

RANCANG BANGUN PROTOTIPE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER MODEL INDUKTIF

Engkir Sukirman

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

ABSTRAK

RANCANG BANGUN PROTOTIPE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER MODEL INDUKTIF. Rancang bangun prototipe *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* model induktif telah dilakukan. Prototipe *SFCL* model induktif dirancang dengan topologi transformator, memiliki lilitan primer dari kawat tembaga dan lilitan sekunder berupa tabung superkonduktor yang dibuat dari bahan YBCO. Simulasi *SFCL* dilakukan pada tegangan $V_s = 3.000$ volt, frekuensi arus bolak-balik $\omega = 50$ Hz dan beban jaringan $R_L = 1.250 \Omega$. Jika *SFCL* dipasang pada rangkaian tanpa beban dan *SFCL* dalam keadaan tidak resistif, maka arus yang mengalir bisa mencapai $I_s = (9,6-11,6) \times 10^6$ A. Pada keadaan resistif, arus tersebut dapat direduksi oleh *SFCL* hingga $I_s = (3,3-9,1) \times 10^{-1}$ A. Jadi arus disusutkan $(2,9-1,3) \times 10^7$ kali. Jika *SFCL* dipasang pada rangkaian berbeban $R_L = 1250 \Omega$ dan *SFCL* dalam keadaan tidak resistif, maka arus yang mengalir adalah $I_s = 2,4$ A. Tetapi pada keadaan resistif, *SFCL* dapat mereduksi I_s menjadi $(2,9-6,6) \times 10^{-1}$ A. Jadi arus I_s disusutkan 3,6 hingga 8,3 kali. Prototipe *SFCL* dapat difungsikan sebagai pengaman jaringan terhadap arus gagal akibat hubungan singkat.

Kata kunci : Rancang bangun, prototipe *SFCL*

ABSTRACT

DESIGN OF THE INDUCTIVE MODEL SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER PROTOTYPE. Design of the inductive model Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) prototype has been conducted. The inductive model SFCL prototype was designed with a transformer topology, having a primary coils of Copper wire and the secondary coils being the tube of superconductor made of YBCO material. The SFCL simulation have been carried out on a voltage of $V_s = 3000$ volt, the alternating current frequency of $\omega = 50$ Hz and the circuit load of $R_L = 1250 \Omega$. When the SFCL is applied on a circuit without load and the SFCL being in the non-resistive state, then the current of $I_s = (9.6-11.6) \times 10^6$ A is able to be attained in the circuit. On the resistive state, the current can be reduced to be $I_s = (3.3-9.1) \times 10^{-1}$ A. Thus, the current reduction is of $(2.9-1.3) \times 10^7$ times. When the SFCL is applied on a circuit with load of $R_L = 1250 \Omega$ and the SFCL being in the non-resistive state, then the current in the circuit is $I_s = 2.4$ A. But, on the resistive state, the current can be reduced to be $I_s = (2.9-6.6) \times 10^{-1}$ A. Thus, the current is reduced to 3.6 until 8.3 times. The SFCL prototype can be applied as a circuit guard against the fault current due to the short circuit.

Key words : Design, SFCL prototype

PENDAHULUAN

Aplikasi STT (Superkonduktor T_c Tinggi) sangat luas antara lain digunakan sebagai : sensor untuk mendeteksi sinyal-sinyal yang sangat lemah, baik listrik, magnet maupun radiasi. Disamping itu, STT dapat dibuat elektro magnetik yang bisa membangkitkan medan magnet yang sangat kuat hingga 50 Tesla dan *device* frekuensi tinggi (*filter, accelerator cavities, transistors, oscillators, mixers dan receivers*). STT juga digunakan dalam rangkaian digital (*AD, DA dan time-to-digital converters, Josephson sampler, digital logic, data storage, data distribution switches*). Selain itu, STT juga dapat diaplikasikan pada bidang energi listrik (*power application*). Aplikasi STT pada bidang energi listrik meliputi : *power cable, fault current limiter, transformers, generators, motors, energy storage (superconducting magnetic energy storage dan flywheels)*. Aplikasi STT

pada *fault current limiter* telah menarik banyak perhatian para peneliti, karena selain sederhana juga biaya pengoperasiannya 25 kali hingga 100 kali lebih murah dibandingkan dengan aplikasi STR (Superkonduktor T_c Rendah); dimana STR beroperasi pada suhu He cair sedangkan STT pada N_2 cair [1].

Pembatas arus gagal dari bahan superkonduktor atau biasa disebut *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* merupakan suatu komponen pelindung yang sangat penting dalam sistem jaringan listrik, memanfaatkan karakteristik non-linier yang ditampilkan oleh bahan ketika terjadi transisi fasa dari keadaan tidak resistif ke keadaan resistif. Transisi fasa superkonduktor terjadi akibat arus yang mengalir pada bahan tersebut meningkat sehingga melebihi arus kritis bahan tersebut. Penyebab peningkatan

arus tersebut adalah karena telah terjadi hubungan singkat pada jaringan.

SFCL dimanfaatkan untuk mengamankan sistem pembangkitan (*generation*), transmisi dan distribusi energi listrik. SFCL berperan seperti sebuah saklar otomatis yang beroperasi sangat cepat tanpa suatu alat kontrol dan mampu mereduksi arus transien yang besar [1-4]. Beberapa prototipe SFCL telah berhasil diuji coba pada jaringan transmisi yang menyalurkan daya listrik hingga 100 kVA dan terbukti *feasible* secara teknis [5-7].

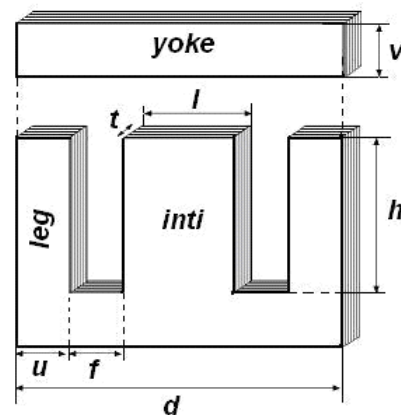
Rancang bangun SFCL yang paling sederhana adalah dengan memasang elemen superkonduktor secara seri dengan jaringan. Namun demikian, rancang bangun seperti ini menimbulkan disipasi energi yang berlebihan ketika terjadi arus gagal sehingga dapat merusak elemen superkonduktor. Rancang bangun yang aman adalah jika elemen superkonduktor dipasang sebagai perisai terhadap medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh arus sumber. Dengan kata lain SFCL dirancang dengan topologi transformator (trafo), dimana kumparan primer : kawat tembaga biasa dan kumparan sekunder : cincin STT. Jadi, cincin STT berperan sebagai perisai medan magnet (*magnetic shield*), yakni melindungi teras besi dari pengaruh medan magnet yang dibangkitkan oleh kumparan primer. Pada kondisi *fault*, arus induksi pada cincin STT melebihi arus kritisnya, sehingga cincin tidak lagi superkonduktif dan oleh karenanya cincin STT tidak membangkitkan medan magnet induksi. Sehingga medan magnet yang dibangkitkan oleh kumparan primer menembus ke dalam teras besi karena tidak terhapuskan dan oleh karena itu impedansi SFCL meningkat.

Pada penelitian terdahulu [8,9] telah ditemukan bahwa tegangan ambang SFCL dapat dinaikan dengan cara meningkatkan arus kritis dan jumlah cincin STT yang ditumpuk. Eksperimen tersebut dilakukan pada SFCL skala laboratorium, yakni SFCL untuk tegangan sumber V_s antara 0 volt hingga 220 volt. Pada penelitian selanjutnya dibuat SFCL semiprototipe, yakni SFCL untuk tegangan sumber V_s antara 220 volt dan 1000 volt [10]. Pada kondisi optimum, SFCL semiprototipe ini dapat mengamankan jaringan bertegangan sekitar 607 volt *rms*. Agar SFCL semiprototipe ini dapat digunakan untuk mengamankan jaringan bertegangan 1.000 volt *rms*, maka selain harus dipasang cincin dengan jumlah maksimum ($N_r = 15$), juga cincin harus memiliki arus kritis $I_c \approx 6$ A. Penelitian sekarang adalah membuat rancang bangun prototipe SFCL yang dapat digunakan untuk mengamankan jaringan bertegangan lebih besar dari 1.000 volt. Tujuan penelitian adalah menentukan dimensi trafo, jumlah lilitan primer, tinggi tabung STT dan persyaratan arus kritis minimal yang disyaratkan bagi tabung STT.

PENENTUAN DIMENSI TRAFO

Seperti telah disinggung pada bagian pendahuluan, bahwa model SFCL yang digunakan untuk

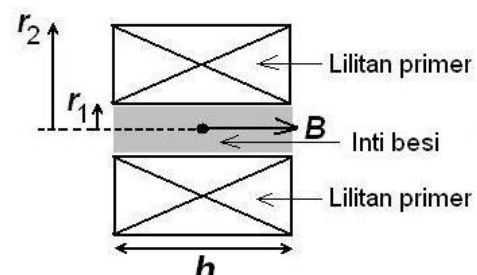
mengamankan sistem pembangkitan, transmisi dan distribusi energi listrik adalah model induktif. SFCL model induktif ini pada dasarnya adalah trafo dengan lilitan sekunder berupa cincin STT yang ditumpuk sehingga menyerupai tabung. Cincin STT yang bertumpuk itu selanjutnya disebut tabung STT. Jadi, SFCL model induktif adalah trafo dimana lilitan sekundernya dihubung-singkatkan. Trafo yang digunakan untuk SFCL model induktif adalah trafo model E-I seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tampak pada gambar tersebut bahwa trafo model E-I tersebut terdiri dari inti besi, *yoke* dan *leg*. Dimana *leg* dan inti besi membentuk huruf E dan *yoke* membentuk huruf I yang berbaring. Oleh karena itu trafo jenis ini disebut trafo model E-I.



