke dalam lendutan dalam koordinat global. Pada perangkat lunak Autodesk Inventor, data yang diperoleh adalah data lendutan balok jepit dalam koordinat global secara langsung.

Hasil dan Pembahasan

Data yang didapatkan pada pengujian ini adalah lendutan dalam koordinat lokal dan sudut puntir dari balok jepit dengan orientasi penampang berbeda. Besaran lendutan dalam koordinat lokal dikonversikan ke dalam koordinat global dengan menggunakan persamaan 1 dan 2. Balok disambungkan dengan tiga variasi sudut antara batang 1 dengan batang 2. Setiap variasi diberikan pembebanan statik dengan lima variasi sudut pembebanan, sehingga didapatkan nilai seperti yang terlihat pada grafik yang ditampilkan pada gambar 6.

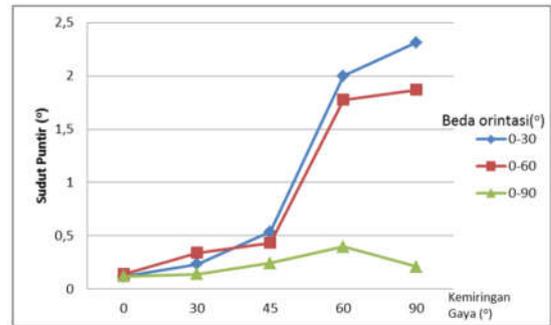


Gambar 6. Grafik variasi sudut orientasi penampang dan kemiringan gaya pembebanan

Pada pengujian kedua, diperoleh grafik hasil pengukuran sudut puntir seperti yang terlihat pada gambar 7. Pada grafik tersebut terlihat bahwa

perpindahan sudut terbesar terjadi pada variasi orientasi sumbu utama penampang 0° dan 30°, sedangkan pada variasi 0° dan 90° perpindahan sudut yang terjadi sangat kecil.

Lendutan pada balok dengan orientasi sumbu utama penampang tidak seragam tidak searah dengan arah gaya yang diberikan. Lendutan yang tidak sejajar dengan arah gaya yang diberikan disebut dengan *asymmetric bending*. Terbentuknya sudut saat lendutan yang terjadi membuktikan adanya puntiran pada batang. Puntiran disebabkan adanya perbedaan orientasi sumbu utama penampang antara kedua batang yang menyebabkan nilai kekakuan sistem berbeda, sehingga lendutan yang terjadi tidak hanya secara vertikal atau horizontal saja, tetapi lendutan juga disertai dengan puntiran. Untuk simulasi dengan Autodesk Inventor, hasil yang diperoleh hanya dalam bentuk animasi saja sehingga tidak dapat ditampilkan dalam besaran angka.



Gambar 7. Grafik sudut puntir ujung balok dengan beda orientasi terhadap variasi kemiringan arah gaya pembebanan

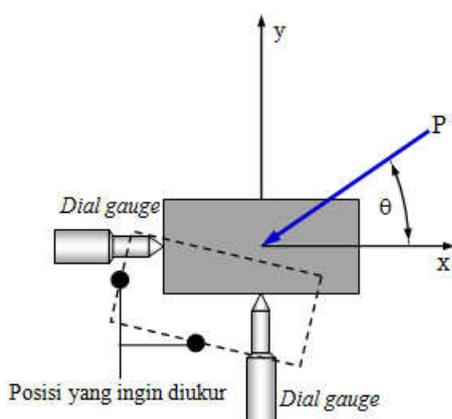
Selanjutnya, perbandingan antara hasil eksperimental dan hasil Autodesk Inventor ditampilkan pada tabel 1. Pada tabel ini terlihat bahwa nilai error tertinggi adalah 10,72% di mana terjadi pada balok dengan orientasi penampang 0° dan 30° dengan posisi kemiringan gaya 30° dengan lendutan sebesar 1,75 mm (simulasi numerik) dan sebesar 1,56 mm (eksperimental). Lendutan yang terukur yang ditampilkan pada tabel 1 merupakan lendutan terendah sehingga perbedaan yang relatif kecil saja akan memberikan perbedaan hasil yang relatif besar dalam persentase.

