

INTERPRESTASI BESAR DAN ARAH TEGANGAN PLAT BERDASARKAN REGANGAN YANG DIUKUR

I Wayan Suarnita *

Abstract

To know the structure response while loading, object that should be measure ice: (a) strain, (b) deflection or displacement (c) reaction on the restrain. By using the value of strain, we can define a moment of major stress of the points. which are observed. Strains that are happened on structure/model can be measured by using strain gage with rectangular rosette, type in any three directions (ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c). If the three directions strain on that point can be known.

Keyword: stress, strain, strain gage

1. Pendahuluan

Seiring dengan berkembangnya analisis dalam bidang struktur, maka eksperimen atau pengujian juga banyak dilakukan. Analisis Struktur dan eksperimen merupakan satu kesatuan yang saling menunjang, yang mana eksperimen struktur merupakan “cheking” terhadap analisa yang ada. Seringkali model matematis baik secara analitis maupun secara numerik tidak dapat diformulasikan dalam persamaan eksak, maka pengujian struktur perlu dilakukan untuk membuktikan teori yang ada. Eksperimen struktur idealnya dilakukan dengan benda uji (*specimen*) sesuai ukuran yang sebenarnya (*prototipe*), akan tetapi dengan pertimbangan-pertimbangan tertentu, maka benda uji perlu dimodelkan dengan mengikuti syarat-syarat teknik perhitungan model.

Eksperimen yang dilaporkan pada tulisan ini merupakan pengujian terhadap model specimen Pelat dari bahan *plexyglass* berukuran 36 cm x 54 cm, tebal 0,50 cm. Pelat tersebut dijepit dengan frame baja pada keempat sisinya.. Eksperimen dilakukan di Laboratorium PAU Ilmu-ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, seperti yang akan dibahas pada uraian selanjutnya.

Tujuan eksperimen ini adalah menentukan tegangan-tegangan utama yang terjadi pada permukaan bagian bawah ditengah-tengah pelat (titik C) akibat beban terpusat, bila diketahui angka *poisson rasio* (ν)=0,3 dan modulus elastisitas bahan (E)= 2.1×10^6 kg/cm².

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Dasar teori

Berdasarkan teori elastisitas untuk tegangan bidang (*plane stress*), besar tegangan langsung (*direct stress*) yang berarah sembarang x dapat dihitung dengan rumus (Suhendro, 2000) :

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

E = modulus elastisitas bahan

ν = *poisson's ratio*

ϵ_x = regangan dalam arah sumbu – x

ϵ_y = regangan dalam arah sumbu – y yang tegak lurus sumbu – x.

dan tegangan geser yang terjadi dapat dihitung dengan rumus :

$$\tau_{xy} = \gamma_{xy} \cdot G \dots\dots\dots(2)$$

dengan:

$$G = \text{shearing modulus} = \frac{E}{[2(1+\nu)]} \dots\dots\dots(3)$$

γ_{xy} = regangan geser

Apabila arah dan y adalah arah sumbu-sumbu utama (lazimnya dapat diketahui dari *symetry consideration*), maka pengukuran regangan pada dua arah (ϵ_x dan ϵ_y) sudah mencukupi untuk menentukan besar tegangan-tegangan utama σ_1 dan σ_2 (Suhendro, 2000).

* Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1+\nu^2)}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \dots\dots\dots(4)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \dots\dots\dots(5)$$

dan besar tegangan geser maksimum dapat dihitung dengan rumus :

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1+\nu)}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \dots\dots\dots(6)$$

Apabila arah sumbu-sumbu tegangan utama tidak diketahui sebelumnya, maka untuk mencari besar dan arah tegangan – tegangan tersebut diperlukan pengukuran regangan dalam tiga arah sembarang yang berbeda (ε_a , ε_b dan ε_c).

2. 2. Alat ukur regangan (*Strain gage*)

Regangan-regangan yang terjadi pada struktur / model dapat diukur dengan *strain gage*. Ada beberapa macam *strain gage* yang dapat dipakai, yaitu : (a) *mechanical strain gage*, (b) *optical strain gage* dan (c) *Electrical strain gage*. Pada alat ukur tipe mekanikal, dipakai *mechanical system* untuk memperbesar regangan yang diukur, seperti sistem *gears*, *levers* dan sejenisnya.

Karena ukurannya cukup besar dan massanya juga cukup besar, maka alat ukur ini hanya terbatas dipakai pada *static test*. Di samping itu pembacaan regangannya tidak bisa dilakukan terpisah, sehingga tidak mungkin untuk dipasang di dalam benda uji (misalnya pada tulangan beton dan sejenisnya).