Gambar 1. Inti besi model E - I (mantol).

Inti besi berdimensi : tinggi (h) \times lebar (l) \times tebal (t) dan *leg* memiliki dimensi : tinggi (h) \times lebar (u) \times tebal (t). Sedangkan *yoke* berdimensi : panjang (d) \times tinggi (v) \times tebal (t). Penampang lintang inti besi berbentuk persegi panjang dengan luas : $l \times t$. Karena penampang lintang cincin STT dan lilitan primer keduanya berbentuk lingkaran, maka penampang lintang inti besi dapat disetarakan dengan lingkaran dengan jari-jari r_{co} . Sistem inti besi dan lilitan primer pada sebuah trafo dapat dipandang sebagai suatu solenoid, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Oleh karena itu, kuat medan magnet induksi, B pada posisi tengah inti besi dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot N_1}{2(r_2 - r_1)} \ln \frac{(\sqrt{r_2^2 + (h/2)^2}) + r_2}{(\sqrt{r_1^2 + (h/2)^2}) + r_1} \dots \dots \dots (1)$$



Gambar 2. Penampang lintang solenoid.

dimana μ_0 , I_p , N_1 , r_1 , r_2 dan h berturut-turut adalah permeabilitas udara, arus primer, jumlah lilitan primer, jari-jari lingkaran dalam, jari-jari lingkaran luar dan panjang lilitan atau tinggi inti besi. Agar medan magnet induksi B maksimum, maka disyaratkan :

$$r_2 = 3.r_1, \dots \dots \dots (2)$$

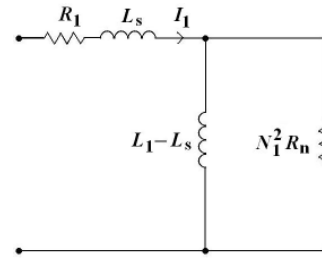
Rangkaian setara SFCL ditunjukkan pada Gambar 3 [1,5,7]. Dengan demikian impedansi SFCL memenuhi persamaan :

$$Z_t = R_1 + \omega L_s + \frac{N_1^2 R_n(T,H) \omega (L_1 - L_s)}{\sqrt{\{N_1^2 R_n(T,H)\}^2 + \{\omega (L_1 - L_s)\}^2}} \dots (3)$$

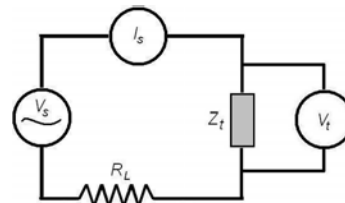
$$\omega L_s = \frac{\omega \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu}{h} (r_2^2 - r_{s2}^2) \dots \dots \dots (4)$$

$$\omega L_1 = \frac{\omega \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot N_1^2}{h} [r_2^2 + (\mu - 1) r_{co}^2] \dots \dots \dots (5)$$

dimana, R_1 = resistansi lilitan primer, L_s = induktansi bocor akibat adanya celah udara antara lilitan primer dan sekunder (tabung STT), μ_0 = permeabilitas udara = $4\pi \times 10^{-7}$, μ = permeabilitas teras besi = 120, L_1 = induktansi SFCL, $R_n(T,H)$ = resistansi tabung STT, N_1 = jumlah lilitan primer, h = tinggi kumparan primer, ω = frekuensi sudut arus bolak balik (ac), r_2 = jari-jari luar lilitan primer, r_{s2} = jari-jari luar cincin STT dan r_{co} = jari-jari teras besi. Dengan demikian SFCL dapat dipandang sebagai sebuah komponen listrik yang memiliki beban Z_t . Di dalam jaringan, SFCL dipasang seri dengan komponen-komponen listrik yang dilindungi, dalam pembahasan ini diwakili dengan sebuah komponen dengan beban R_L (Gambar 4).



Gambar 3. Rangkaian setara SFCL.



Gambar 4. SFCL dengan beban Zt dipasang di dalam suatu jaringan yang memiliki beban RL, tegangan sumber terhadap dan arus sumber Is.

Data parameter dimensi trafo pada penelitian terdahulu, yakni trafo semiprototipe [10] dan trafo skala laboratorium [9] ditunjukkan pada Tabel 1. Rancang bangun SFCL prototipe dilakukan dengan menambah dimensi trafo semiprototipe pada Tabel 1. Dalam hal ini penambahan dimensi trafo semiprototipe tersebut dilakukan dengan menerapkan syarat batas pada persamaan (2) dan syarat batas persamaan (6) :

$$r_{s2} = r_1 - 0,001; r_{s1} = r_{s2} - 0,012; r_{co} = r_{s1} - 0,001 \dots (6)$$

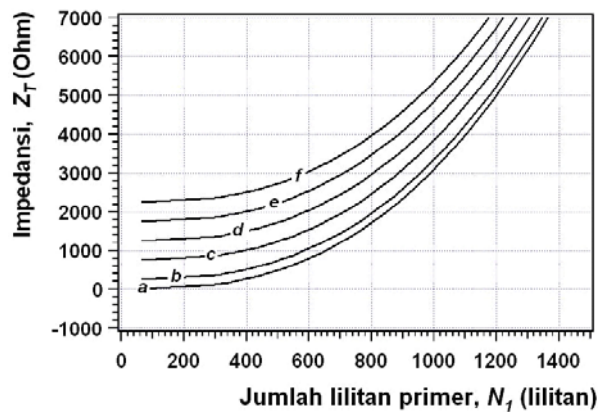
dimana angka 0,001 [M] adalah celah udara antara cincin dan lilitan primer dan celah udara antara cincin dan teras besi ; angka 0,012 [M] adalah tebal cincin [10]. Tampak pada persamaan (2) dan (6) bahwa parameter dimensi trafo : r_2 , r_{s2} , r_{s1} , r_{co} , u dan v merupakan fungsi dari r_1 .

Tabel 1. Spesifikasi SFCL

Komponen	Parameter	Simbol	Nilai		Satuan
			SFCL [10]	SFCL [9]	
Teras besi	Bahan	FeSi	-	FeSi	-
	Panjang	h	0,1360	0,0671	m
	Lebar	l	0,0300	0,0223	m
	Tebal	t	0,0123	0,0051	m
	Jari-jari teras	r_{co}	0,0108	0,0099	m
	Permeabilitas	μ	120	120	-
Yoke	Panjang	d	0,1700	0,1332	m
	Lebar	v	0,0220	0,0221	m
	Tebal	t	0,0123	0,0051	m
Leg	Panjang	$h+v$	0,1360	0,0671	m
	Lebar	u	0,0150	0,0222	m
	Tebal	t	0,0123	0,0051	m
Lilitan primer	Bahan	Cu	-	Cu	-
	Diameter	ϕ_k	0,0020	0,0005	m
	Jari-jari luar	r_2	0,0700	0,0335	m
	Jari-jari dalam	r_1	0,0560	0,0260	m
	Tinggi	h	0,0850	0,0590	m
	Jumlah lilitan	N_1	297	1250	lilitan

Oleh karena itu, untuk memperbesar dimensi trafo semiprototipe hanya diperlukan faktor penambah Δr_1 pada r_1 . Dalam hal ini diambil harga $\Delta r_1 = 0,002$ m.

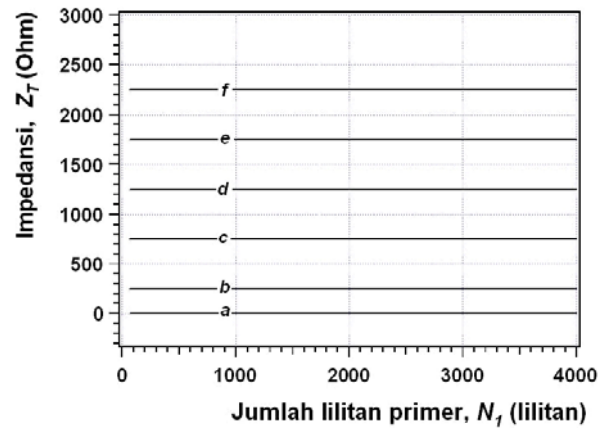
Luas penampang lintang lilitan primer pada trafo semiprototipe (Tabel 1) adalah $L_p = (r_2 - r_1) \times h = 0,0251$ m². Pada daerah seluas L_p tersebut terdapat lilitan kawat Cu sebanyak $N_1 = 297$ [10]. Jadi, pada setiap m² terdapat $N_1/L_p = 11.838,3291$ lilitan primer. Oleh karena itu, jumlah lilitan primer (N_1) untuk setiap dimensi trafo dapat dihitung dengan cara mengalikan harga luas penampang lintang L_p dengan faktor 11.838,3291. Dengan demikian harga impedansi SFCL untuk setiap dimensi trafo dapat dihitung menggunakan persamaan (3), persamaan (4) dan persamaan (5), baik pada kondisi *fault* maupun kondisi normal. Dimana pada kondisi *fault*, Ω dan kondisi normal sebesar 0 Ω .



Gambar 5. Grafik hubungan antara Z_T dan N_1 pada SFCL kondisi *fault*, kurva a, b, c, d, e dan f adalah berturut-turut untuk beban $R_L = 0 \Omega, 250 \Omega, 750 \Omega, 1250 \Omega, 1750 \Omega$ dan 2250Ω .