Tabel 1. Perbandingan hasil eksperimental dan numerik Autodesk Inventor

Orientasi Penampang (°)	Kemiringan gaya (°)	Lendutan (mm)		Error (%)
		Eksp.	Num.	
0 dan 30	0	2,08	2,11	1,39
	30	1,56	1,75	10,72
	45	2,14	2,29	6,17
	60	2,76	2,92	5,58
	90	2,12	2,32	8,47

Orientasi Penampang (°)	Kemiringan gaya (°)	Lendutan (mm)		Error (%)
		Eksp.	Num.	
0 dan 60	0	2,85	3,03	5,82
	30	2,31	2,24	3,00
	45	2,08	2,13	2,27
	60	2,16	2,27	4,74
	90	2,41	2,34	2,74
0 dan 90	0	3,34	3,59	6,79
	30	3,33	3,44	3,27
	45	3,33	3,32	0,48
	60	3,01	3,16	4,78
	90	2,54	2,64	3,92

Adanya perbedaan yang terjadi antara nilai eksperimen dan nilai numerik salah satunya disebabkan oleh alat ukur *dial gauge* yang tidak bisa mengukur perpindahan dengan mengikuti balok jepit saat terjadi defleksi. *Dial gauge* mengukur perpindahan ujung balok dalam keadaan statik, sehingga perpindahan yang terukur tidak pada titik awal sebelum balok jepit berpindah. Pada gambar 8 terlihat bagaimana *dial gauge* mengukur perpindahan balok.



Gambar 8. Perpindahan balok jepit akibat pembebanan dan posisi *dial gauge*

Posisi *dial gauge* sebelum ujung balok berpindah tepat di tengah dari panjang dan lebar profil penampang balok. Setelah balok diberi beban dan berpindah, posisi *dial gauge* tetap dan bagian yang terukur dari balok tidak pada titik sebelum balok berpindah. Hal inilah yang menyebabkan perbedaan antara nilai lendutan hasil eksperimen dan nilai hasil numerik *software* Autodesk Inventor. Pada Gambar 9 diperlihatkan grafik perbandingan antara nilai lendutan eksperimen dan simulasi numerik, di mana lendutan maksimum adalah sebesar 3.34 mm (eksperimen) dan 3.59 mm (numerik) terjadi pada balok dengan beda orientasi penampang 0° dan 90° dengan sudut pembebanan 0° terhadap sumbu acuan. Sedangkan lendutan minimum sebesar 1.56 mm (eksperimen) dan 1.75 mm (numerik) terjadi pada balok dengan beda orientasi

0° dan 30° dengan sudut pembebanan 30° terhadap sumbu acuan.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang sudah dilakukan secara numerik dengan menggunakan Autodesk Inventor dan pengujian secara eksperimental pada balok jepit dengan orientasi penampang yang berbeda, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- Sistem balok dengan orientasi penampang yang berbeda akan memiliki sifat *asymmetric bending* yaitu jika balok diberi pembebanan dalam arah lateral maka arah lendutan tidak sejajar dengan garis kerja gaya, selain itu balok juga akan terpuntir.
- Berdasarkan perbandingan hasil simulasi numerik dengan Autodesk Inventor dan hasil eksperimental yang dilakukan untuk posisi balok dengan beda orientasi 30°, 60°, dan 90° diperoleh bahwa lendutan maksimum terjadi pada balok dengan beda orientasi penampang 0° dan 90°, sedangkan lendutan minimum terjadi pada balok dengan beda orientasi 0° dan 30° dengan sudut pembebanan masing-masing 30° terhadap sumbu acuan.
- Untuk balok jepit dengan beda orientasi penampang yang diperoleh dari hasil eksperimental diketahui bahwa perpindahan sudut puntir maksimum terjadi pada balok dengan beda orientasi penampang 0° dan 30°. Perpindahan sudut puntir minimum terjadi pada balok dengan orientasi penampang 0° dan 90°. Untuk simulasi dengan Autodesk Inventor hasil yang diperoleh hanya dalam bentuk animasi tetapi tidak dapat ditampilkan dalam besaran angka.

Referensi

- [1] J. Malta, "Investigation of Anisotropic Rotor with Different Shaft Orientation", Dissertasi TU Darmstadt, 2009.
- [2] M. S. King, "Applying Classical Beams Theory to Twisted Cantilever Beams and Comparing to the Results of FEA". Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 2012.
- [3] S.P. Timoshenko, J.M. Geere, "Mechanics of Materials". D. Van Nostrand Company, 1971.
- [4] F.P. Beer, E.R. Johnston, D.F., Mazurek, E.R. Eisenberg, "Vector Mechanics for Engineering Static 9th Edition in SI Units". The McGraw-Hill, 2010.