Alat ukur regangan jenis ini sudah tidak banyak dipakai lagi. Demikian juga *optical strain gage*, yang pengukuran regangannya didasarkan pada prinsip-prinsip optik.

Electrical strain gage menggunakan prinsip-prinsip perubahan tahanan listrik pada bahan *gage*-nya akibat regangan yang timbul pada struktur. Hal-hal yang merupakan kelebihan alat ukur ini dibandingkan jenis lain adalah : mudahnya memperbesar (secara elektrik) regangan yang dibaca, mudahnya pencatatan hasil pengukuran, dan karena kecilnya (ukuran dan massanya), mudah dipasang di dalam benda uji, dapat digunakan baik untuk pengujian statik dan dinamis, dan pembacaan dapat dilakukan terpisah, serta ketelitiannya yang sangat tinggi (dapat membaca regangan sampai 1×10^{-6} in/in).

Electrical strain gage dapat dibuat dengan bermacam-macam konfigurasi sesuai keperluan. Secara umum konfigurasi tersebut dapat dikelompokkan menjadi :

a. *Single grid*.

Pada tipe ini, hanya terdapat satu buah *strain gage*, sehingga pemakaiannya hanya terbatas untuk mengukur regangan pada satu arah tertentu di suatu titik. Panjang *strain gage* tipe ini dapat berkisar antara $\frac{1}{64}$ inchi (0,4

mm) sampai 4 inchi (10,2 cm) dan lebarnya 0,03 inchi (0,8 mm) sampai $\frac{1}{4}$ inchi (0,635 cm). Tentu saja pemilihan panjang *strain gage* yang dipakai maupun letak dan jumlah yang dipakai disesuaikan dengan masalah/model yang dihadapi, dan umumnya ditentukan oleh : (1). *strain gradient*, (2). ukuran model atau specimen, (3) bahan yang dipakai untuk membuat model.

Model yang dibuat dari bahan beton/beton bertulang memerlukan *strain gage* yang relatif lebih panjang agar regangan yang terukur tidak hanya pada batuan atau pasta semennya saja.

b. *Two element rosettes*

Pada tipe ini, terdapat 2 elemen *strain gage* yang biasanya dipasang dengan arah saling tegak lurus antara yang satu dengan yang lainnya. Tipe ini dapat mengukur regangan di suatu titik dalam dua arah yang saling tegak lurus, dan arah-arrah tersebut dapat disesuaikan dengan arah-arrah *principal stresses*.

Dengan demikian *two element rosettes* ini umumnya dipakai pada model yang arah tegangan-tegangan utama-nya diketahui dengan pasti.

c. *Three element rosettes*

Tipe ini tersusun dari 3 elemen *strain gage* yang biasanya dipasang sedemikian sehingga membuat sudut 45° . dan dikenal sebagai *rectangular rosette*, atau membentuk sudut antara sebesar 60° dan dikenal sebagai *delta rosette*.

Dengan *three element rosettes* ini, regangan dengan tiga arah yang berbeda di suatu titik dapat diukur. Seperti kita ketahui dari teori elastisitas, dengan diketahuinya regangan di suatu titik pada tiga arah yang berbeda, maka arah regangan-regangan utama (yang juga merupakan arah tegangan-tegangan utama) pada titik tersebut (yang berada pada permukaan specimen) dapat ditetapkan/dihitung.

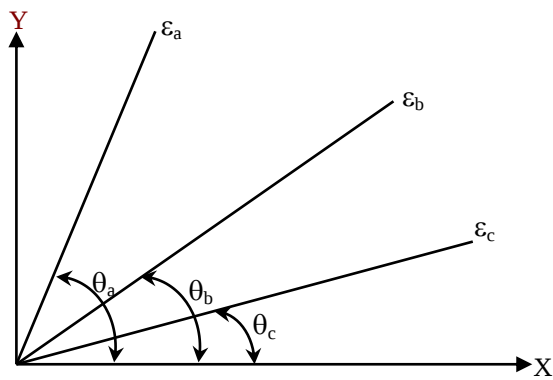
2.3 Tegangan berdasarkan regangan dalam tiga arah berbeda

Regangan ε_θ yang berarah θ terhadap sumbu - x (Gambar 1) dapat dikorelasikan dengan regangan arah sumbu - x, ε_x , regangan arah sumbu - y, ε_y dan regangan geser dalam bidang xy, τ_{xy} , sesuai rumus berikut (Suhendro, 2000) :

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \dots\dots(7)$$

atau :

$$\varepsilon_\theta = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \dots\dots(8)$$