Grafik hubungan antara impedansi jaringan Z_T dan jumlah lilitan primer N_1 pada kondisi *fault* ditunjukkan pada Gambar 5. Tampak pada gambar tersebut, impedansi jaringan : $Z_T = R_L + Z_f$, harganya naik secara eksponensial sejalan dengan bertambahnya jumlah lilitan primer N_1 . Semakin banyak jumlah lilitan primer, impedansi jaringan cenderung sama dengan impedansi SFCL (Z_f). Jadi, jika N_1 besar, impedansi jaringan tidak lagi dipengaruhi oleh beban rangkaian R_L melainkan hanya oleh Z_f , dengan kata lain $Z_T \approx Z_f$. Keadaan sebaliknya terjadi pada pada kondisi normal, dimana impedansi jaringan tidak lagi dipengaruhi oleh impedansi SFCL, melainkan hanya oleh impedansi beban, dengan kata lain $Z_T \approx R_L$ (Gambar 6). Jadi berapapun harga N_1 , impedansi jaringan $Z_T \approx R_L$, karena $Z_f = 0$. Oleh karena itu pada kondisi dimana tidak terjadi gangguan (kondisi normal), SFCL tidak membebani jaringan.

Karena SFCL memiliki tofologi trafo, maka rancang bangun prototipe SFCL dilakukan dengan membuat sebuah trafo yang pada kondisi *fault* akan memberikan beban sebesar-besarnya terhadap jaringan, sehingga arus *fault* direduksi. Jelas dari uraian di atas bahwa agar Z_T besar, maka jumlah lilitan primer N_1 harus diperbesar.

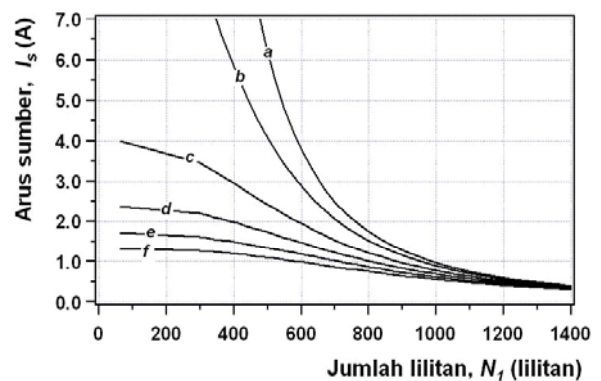


Gambar 6. Grafik hubungan antara Z_T dan N_1 pada SFCL kondisi normal, kurva a, b, c, d, e dan f adalah berturut-turut untuk beban $R_L = 0 \Omega, 250 \Omega, 750 \Omega, 1250 \Omega, 1750 \Omega$ dan 2250Ω .

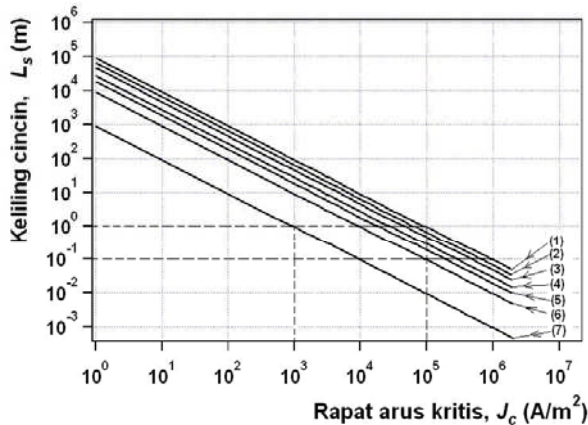
Namun demikian memperbesar N_1 berarti memperbesar dimensi trafo dan oleh karenanya memerlukan biaya yang lebih besar lagi. Jadi, rancang bangun prototipe SFCL dilakukan dengan mencari suatu harga N_1 sedemikian sehingga reduksi arus *fault* tidak bergantung pada tegangan dan beban jaringan.

Untuk mendapatkan dimensi trafo ($h, r_2, r_1, r_{s2}, r_{s1}, r_{co}, l, t$ dan N_p) yang memenuhi syarat-syarat di atas, maka dilakukan perhitungan. Misalkan SFCL dipasang pada suatu jaringan yang bertegangan V_s seperti ditunjukkan pada Gambar 4, V_s divariasikan besarnya mulai dari nol hingga ribuan volt dan dimensi trafo dinaikan harganya secara bertahap. Kemudian, impedansi jaringan Z_T untuk setiap dimensi trafo dan beban R_L dihitung menggunakan persamaan (3), persamaan (4) dan persamaan (5). Selanjutnya dari hubungan $V_s = Z_T I_s$ dapat dihitung I_s sebagai fungsi dari dimensi trafo terutama I_s fungsi N_1 , untuk masing-masing beban R_L , dalam hal ini $R_L = 0 \Omega, 250 \Omega, 750 \Omega, 1250 \Omega, 1750 \Omega$ dan 2250Ω .

Sehingga grafik hubungan antara I_s dan N_1 dapat ditentukan dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 7. Tampak pada gambar tersebut, bahwa dengan



Gambar 7. Grafik hubungan antara I_s dan N_1 pada SFCL, kurva a, b, c, d, e dan f adalah berturut-turut untuk beban $R_L = 0 \Omega, 250 \Omega, 750 \Omega, 1250 \Omega, 1750 \Omega$ dan 2250Ω pada $V_s = 3$ kV.



Gambar 8. L_s terhadap J_c , dimana grafik (1), (2), (3), (4), (5), (6) dan (7) berturut-turut untuk $I_c = 1000$ A, 700 A, 500 A, 300 A, 200 A, 100 A dan 10 A.

$N_l \geq 1.000$ lilitan, arus sumber I_s (arus fault) pada jaringan tanpa beban (kurva a) dan jaringan berbeban (kurva b, c, d, e dan f) dapat direduksi hingga lebih kecil dari 1 A. Jadi dimensi trafo yang cocok untuk digunakan sebagai prototipe SFCL adalah trafo dengan $N_l \geq 1.000$ lilitan, karena prototipe SFCL itu tidak lagi bergantung pada besarnya beban rangkaian. Berdasarkan persamaan (3), setiap harga N_l bersesuaian dengan parameter dimensi trafo tertentu ($h, r_2, r_1, r_{s2}, r_{s1}, r_{co}, l, t$ dan N_p). Oleh karena itu dimensi trafo untuk prototipe SFCL dapat ditentukan, hasilnya ditunjukkan pada Tabel 2, dimana $u = v \approx, l \approx 2r_{co}$ adalah panjang teras besi, $t =$ tebal teras besi dan $N_p =$ jumlah pelat besi dengan tebal masing-masing pelat adalah $t_0 = 0,00051$ m. Tebal teras besi dihitung dari persamaan luas penampang teras : $\pi \cdot r_{co}^2 = l \times t$. Jika l pada persamaan tersebut diganti dengan $2r_{co}$, maka didapat hubungan $t = (\pi \cdot r_{co}) / 2$ Jumlah pelat besi yang diperlukan adalah $N_p = t/t_0$.

PENENTUAN DIMENSI CINCIN STT

Cincin STT dari superkonduktor YBCO, dibuat di dalam cetakan baja yang dikeraskan. Sebelum

dilakukan pencetakan, dimensi cincin STT itu terlebih dahulu ditentukan, agar kelak arus induksi yang mengalir pada cincin STT tersebut dapat membangkitkan medan magnet, yang besar dan arahnya sedemikian sehingga medan magnet yang dibangkitkan oleh lilitan primer dapat dihapuskan seluruhnya. Jadi, cincin STT dibuat dengan ukuran (panjang dan luas penampang lintang) tertentu, sedemikian sehingga cincin STT bisa melindungi teras besi dari pengaruh medan magnet yang dibangkitkan oleh kumpulan primer yang bertegangan tinggi.

Arus maksimum, I_c yang masih dapat dialirkan tanpa hambatan pada cincin STT adalah memenuhi persamaan :

$$I_c = J_c S, \dots\dots\dots (7)$$

dimana J_c dan S berturut-turut adalah rapat arus kritis dan luas penampang lintang cincin superkonduktor. Hubungan antara keliling cincin, L_s dan resistansi keadaan normal, R_n adalah memenuhi persamaan :

$$L_s = \frac{S \cdot R_n}{\rho_n} \dots\dots\dots (8)$$

dimana, adalah resistivitas keadaan normal. Jika nilai S pada persamaan (7) dimasukkan ke dalam persamaan (8), maka didapat hubungan :

$$L_s = \frac{R_n I_c}{\rho_n J_c} \dots\dots\dots (9)$$

Dari penelitian terdahulu [10] didapat $= 3,2 \Omega \cdot m$ dan $R_n = 0,030 \Omega$. Oleh karena itu, dari persamaan (9) didapat grafik pada Gambar 8, yang menggambarkan hubungan antara besaran panjang L_s (m) dan rapat arus J_c ($A \cdot m^{-2}$) untuk setiap harga I_c tertentu. Tampak pada gambar tersebut grafik (1), (2), (3), (4), (5), (6) dan (7) berturut-turut untuk $I_c = 1000$ A, 700 A, 500 A, 300 A, 200 A, 100 A dan 10 A. Keliling cincin STT yang realistis adalah berorde antara 10^{-1} hingga 10^0 m, sehingga dari Gambar 8 dapat diprediksi harga rapat arus kritis cincin STT, yakni berkisar antara 10^3 hingga 10^6 A/m² dan harga arus kritis antara 10 hingga 1.000 A. Dari data parameter r_{s2} dan r_{s1} pada Tabel 2 dapat dihitung keliling cincin

Tabel 2. Spesifikasi prototipe SFCL.

No.	N_l (lilitan)	h (m)	r_2 (m)	r_1 (m)	r_{s2} (m)	r_{s1} (m)	r_{co} (m)	l (m)	t (m)	N_p (pelat)
1.	1024	0,416	0,312	0,104	0,103	0,091	0,090	0,180	0,141	277
2.	1064	0,424	0,318	0,106	0,105	0,093	0,092	0,184	0,144	283
3.	1105	0,432	0,324	0,108	0,107	0,095	0,094	0,188	0,148	290
4.	1146	0,440	0,330	0,110	0,109	0,097	0,096	0,192	0,151	296
5.	1188	0,448	0,336	0,112	0,111	0,099	0,098	0,196	0,154	302
6.	1231	0,456	0,342	0,114	0,113	0,101	0,100	0,200	0,157	308
7.	1274	0,464	0,348	0,116	0,115	0,103	0,102	0,204	0,160	314
8.	1319	0,472	0,354	0,118	0,117	0,105	0,104	0,208	0,163	320
9.	1364	0,480	0,360	0,120	0,119	0,107	0,106	0,212	0,166	327
10.	1410	0,488	0,366	0,122	0,121	0,109	0,108	0,216	0,170	333
11.	1456	0,496	0,372	0,124	0,123	0,111	0,110	0,220	0,173	339
12.	1503	0,504	0,378	0,126	0,125	0,113	0,112	0,224	0,176	345

Tabel 3. Keliling cincin YBCO (L_s) untuk prototipe SFCL.

No	r_{s2} (m)	r_{s1} (m)	r_s (m)	L_s (m)
1.	0,103	0,091	0,097	0,61
2.	0,105	0,093	0,099	0,62
3.	0,107	0,095	0,101	0,63
4.	0,109	0,097	0,103	0,65
5.	0,111	0,099	0,105	0,66
6.	0,113	0,101	0,107	0,67
7.	0,115	0,103	0,109	0,68
8.	0,117	0,105	0,111	0,70
9.	0,119	0,107	0,113	0,71
10.	0,121	0,109	0,115	0,72
11.	0,123	0,111	0,117	0,73
12.	0,125	0,113	0,119	0,75

STT, yakni , dimana r_s =adalah jari-jari cincin rata-rata dan hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 3.

SIMULASI

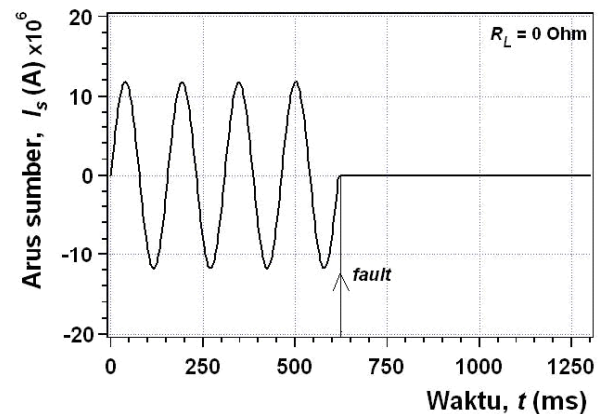
Dari Tabel 2 dan Tabel 3 diperoleh 12 buah rancangan untuk bangunan sebuah prototipe SFCL. Selanjutnya dipilih rancang-bangun SFCL No.1 (SFCL-1) dan SFCL No.12 (SFCL-12) untuk simulasi. Dimensi trafo untuk SFCL-1 adalah : $N_j = 1024$, $h = 0,416$ m, $0,312$ m, $0,104$ m, $0,097$ m, $0,090$ m, $l = 0,180$ m, $t = 0,141$ m dan $N_p = 277$. Dimensi trafo untuk SFCL-12 adalah : $N_j = 1503$, $h = 0,504$ m, $0,378$ m, $0,126$ m, $0,119$ m, $0,112$ m, $l = 0,224$ m, $t = 0,176$ m dan $N_p = 345$. Simulasi dilakukan di dalam rangkaian uji Gambar 4. Sumber tegangan V_s dihubungkan seri dengan sebuah beban $R_L = 1250 \Omega$ dan SFCL dengan impedansi Z_f . Jadi beban total rangkaian uji adalah , dimana Z_f memenuhi persamaan (3).

Sebagai pembanding, W. Paul [5] melakukan uji coba prototipe SFCL yang memiliki dimensi trafo : tinggi (h) dan jari-jari teras besi (r_{co}) berturut-turut 0,48 m dan 0,072 m, jari-jari lilitan primer (r) dan jari-jari cincin STT (r_s) berturut-turut adalah 0,14 m dan 0,10 m dengan berat total SFCL sekitar 200 kg. Dimensi trafo tersebut hampir sama dengan dimensi trafo pada penelitian sekarang ini. Prototipe SFCL W. Paul diuji coba pada rangkaian bertegangan $V_s = 480$ volt dan arus sumber I_s antara 130 A hingga 250 A, dimana besarnya arus sumber tersebut bergantung pada jumlah lilitan primer. Hasil uji coba yang dilakukan oleh W. Paul menunjukkan bahwa

prototipe SFCL itu dapat mereduksi arus *fault* hingga 5 kali lebih kecil.

Jika prototipe SFCL dipasang pada sumber arus bolak-balik dengan tegangan $V_s = 3.000$ volt, maka arus sumber I_s (A) dan impedansi rangkaian Z_T (Ω) pada kondisi SFCL tidak resistif (yakni kondisi dimana $R_n(T,H) = 0 \Omega$) dan pada kondisi SFCL resistif (yakni kondisi dimana $R_n(T,H) = 0,03 \Omega$), masing-masing ditunjukkan pada Tabel 4. Impedansi Z_T (Ω) dihitung menggunakan persamaan (3), persamaan (4) dan persamaan (5), sedangkan arus I_s (A) dihitung dari hubungan $V_s = Z_T I_s$. Tampak pada Tabel 4 bahwa jika SFCL dipasang pada rangkaian tanpa beban, maka pada keadaan SFCL tidak resistif, arus yang mengalir pada rangkaian adalah $I_s = (9,6-11,6) \times 10^6$ A.

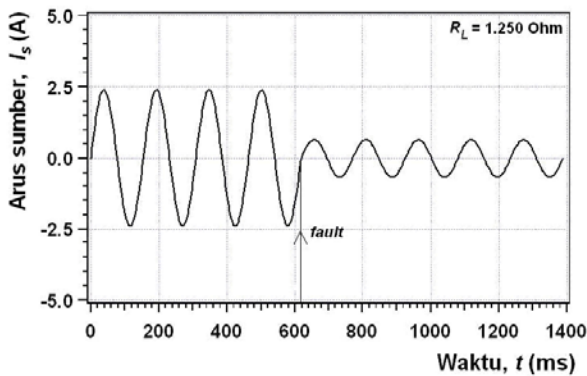
Namun pada keadaan SFCL resistif, ternyata arus I_s dapat direduksi oleh SFCL hingga $I_s = (3,3-9,1) \times 10^1$ A. Jadi arus disusutkan $(2,9-1,3) \times 10^7$ kali. Simulasi perubahan arus I_s fungsi waktu t ditunjukkan pada Gambar 9; ditunjukkan pada gambar tersebut bahwa keadaan resistif (*fault*) disimulasikan terjadi pada $t = 625$ ms. Pada Tabel 4 juga ditunjukkan bahwa jika SFCL dipasang pada rangkaian berbeban $R_L = 1250 \Omega$, maka pada keadaan SFCL tidak resistif, arus yang mengalir pada rangkaian adalah $I_s = 2,4$ A. Tetapi pada keadaan SFCL resistif, SFCL dapat mereduksi arus hingga $I_s = (2,9-6,6) \times 10^{-1}$ A. Jadi arus disusutkan 8,3 kali hingga 3,6 kali. Simulasi perubahan arus I_s fungsi waktu t ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Simulasi perubahan arus I_s fungsi waktu t pada rangkaian tanpa beban.

Tabel 4. Arus sumber I_s (A) dan impedansi rangkaian Z_T (Ω) pada $V_s = 3.000$ volt.

Parameter		$R_L = 0 \Omega$		$R_L = 1.250 \Omega$	
		SFCL tidak resistif	SFCL resistif	SFCL tidak resistif	SFCL resistif
$N_j = 1024$	Z_T (Ω)	0,000259	3.300,9	1.250,0	4.550,9
	I_s (A)	$11,6 \times 10^6$	$9,1 \times 10^1$	2,4	$6,6 \times 10^1$
$N_j = 1503$	Z_T (Ω)	0,000313	9.016,6	1.250,0	10.266,6
	I_s (A)	$9,6 \times 10^6$	$3,3 \times 10^1$	2,4	$2,9 \times 10^1$



Gambar 10. Simulasi perubahan arus I_s fungsi waktu t pada rangkaian dengan beban.