Gambar 1. Regangan arah θ_a , θ_b , dan θ_c terhadap sumbu- x

Dari rumus 8 di atas jelas terlihat bahwa diperlukan tiga nilai ε_θ yang berbeda untuk memperoleh nilai - nilai ε_x , ε_y dan γ_{xy} . Apabila tiga *strain gage* a, b, dan c diletakkan pada suatu titik dengan arah θ_a , θ_b dan θ_c terhadap sumbu-x, sedemikian rupa sehingga membentuk suatu susunan roset (Gambar 1.), maka rumus 8 di atas dapat dituliskan dalam bentuk lain menjadi sebagai berikut :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_a &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_a + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_a \\ \varepsilon_b &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_b + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_b \\ \varepsilon_c &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_c + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_c \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

Nilai-nilai ε_a , ε_b , dan ε_c dapat diperoleh dari pembacaan strain indicator sehingga dengan

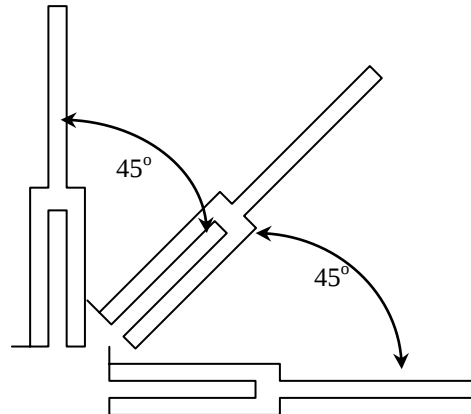
menggunakan rumus 6-c nilai ε_y , ε_x dan γ_{xy} dapat dihitung.

Selanjutnya besar dan arah regangan-regangan utama ε_1 dan ε_2 dapat dihitung dengan rumus :

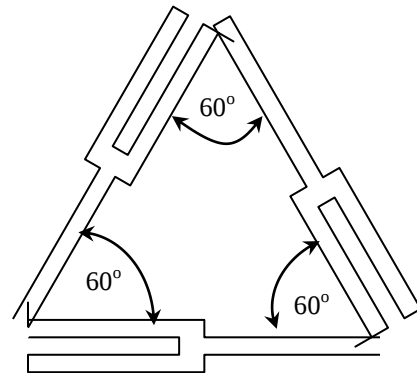
$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \left[\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots(10)$$

$$\tan 2\theta_p = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \dots\dots\dots(11)$$

dan dengan rumus-rumus 4 dan 5 tegangan-tegangan utama σ_1 dan σ_2 dapat diperoleh. Walaupun arah θ_a , θ_b dan θ_c boleh ditetapkan sembarangan, namun dalam praktek lebih disukai penggunaan sudut 45° sehingga membentuk *rectangular rosette* (Gambar 2) atau sudut 60° sehingga membentuk *delta rosette* (Gambar 3).

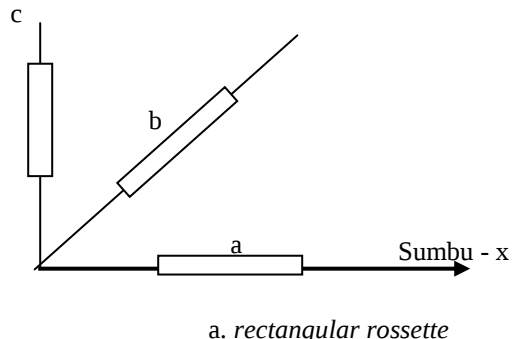
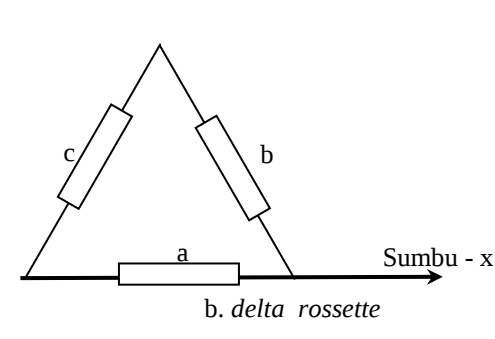


Gambar 2. Rectangular rosette



Gambar 3. Delta rosette

Tabel 1. Rumus-rumus untuk *rectangular rosette* & *delta rosette*

 a. <i>rectangular rosette</i>	 b. <i>delta rosette</i>
$A = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2}$ $B = \frac{\epsilon_a - \epsilon_c}{2}$ $C = \frac{2\epsilon_b - (\epsilon_a + \epsilon_c)}{2}$	$A = \frac{\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c}{3}$ $B = \epsilon_a - \frac{\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c}{3}$ $C = \frac{\epsilon_c - \epsilon_b}{\sqrt{3}}$