- [6]. J. CAVE, D. WILLEN, R. NADI and BRISSETTE, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **9**(1999) 1335
- [7]. D. WILLEN and J. CAVE, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5** (1995) 1047
- [8]. I. G. CHEN and J. M. LIN, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11** (2001) 2038
- [9]. E. SUKIRMAN, WISNU ARI ADI, DIDIN S. WINATAPURA dan RISWAL H. SIREGAR, *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir*, Puslitbang Teknologi Maju, Yogyakarta, (2003)
- [10]. E. SUKIRMAN, WISNU ARI ADI, DIDIN S. WINATAPURA dan YUSTINUS M.P., *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Fakultas Teknologi Industri,

KESIMPULAN

Prototipe *SFCL* model induktif adalah *SFCL* yang dapat digunakan untuk mengamankan jaringan bertegangan lebih besar dari 1.000 volt. Rancang bangun prototipe *SFCL* model induktif meliputi penentuan dimensi trafo, jumlah lilitan primer, dimensi tabung STT dan persyaratan arus kritis minimal yang disyaratkan bagi tabung STT. Dimensi trafo yang memenuhi syarat untuk prototipe *SFCL* model induktif adalah trafo dengan jumlah lilitan primer $N_p \geq 1024$ lilitan. Semakin banyak jumlah lilitan primer, semakin besar impedansi *SFCL* resistif. Ini berarti semakin baik fungsi *SFCL* sebagai pengaman jaringan listrik tegangan tinggi. Keliling cincin, rapat arus kritis dan arus kritis STT bagi sebuah prototipe *SFCL* model induktif berturut-turut berorde 10^{-1} - 10^0 m, 10^3 - 10^6 A/m² dan 10-1.000 A.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada semua pihak yang terkait dengan kegiatan penelitian ini, terutama Bapak Drs. Sumanto (Ka Bag TU PTBIN) beserta staf, Bapak Dr. Setyo Purwanto (Ka BKAN) dan Bapak Dr. Ridwan (Ka PTBIN).

DAFTARACUAN

- [1]. L. S. FLEISHMAN, YU. A. BASHKIROV, V. A. ARESTEANU, Y. BRISSETTE and J. R. CAVE, *IEEE Transactions On Appl. Supercond.*, **3** (1993) 570
- [2]. M. JOO and T. K. KO, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **6** (1996) 62
- [3]. V. MEEROVICH, V. L. SOKOLOVSKY, M. SLONIM, G. E. SHTER and G. S. GRADER, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3** (1993) 3033
- [4]. P. TIXADOR, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **4** (1994) 190
- [5]. W. PAUL, T. H. BAUMANN, J. RHYNER and F. PLATER, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5** (1995) 1059

PEMBUATAN AMALGAM KANDUNGAN Cu TINGGI UNTUK TAMBAL GIGI DAN PENGARUH KANDUNGAN Hg TERHADAP NILAI KEKERASAN

Yuswono, Saefudin, dan Murni Handayani

Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) - LIPI
Kawasan Puspiptek Serpong 15314, Tangerang

ABSTRAK

PEMBUATAN AMALGAM KANDUNGAN Cu TINGGI UNTUK TAMBAL GIGI DAN PENGARUH KANDUNGAN Hg TERHADAP NILAI KEKERASAN. Penelitian pembuatan amalgam Cu tinggi serta pengaruh kandungan Hg terhadap kekerasannya telah dilakukan. Dalam pembuatan paduan amalgam digunakan satu jenis serbuk logam, yaitu paduan Ag-16,9% Sn-19,5% Cu-0,2% Zn (*single particle alloy*) dengan ukuran serbuk 325 *mesh*. Variasi kandungan Hg pada batas antara 45% sampai dengan 60% berpengaruh terhadap nilai kekerasan paduan amalgam Cu tinggi. Kekerasan maksimum diperoleh pada kandungan 51% Hg sampai dengan 55% Hg. Nilai kekerasan paduan amalgam Cu tinggi ini lebih tinggi dari pada paduan amalgam Cu rendah. Hasil pengamatan struktur mikro ditunjukkan bahwa peningkatan kekerasan disebabkan karena pembentukan fasa η' dan Ag-Cu di dalam matriks γ_1 .

Kata kunci : Paduan amalgam kandungan Cu tinggi, fasa Ag-Cu, fasa γ_1 , fasa γ_2 , fasa γ'

ABSTRACT

MANUFACTURING OF HIGH COPPER CONTENT AMALGAM ALLOY FOR DENTAL RESTORATIONS AND INFLUENCE OF Hg CONTENT TO ITS HARDNESS VALUE. In the alloying treatment with Hg is used single particle Ag alloy metal powder (325 mesh). Its composition is 16.9% Sn-19.5% Cu-0.2% Zn. By various Hg content in the range from 45% to 60% affect to their hardness of amalgam alloys high Cu content. Maximum hardness is obtained in Hg content in the range from 51% to 55%. Its hardness value is higher than amalgam alloys low Cu content. Microstructure observation has shown that increasing of their hardness due to appearing of η' and Ag-Cu phases in the γ_1 matrix.

Key words : Amalgam alloy high Cu content, Ag-Cu phase, γ_1 phase, γ_2 phase, γ' phase

PENDAHULUAN

Hingga saat ini biaya pengobatan untuk pasien sakit gigi dengan menggunakan bahan paduan logam amalgam relatif murah, jika dibandingkan dengan penggunaan bahan tambal gigi jenis lain seperti komposit resin. Oleh karena itu, khususnya untuk masyarakat golongan menengah ke bawah masih menggunakan paduan amalgam untuk tambal gigi. Tetapi bahan paduan amalgam untuk tambal gigi masih diimpor dari luar negeri, sehingga dalam pengadaannya masih tergantung dari luar negeri. Agar supaya dalam pengadaannya tidak selalu ada ketergantungan dengan luar negeri diperlukan penguasaan teknologi pembuatan bahan amalgam untuk tambal gigi.

Logam paduan amalgam untuk keperluan medis ini, dalam proses pembuatannya melibatkan bidang metalurgi fisik. Pembuatannya dimulai dari pembuatan serbuk dari bahan ingot paduan logam perak (Ag-Sn-Cu-Zn). Selanjutnya paduan amalgam yang dibuat sebagai tambal gigi adalah merupakan hasil dari

pengerjaan *setting*, yaitu Hg cair dicampur dengan serbuk logam paduan Ag pada suhu kamar.

Dalam perkembangan pembuatan paduan amalgam akhir-akhir ini, para dokter gigi cenderung menggunakan amalgam dengan kandungan Cu tinggi. Alasan digunakannya bahan ini mempunyai ketahanan korosi terhadap cairan yang dikeluarkan di dalam mulut, seperti air ludah (*saliva*) [1]. Tetapi persentasi jumlah Hg yang dicampurkan dengan serbuk logam paduan Ag, kadang-kadang ada masalah, antara lain seperti pencampuran jumlah persentasi Hg yang tidak tepat mengakibatkan adanya sisa Hg yang berlebih, sehingga muncul Hg cair setelah reaksi amalgamasi berlangsung dan pencampuran jumlah persentasi Hg yang tidak tepat berpengaruh terhadap sifat kekerasan setelah amalgamasi berlangsung, yang mengakibatkan ketahanan aus berkurang.

Dalam penelitian ini digunakan jenis paduan amalgam kandungan Cu tinggi, dengan komposisi

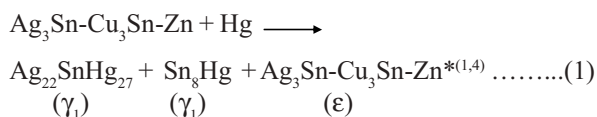
Hg-63,5 %Ag, 16,9 %Sn, 19,5 %Cu, dan 0,2 %Zn. Panambahan Hg divariasikan dari 45 % sampai dengan 60 %. Untuk mengetahui perbedaan fasa yang terbentuk antara amalgam Cu rendah dan Cu tinggi dilakukan pengamatan strukturmikro kedua jenis bahan amalgam tersebut.

TEORI

Paduan Amalgam Cu Rendah dan Reaksi Pembentukan Fasa Intermetalik

Paduan amalgam Cu rendah komposisinya adalah 68 %-75 %Ag, 24 %-26 %Sn, 0,1 %-5,1 %Cu, dan 0,3 %-0,9 %Zn [1,2]. Kandungan sejumlah Ag, Sn, dan Cu tersebut dimanfaatkan untuk meningkatkan kekerasan. Sementara itu penambahan Zn hingga 0,9 % digunakan untuk mengeleminasi kandungan oksigen terlarut di dalam paduan perak cair selama pengerjaan peleburan.

Sejumlah fasa-fasa yang terdapat di dalam paduan amalgam Cu rendah ini antara lain adalah fasa intermetalik γ_1 ($Ag_{22}SnHg_{27}$) sebagai matriks. Fasa lain yang terbentuk di dalamnya adalah fasa intermetalik γ_2 (Sn_8Hg), Ag_3Sn (fasa β diagram fasa biner Ag-Sn), dan Cu_3Sn (diagram fasa biner Cu-Sn)[3]. Proses amalgamasi adalah pembuatan paduan logam Hg pada suhu kamar, dimana melibatkan reaksi kimia yang hasil reaksinya merupakan senyawa intermetalik (senyawa antar logam). Pengerjaan amalgamasi dimulai dari pencampuran serbuk logam paduan Ag dengan Hg cair yang kemudian menjadi padat, persamaan reaksi kimia adalah sebagai berikut:

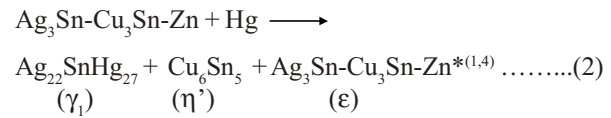


* : sebagian serbuk yang tidak bereaksi

Paduan Amalgam Cu tinggi dan Reaksi Pembentukan Fasa Intermetalik

Paduan amalgam Cu tinggi komposisinya adalah 63,5%-70%Ag, 17%-20%Sn, 9,7%-19,5%Cu, dan 0,2%-0,5%Zn [1,2]. Dengan adanya kandungan Cu yang lebih tinggi dari pada paduan amalgam Cu rendah, paduan amalgam Cu tinggi mengandung fasa-fasa yang terdispersi dan terdistribusi lebih tinggi dari pada paduan amalgam Cu rendah. Fasa yang terdispersi paling banyak adalah paduan Ag-Cu komposisi eutektik. Perbandingan fasa yang terdispersi dengan matriksnya adalah 1 : 3 [1]. Fasa yang terdispersi, bukan hanya fasa Ag-Cu, masih ada fasa paduan Ag-Cu lain dengan komposisi Cu yang bervariasi dan fasa lain.

Pencampuran dengan hanya menggunakan satu jenis serbuk paduan logam Ag, yaitu Ag_3Sn-Cu_3Sn-Zn dicampur dengan Hg cair (*single powder alloying*), persamaan reaksi sebagai berikut:



* : sebagian serbuk yang tidak bereaksi

METODE PERCOBAAN

Bahan

Ada dua jenis logam sebagai bahan percobaan. Sebagai bahan pertama adalah serbuk logam paduan Ag, dan bahan ke dua adalah logam Hg murni (99,99%). Bahan untuk pembuatan serbuk logam paduan Ag mengandung empat jenis logam, yaitu perak murni (99,99%), Sn murni (99,99%), tembaga murni (99,9%), dan Zn murni (99,99%).

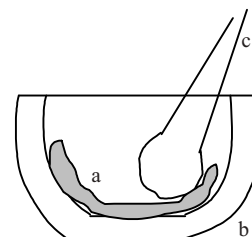
Pembuatan Serbuk Logam Paduan Ag

Dalam pembuatan paduan amalgam untuk tambal gigi diawali dari pembuatan serbuk logam paduan Ag lebih dahulu. Jenis serbuk logam dengan kandungan Cu tinggi, komposisi target adalah 63,5 % Ag- 16,9 %Sn- 19,5 %Cu-0,2 %Zn (*cupralloy*). Setelah itu dilakukan pembuatan serbuk logam paduan Ag dengan kandungan Cu rendah sebagai pembanding, komposisinya adalah 68 %Ag, 26 %Sn, 5,1 %Cu, dan 0,9 %Zn (*lustralloy*).

Pembuatan serbuk dimulai dari pembuatan *ingot* paduan Ag melalui pengerjaan peleburan. Pengerjaan pembuatan serbuk dilakukan melalui pengerjaan bubuk dan *grinding* terhadap *ingot* hasil coran setelah homogenisasi. Serbuk paduan Ag setelah *grinding* diayak hingga mempunyai tingkat kehalusan 325 *mesh*[5].

Amalgamasi dan Pembuatan Spesimen

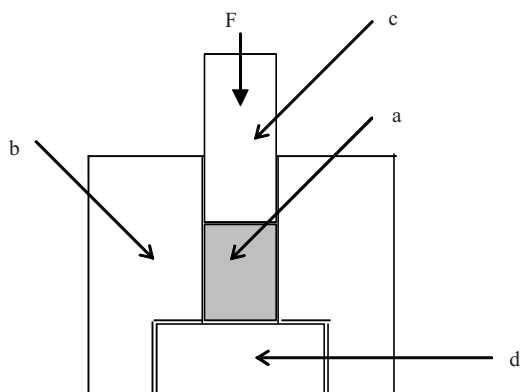
Pembuatan paduan amalgam dilakukan cara manual dengan menggunakan peralatan mortar keramik dan alu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Mortar keramik dan alu, untuk pembuatan paduan amalgam. Keterangan gambar : a. Pasta paduan amalgam, b. Mortar keramik, c. Alu.

Serbuk logam paduan Ag dimasukkan ke dalam mortar, kemudian ditambahkan Hg kedalam mortar. Serbuk paduan Ag dan Hg cair diaduk dengan menggunakan alu selama 10 menit. Hasil campuran serbuk logam dengan Hg adalah dalam bentuk pasta. Dalam percobaan ini yang divariasikan adalah penambahan Hg cair dengan komposisi 45 % berat, 48 % berat, 51 % berat, 54 %, dan 60 % berat.

Paduan amalgam dalam bentuk pasta dikeluarkan dari wadah mortar, kemudian dimasukkan ke dalam cetakan *dies*. Amalgam di dalam *dies* ditekan dengan *punch*, seperti yang ditunjukkan secara skematis pada Gambar 2. Besarnya beban F dibuat sama untuk semua spesimen yang memberikan tekanan 1,3 kg/cm². Nilai tekanan tersebut relatif kecil, karena dalam prakteknya, penekanan amalgam yang berada dilubang gigi menggunakan tekanan tangan. Setelah itu pasta amalgam di dalam *dies* dibiarkan selama 15 menit, kemudian spesimen paduan amalgam bentuk pasta dikeluarkan dari dalam *dies*, dimana paduan amalgam masih dalam keadaan lunak dibiarkan di ruang terbuka. Paduan amalgam menjadi keras dalam waktu sekitar 8 jam.



Gambar 2. Skematis potongan penampang lintang dies untuk pembuatan spesimen. Keterangan gambar : a. Paduan amalgam diameter 19 mm tinggi sekitar 1,5 cm, b. dies, c. punch, d. penyangga muatan.

Pengujian

Spesimen paduan amalgam yang sudah menjadi keras diuji sebagai berikut :

Uji Metalografi

Uji metalografi menggunakan mikroskop optik refleksi. Tujuan pengujian metalografi adalah untuk mengamati struktur mikro dan jenis fasa intermetalik yang terbentuk di dalam paduan amalgam Cu tinggi dan Cu rendah.

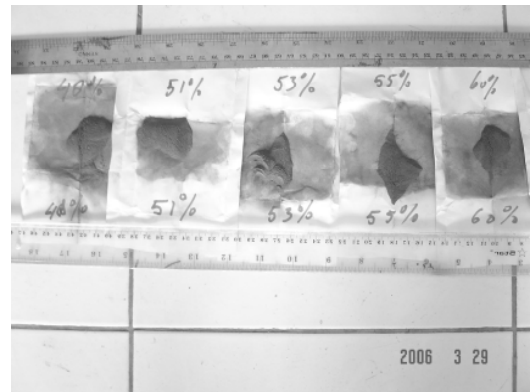
Uji Kekerasan

Tujuan pengukuran kekerasan (kekerasan mikro) adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan kekerasan terhadap variasi kandungan Hg.

HASIL PERCOBAAN

Pembuatan Serbuk logam paduan Ag

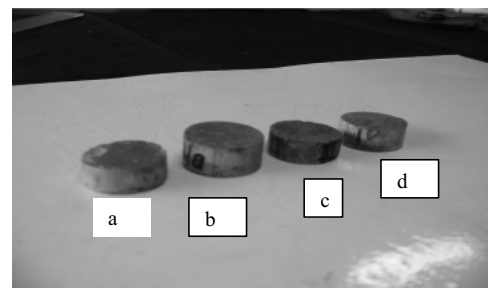
Hasil pembuatan serbuk dari *ingot* paduan Ag melalui pengerjaan bubut, *grinding*, dan ayak dengan ukuran ayak 325 *mesh* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Serbuk logam paduan 63,5 % Ag-16,9 % Sn-19,5 % Cu-0,2 % Zn. Serbuk warna hitam.

Hasil Pengerjaan Amalgamasi

Hasil pembuatan spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.



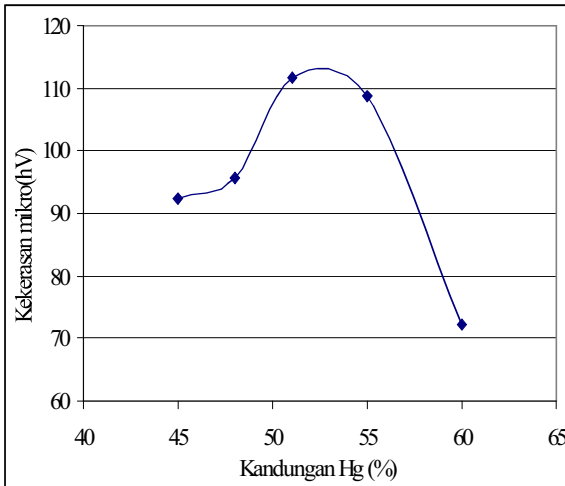
Gambar 4. Spesimen paduan amalgam Cu tinggi (dengan kandungan Hg yang berbeda), bentuk silindris, diameter 19 mm. a. Kandungan 45 % Hg, b. Kandungan 48 % Hg, c. Kandungan 51 % Hg, d. Kandungan 54 % Hg.

Hasil Pengukuran Kekerasan Mikro

Hasil pengujian kekerasan mikro dan pengaruhnya terhadap variasi kandungan Hg yang ditambakan ditunjukkan pada Gambar 5. Dari hasil pengukuran kekerasan ditunjukkan kekerasan maksimum berada pada posisi kandungan Hg pada batas antara 51 % sampai dengan 54 %.