Untuk *rectangular rosette* dan *delta rosette* dengan menempatkan susunan *rosette* sedemikian rupa sehingga arah ϵ_a berhimpit dengan sumbu-x (Gambar pada Tabel 1), maka prosedur hitungan tegangan-tegangan utama berdasarkan rumus-rumus yang telah diuraikan menjadi sangat sederhana dan ditulis secara ringkas dalam Tabel 1 di atas, di mana :

$$K_1 = \frac{E}{(1-\nu)} \dots\dots\dots(12)$$

$$K_2 = \frac{E}{(1+\nu)} \dots\dots\dots(13)$$

$$\sigma_{\max} = K_1 \cdot A + K_2 \cdot \sqrt{B^2 + C^2} \dots\dots\dots(14)$$

$$\sigma_{\min} = K_1 \cdot A - K_2 \cdot \sqrt{B^2 + C^2} \dots\dots\dots(15)$$

$$\theta_p = \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{C}{B} \right) \dots\dots\dots(16)$$

$$\tau_{\max} = K_2 \sqrt{B^2 + C^2} \dots\dots\dots(17)$$

3. Metode Eksperimen

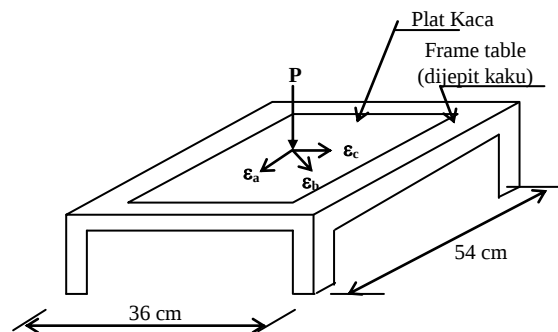
3.1 Alat yang digunakan

- Strain indicator dengan ketelitian pembacaan regangan sebesar 1 micro (μ) strain (0,000001 in/in).
- Strain gage tipe *rectangular rosette* (1 buah).
- Kabel-kabel penghubung.
- Dial gage (2 buah).

- Bandul beban 1000 gram (4 buah), 500 gram (2 buah).
- Meja baja sebagai frame.

3.2 Benda uji

Benda uji yang dipakai berupa pelat dari bahan *plexyglass* berukuran 36 cm x 54 cm, tebal 0,50 cm. Pelat tersebut dijepit dengan frame baja pada keempat sisinya. Lokasi dan orientasi strain gage yang dipasang beserta sistem pembebanan dapat dilihat pada Gambar 4 :



Gambar 4. Benda uji pelat lentur

3.3 Prosedur eksperimen

- Strain gage tipe *rectangular rosette* dipasang pada titik C (bagian bawah permukaan pelat) yang arah dan tujuan yang diinginkan dicapai.
- Kabel penghubung dipasang memakai sistem sirkuit *quarter bridge* ke strain gage indikator.

- c. Diset-up pembacaan pada strain indikator untuk tiap arah strain gage.
- d. Beban diberikan dengan penambahan setiap 0.5 kg sampai mencapai 5 kg pada tengah-tengah pelat. Pada setiap pembebanan beban 0.5 kg dicatat nilai regangan $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, dan ε_3 .
- e. Setelah beban terakhir dipasang, pengamatan besarnya regangan $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, dan ε_3 dapat dilakukan lagi pada setiap pengurangan beban sebesar 0.5 kg.

Data-data pembacaan strain indikator dan nilai regangan yang diperoleh akibat pembebanan pada pelat dapat dilihat pada Tabel 2.

Nilai regangan diperoleh dengan mengurangi nilai pembacaan strain indikator dengan pembacaan awal (sebelum dibebani) strain indikator (lihat Tabel 3) atau $\varepsilon = \varepsilon_i$ (pembacaan strain indikator) - ε_0 (pembacaan awal).

Untuk menentukan regangan yang terjadi diambil nilai rata-ratanya yaitu :

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_i (\text{penambahan beban}) + \varepsilon_i (\text{pengurangan beban})}{2}$$

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil eksperimen

Tabel 2. Pembacaan regangan pada strain indikator untuk pelat

Beban (gram)	Pembacaan strain indikator ($\times 10^{-6}$) μ starin					
	Penambahan beban			Pengurangan beban		
	ε_a	ε_b	ε_c	ε_a	ε_b	ε_c
0	1	1	2	4	3	3
500	60	65	89	52	44	32
1000	108	120	118	83	81	67
1500	135	149	136	118	123	102
2000	162	186	168	155	170	139
2500	191	221	195	184	207	173
3000	218	255	223	220	251	211
3500	249	291	253	247	286	244
4000	272	322	282	274	322	279
4500	293	350	311	293	349	309
5000	306	367	325	306	367	325