Hasil Pengamatan Strukturmikro

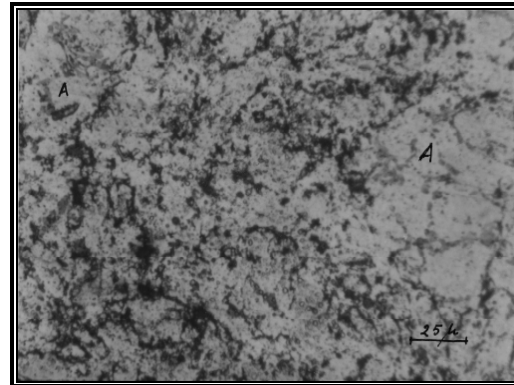
Tiap spesimen diuji dengan menggunakan jenis *etsa* yang sama, yaitu 20% larutan HNO₃. Penentuan jenis fasa yang terdispersi didalam matriks γ_1 mengacu pada ASM Hand Book Vol 13, mikro struktur paduan amalgam



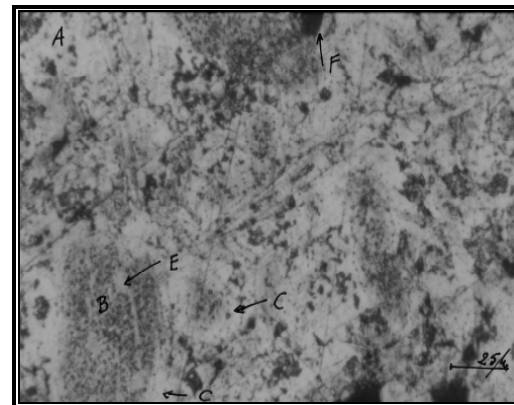
Gambar 5. Pengaruh kandungan Hg terhadap kekerasan mikro pada paduan amalgam kandungan Cu tinggi (komposisi serbuk logam 63,5 % Ag-16,9 % Sn-19,5 % Cu-0,2 % Zn). Beban 50 kgf.

Cu rendah dan tinggi dan *mapping* unsur Ag, Hg, Sn, Cu dari pengamatan EDS – X Ray Diffraction, sebagai berikut :

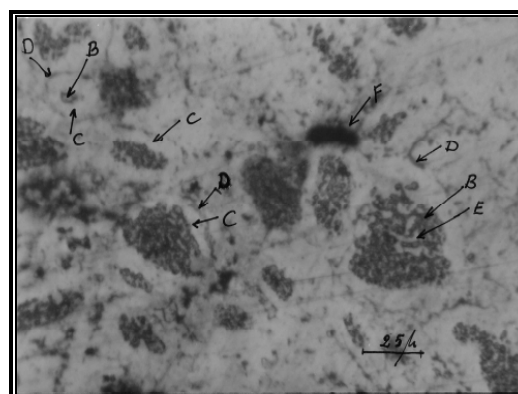
- Struktur mikro Paduan Cu Tinggi Kandungan 45 %Hg (Gambar 6a). Komposisi serbuk adalah 63,5 % Ag-16,9 % Sn-19,5 % Cu-0,2 % Zn. Sebagai matriks adalah γ_1 , di dalamnya muncul partikel-partikel yang tersebar merata.
- Struktur mikro Paduan Cu Tinggi Kandungan 48 %Hg (Gambar 6b). Komposisi serbuk adalah sama dengan di atas. Peningkatan kandungan Hg sebanyak 48 %, muncul fasa Ag-Cu (sistem diagram biner Ag-Cu) [3,6], yang dikelilingi oleh fasa intermetalik η' (Cu_6Sn_3) [1,4] di dalam matriks γ_1 .
- Struktur mikro Paduan Cu Tinggi Kandungan 51 %Hg (Gambar 6c). Peningkatan kandungan Hg lebih tinggi lagi dengan komposisi serbuk sama, pembentukan fasa Ag-Cu terdistribusi lebih tinggi jika dibandingkan dengan kandungan Hg di bawahnya (48 %). Tipe struktur mikro yang terbentuk sama dengan struktur mikro kandungan 48 %Hg, dan fasa-fasa yang terbentuk di dalam γ_1 tampak jelas. Pembentukan fasa η' terletak di sekeliling fasa Ag-Cu. Fasa η' di posisi lain juga terbentuk dan tampak jelas. Fasa η' , bagian luarnya juga dikelilingi fasa-fasa lain, kemungkinan fasa ini adalah adalah Ag_3Sn (sistem diagram biner Ag-Sn), ϵ (Cu_3Sn) [3], dan γ (sistem diagram fasa Ag-Sn).
- Struktur mikro Paduan Cu Tinggi Kandungan 54 %Hg (Gambar 6d). Peningkatan kandungan Hg lebih tinggi lagi dengan komposisi serbuk sama, tipe struktur mikro yang terbentuk hampir sama dengan kandungan 51 % Hg. Fasa Ag-Cu merupakan partikel-partikel yang terdistribusi merata di dalam matriks γ_1 . Fasa ini dikelilingi oleh fasa η' . Kekerasannya sedikit menurun, yaitu 108,67 HV.



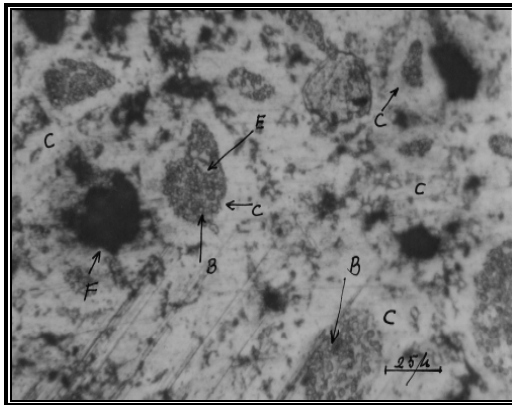
Gambar 6a. Struktur mikro paduan amalgam Cu tinggi, komposisi serbuk logam 63,5%Ag-16,9%Sn-19,5%Cu-0,2%Zn, kandungan 45%Hg. Keterangan gambar : A : γ (Ag₂₂SnHg₂₇) matriks, bercak-bercak warna hitam sisa butir serbuk belum bereaksi dengan Hg. Nilai kekerasan : 92,35 HV.



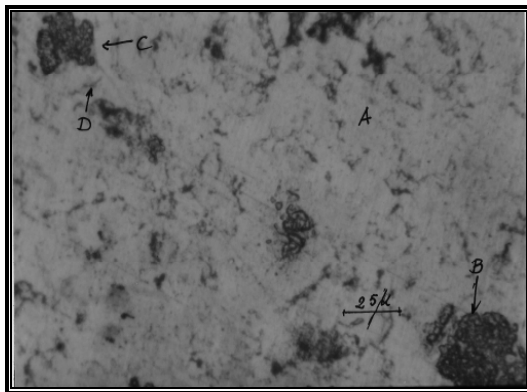
Gambar 6b. Struktur mikro paduan amalgam Cu tinggi, komposisi serbuk logam 63,5%Ag-16,9%Sn-19,5%Cu-0,2%Zn, kandungan 48%Hg. Keterangan gambar : A : γ_1 matriks, B : fasa Ag-Cu, C : fasa η' , D : sisa butir serbuk yang tidak bereaksi, E : porositas. Nilai kekerasan : 95,67 HV



Gambar 6c. Struktur mikro paduan amalgam Cu tinggi, komposisi serbuk logam 63,5%Ag-16,9%Sn-19,5%Cu-0,2%Zn, kandungan 51%Hg. Keterangan gambar : A : γ_1 matriks, B : fasa Ag-Cu, C : fasa η' , D : fasa Ag-Sn, E : sisa butir serbuk yang tidak bereaksi F : porositas. Nilai Kekerasan : 111,55 HV.

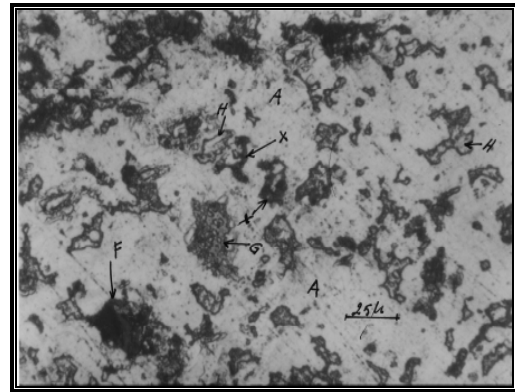


Gambar 6d. Struktur mikro paduan amalgam Cu tinggi, komposisi serbuk logam 63,5%Ag-16,9%Sn-19,5%Cu-0,2%Zn, kandungan 55%Hg. Keterangan gambar : A : γ_1 matriks, B : fasa Ag-Cu, C : fasa η' , D : fasa Ag-Sn / ϵ , E : sisa butir serbuk yang tidak bereaksi, F : porositas. Nilai Kekerasan : 108,67 HV.



Gambar 6e. Struktur mikro paduan amalgam Cu tinggi (Gambar 1 pembesaran 300 kali dan Gambar 2 pembesaran 600 kali) (komposisi serbuk logam 63,5%Ag-16,9% Sn-19,5 % Cu-0,2 % Zn), kandungan 60 %Hg. Keterangan gambar : A.= γ_1 matriks, B = fasa Ag-Cu, C = fasa fasa η' , D = fasa Ag-Sn / persipitasi ϵ . Nilai kekerasan : 72,2 HV

- e. Struktur mikro Paduan Cu Tinggi Kandungan 60 %Hg (Gambar 6e). Tipe struktur mikro yang terbentuk dengan kandungan lebih tinggi lagi Hg hingga 60 %, tipe struktur mikro yang terbentuk menjadi berbeda dengan kandungan Hg di bawahnya (51 % dan 55 %), yaitu fasa Ag-Cu terdistribusi lebih sedikit di dalam matrik γ_1 . Jadi dengan ditingkatkannya kandungan Hg hingga 60 % ini berpengaruh terhadap berkurangnya pembentukan fasa Ag-Cu. Struktur mikro paduan amalgam pada kandungan Cu tinggi (19,5 %Cu) ini tidak ditunjukkan munculnya fasa γ_2 .
- f. Struktur mikro Paduan Cu rendah (Gambar 7). Kandungan 51 %Hg dengan komposisi serbuk logam 68%Ag-26%Sn-5,1%Cu-0,9%Zn. Tipe struktur mikro yang terbentuk pada paduan amalgam Cu rendah dan Cu tinggi (Gambar 6c) dengan kandungan Hg yang sama (51%) tampak jelas perbedaannya. Fasa-fasa



Gambar 7. Struktur mikro paduan amalgam Cu rendah komposisi serbuk logam 68% Ag-26% Sn-5,1% Cu-0,9 % Zn, kandungan 60 % Hg. Keterangan gambar : A : γ_1 ($Ag_{22}SnHg_{27}$) matriks, X : fasa γ_2 (Sn₈Hg), H = γ (sistem diagram biner Ag-Sn), G = ϵ /serbuk yang tidak bereaksi, F = Porositas. Nilai kekerasan : 90,37 HV

yang terbentuk tidak beraturan, dan merupakan partikel yang tersebar merata di dalam matriks γ_1 . Fasa-fasa ini antara lain terdiri dari fasa γ (sistem diagram biner Ag-Sn) dan γ_2 . Dengan munculnya fasa γ_2 ini sesungguhnya tidak dikehendaki, karena dapat mengurangi sifat ketahanan korosi di lingkungan saliva (air ludah di dalam mulut) [1].

PEMBAHASAN

Pengaruh Kandungan Hg terhadap Kekerasan

Pada Gambar 5 ditunjukkan bahwa kandungan Hg berpengaruh terhadap nilai kekerasan paduan amalgam Cu tinggi. Kurva hasil pengukuran kekerasan terhadap kandungan Hg, kekerasan maksimum diperoleh pada batas antara kandungan Hg 51 % sampai dengan 54 %. Dengan kandungan Hg yang hampir sama, kekerasan paduan amalgam Cu tinggi lebih tinggi dari pada paduan amalgam Cu rendah. Perolehan peningkatan nilai kekerasan akibat kandungan Hg ini dapat dihubungkan dengan fasa-fasa yang terbentuk di dalam struktur mikronya.

Analisa Struktur mikro

Struktur mikro paduan Cu tinggi dengan kandungan 45 %Hg (Gambar 6a), komposisi serbuk 63,5%Ag-16,9%Sn-19,5%Cu-0,2%Zn. Karena γ_1 sudah terbentuk, maka reaksi amalgamasi (persamaan 2) sudah mulai berlangsung, tetapi belum sempurna. Oleh karena itu, partikel-partikel yang terbentuk kemungkinan adalah sisa butiran serbuk paduan Ag yang belum bereaksi sempurna dengan Hg, karena jumlah kandungan Hg yang ditambahkan relatif sedikit. Kekerasannya adalah 92,35 HV.

Struktur mikro paduan Cu tinggi dengan peningkatan kandungan Hg (48 %) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6b, reaksi amalgamasi mulai tampak. Hal ini ditunjukkan munculnya fasa Ag-Cu (sistem diagram biner Ag-Cu), yang dikelilingi oleh fasa η' (Cu_6Sn_5) di dalam matriks γ_1 , reaksi amalgamasi persamaan (2) mulai berlangsung. Terbentuknya fasa Ag-Cu dan η' di dalam γ_1 , kekerasannya meningkat 95,67 HV. Peningkatan kandungan Hg lebih tinggi lagi yaitu 51% dan 54%, fasa Ag-Cu dan η' tetap terbentuk dan terdistribusi lebih tinggi jika dibandingkan dengan kandungan Hg di bawahnya (48 %). Hal ini berarti pada sejumlah kedua penambahan Hg tersebut, reaksi amalgamasi (2) sudah berlangsung sempurna, kekerasan meningkat menjadi 111,55 HV dan 108,67 HV. Jadi dengan munculnya fasa Ag-Cu dan η' berpengaruh terhadap peningkatan kekerasan paduan amalgam Cu tinggi.

Struktur mikro paduan amalgam Cu tinggi dengan kandungan Hg lebih tinggi lagi 60 % (Gambar 6e), fasa Ag-Cu terdistribusi lebih sedikit di dalam matriks γ_1 . Jadi dengan ditingkatkannya kandungan Hg, reaksi pembentukan Ag-Cu menjadi terhalang. Akibatnya kekerasannya menjadi turun, yaitu 77,2 HV.

Struktur mikro paduan amalgam Cu rendah kandungan 51 %Hg, dengan komposisi serbuk logam 68%Ag-26%Sn-5,1%Cu-0,9%Zn (Gambar 7), reaksi amalgamasi (1) memang berlangsung. Hal ini ditunjukkan dari fasa-fasa yang terbentuk di dalam matriks γ_1 , yaitu fasa γ (sistem diagram biner Ag-Sn), γ_2 , dan fasa ϵ . Tetapi fasa Ag-Cu dan η' tidak terbentuk. Akibatnya kekerasannya rendah 90,37 HV. Fakta ini menunjukkan bahwa perolehan nilai kekerasan yang tinggi pada paduan amalgam Cu tinggi disebabkan karena munculnya fasa Ag-Cu dan η' di dalam matriks γ_1 .

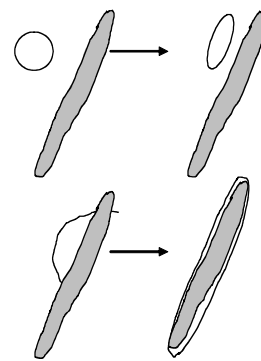
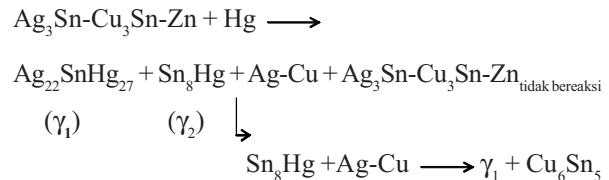
Mekanisme Proses Reaksi Amalgamasi pada Paduan Amalgam Cu Tinggi

Dari analisis struktur mikro paduan amalgam Cu tinggi di atas memberikan petunjuk mekanisme reaksi amalgamasi (persamaan 2) telah berlangsung. Selanjutnya mekanisme reaksi amalgamasi juga dapat diterangkan berdasarkan pengamatan struktur mikro.

Pencampuran serbuk logam paduan Ag dengan Hg cair hingga dalam bentuk pasta merupakan proses kontak antara tiap butir serbuk logam dengan Hg cair, sehingga permukaan butir serbuk logam dibasahi oleh Hg cair. Untuk lebih jelasnya lihat skematis Gambar 8

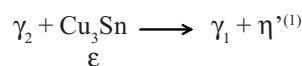
Selanjutnya paduan amalgam dari bentuk pasta menjadi padat adalah akibat keberlangsungan reaksi amalgamasi. Atom-atom butiran serbuk paduan Ag berdifusi menuju ke dalam Hg cair. Atom-atom paduan Ag yang terdiri dari unsur-unsur Ag, Sn, Cu, dan Zn bereaksi dengan Hg cair membentuk fasa intermetalik, seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2. Tetapi reaksi tersebut di atas tidak sekali gus berlangsung,

melainkan melalui tahapan. Pada tahap awal, reaksi berlangsung seperti halnya reaksi amalgamasi Cu rendah (persamaan 1), yang disertai pembentukan fasa γ_1 dan γ_2 . Kemudian γ_2 bereaksi dengan Ag-Cu menghasilkan fasa η' dan γ_1 [1]. Akibatnya di dalam paduan amalgam Cu tinggi ini, fasa γ_2 tidak terbentuk. Mekanisme reaksi amalgamasi Cu tinggi dapat dilihat pada skematis Gambar 9, dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



Gambar 8. Skematis mekanisme pembentukan pasta paduan amalgam. Keterangan gambar : a. Hg cair sebelum kontak dengan butir serbuk, b. Hg cair kontak dengan butir serbuk, c. Hg cair membasahi butir serbuk, d. Hg cair menyelubungi butir serbuk yang diperoleh dalam bentuk pasta.

Disamping itu ada kemungkinan fasa γ_2 juga bereaksi dengan fasa ϵ membentuk fasa γ_1 dan η' , menurut reaksi sebagai berikut :



Butir serbuk paduan logam Ag yang dibasahi oleh Hg cair berdifusi dan bereaksi dengan Hg cair membentuk fasa intermetalik (Gambar 9a). Pada awalnya senyawa intermetalik yang terbentuk adalah fasa γ_1 dan γ_2 , (Gambar 9b). setelah itu fasa γ_2 bereaksi dengan Ag-Cu membentuk fasa γ_1 (berlebih) dan η' (Cu_6Sn_5 , sistem diagram biner Cu-Sn) di sekeliling fasa Ag-Cu (Gambar 9c). Di sekitar fasa η' juga terjadi presipitasi fasa lain, antara lain adalah fasa γ (Ag_3Sn , sistem diagram biner Ag-Sn), fasa ϵ (Cu_3Sn) pada sistem diagram fasa biner Cu-Sn.

KESIMPULAN

Dari hasil percobaan ini pengaruh kandungan Hg di dalam paduan amalgam Cu tinggi dapat disimpulkan sebagai berikut :