Tabel 3. Nilai regangan dan lendutan rata-rata pada titik C

Beban (gram)	Nilai regangan (x 10 ⁻⁶)						Δ_1 (x 10 ⁻⁶) M <i>load</i>	Δ_2 (x 10 ⁻⁶) M <i>Unload</i>
	Penambahan beban (Load)			Pengurangan beban (Unload)				
	ε_a	ε_b	ε_c	ε_a	ε_b	ε_c		
0	0	0	0	3	2	1	0	2
500	59	64	87	51	43	30	6	8
1000	107	119	116	82	80	65	12	17
1500	134	148	134	117	122	100	18	23
2000	161	185	166	154	169	137	25	33
2500	190	220	193	183	206	171	30	39
3000	217	254	221	219	250	209	36	47
3500	248	290	251	246	285	242	41	54
4000	271	321	280	273	321	277	47	61
4500	292	349	309	292	348	307	52	67
5000	305	366	323	305	366	323	55	69

Tabel 4 . Tegangan-regangan utama dan lendutan pelat berdasarkan hasil eksperimen

Beban (gram)	Regangan rata-rata (x 10 ⁻⁶)			Rata2 Δ (x 10 ⁻⁶)	σ ₁ (kg/cm ²) min	σ ₂ (kg/cm ²) max	τ _{max} (kg/cm ²)	θ
	ε _a	ε _b	ε _c					
0	1.5	1.0	0.5	1.0	2.94	4.56	0.81	0.00
500	55.0	53.5	58.5	7.0	156.79	168.71	5.96	30.87
1000	94.5	99.5	90.5	14.5	279.24	302.76	11.76	37.05
1500	125.5	135.0	117.0	20.5	367.50	414.00	23.25	36.43
2000	157.5	177.0	151.5	29.0	465.08	538.42	36.67	41.22
2500	186.5	213.0	182.0	34.5	552.67	645.83	46.58	42.78
3000	218.0	252.0	215.0	41.5	647.60	762.40	57.40	43.81
3500	247.0	287.5	246.5	47.5	735.92	867.58	65.83	44.85
4000	272.0	321.0	278.5	54.0	815.41	963.59	74.09	-42.99
4500	292.0	348.5	308.0	59.5	881.35	1,040.15	79.40	-40.34
5000	305.0	366.0	323.0	62.0	921.25	1,091.75	85.25	-40.11

4.2 Analisis hasil eksperimen

Besar dan arah tegangan-regangan ditengah pelat pada bagian permukaan bawah dihitung berdasarkan nilai regangan ϵ_1, ϵ_2 , dan ϵ_3 yang diperoleh dari pembacaan strain indikator Analisis Tegangan Regangan Pada Tengah Bentang Plat Hasil Eksperimen untuk beban 5 kg.

Hasil perhitungan dengan beban 500 gram sampai dengan 4.500 gram hasilnya disajikan dalam Tabel 4.

Besar dan arah tegangan regangan utama pelat pada tengah bentang pelat dapat ditentukan dari pembacaan strain gage tipe *rectangular rosette* yang ditempatkan pada titik yang ditinjau tersebut.

5. Kesimpulan

- Nilai dan arah tegangan regangan utama ditentukan dengan pembacaan *strain gage* tipe *rectangular rosette* yang ditempatkan pada titik yang ditinjau.
- Dari hasil pengujian pelat dapat diperoleh besar dan arah tegangan utama pada bagian tengah bentang pelat akibat beban terpusat. Tegangan maksimum $\sigma_{\max} = 1.091,75 \text{ kg/cm}^2$, tegangan geser maksimum $\tau_{\max} = 85.25 \text{ kg/cm}^2$, dengan arah $\theta_p = -40,11$ (searah jarum jam).

6. Daftar Pustaka

- Dally, J.W., and Riley, W.F. ,1987, *Experimental Stress Analysis*, New York : McGraw Hill Book Company.
- Dally, J.W., Riley, W.F., and McConnell, K.G., 1984, *Intrumentation For Engineering Measurements*, New York : John Wiley & Sons, Inc.
- David, F.W., Nolle, H. ,1982, *Experimental Modelling in Engineering*, London, Butterworths.
- Sabnis, G.M., Harris, H.G., White, R.N., M.S. ,1983, *Structural Modeling and Experimental Techniques*, New Jersey : Prentice Hall Inc.
- Suhendro, B .,2000, *Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental*, Betha Office, Yogyakarta.