Berkala Fisika ***ISSN : 1410 - 9662***
Vol 10 , No.3, Juli 2007 hal. 127-135

PEMBUATAN HOLOGRAM REFLEKSI

Arifah, M. Azam, K. Sofjan Firdausi
Jurusan Fisika Universitas diponegoro

ABSTRACT

A Reflection hologram of a white ceramic object has been made on 5000 lines/mm PFG-03M holographic plate. A He-Ne Laser is used to record the holograms. And to reconstruct, it is used white, blue, and yellow light. The holographic plate for making of reflection hologram is PFG-03M. The optimal exposure time lies between 8 and 10 seconds. By reconstruction image white LED, it shows that the image is formed clearer than using blue and yellow light.

Keywords: holography, reflection hologram, reconstruction, exposure time.

INTISARI

Telah berhasil dibuat hologram refleksi menggunakan objek berupa keramik berwarna putih berbentuk kucing pada media perekam jenis PFG-03M beresolusi 5000 garis/mm. Dalam pembuatan hologram refleksi, digunakan sumber cahaya laser He-Ne (λ = 632,8 nm). Untuk rekonstruksi selain cahaya merah, digunakan sumber cahaya berwarna putih, biru, dan kuning. Dari hasil pembuatan hologram refleksi menggunakan media perekam PFG-03M diketahui waktu eksposur terbaik yaitu 8-10 detik. Untuk rekonstruksi, penggunaan LED berwarna putih menghasilkan gambar yang lebih jelas dibanding penggunaan warna biru dan kuning.

Kata Kunci: holografi, hologram refleksi, rekonstruksi, waktu eksposur.

PENDAHULUAN

Prinsip holografi pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Dennis Gabor pada tahun 1946. Holografi adalah suatu teknik perekaman citra (secara optik) yang menghasilkan bayangan tiga dimensi didasarkan pada peristiwa interferensi yang direkam pada medium dua dimensi, pada medium inilah yang disebut hologram. Istilah hologram berasal dari bahasa yunani kuno "holos" yang artinya utuh dan "gram" yang artinya informasi. Hologram sering disebut gambar tiga dimensi yang berisi informasi tentang ukuran, bentuk, kecerahan dan kekontrasan dari objek yang direkam. Informasi ini disimpan dalam ukuran mikroskopik dan pola yang kompleks dari interferensi. Dalam informasi ini tersimpan informasi tentang amplitudo dan fase gelombang cahaya yang berasal dari objek yang direkam, hal inilah yang menyebabkan dapat terbentuk bayangan tiga dimensi.

Holografi mempunyai kelebihan dibanding fotografi konvensional. Pada fotografi, jika gambar foto dipandang dari berbagai arah maka tidak didapatkan sudut-sudut pendekatan baru dan tidak dapat dilihat apa yang terjadi pada sisi benda yang lain. Hal ini disebabkan dalam fotografi hanya distribusi kuadrat amplitudo saja yang direkam dalam proyeksi dua dimensional dari benda pada bidang fotografi. Sedangkan pada holografi, amplitudo dan fase gelombang keduanya direkam pada media perekam sehingga terbentuk hasil perekaman yang tetap memiliki informasi keseluruhan dari objek tersebut walaupun kecilnya hologram tersebut. Holografi semakin berkembang, yang semula rekonstruksinya hanya bisa menggunakan cahaya monokromatik maka Lippman dan Denisyuk menyempurnakannya sehingga proses rekonstruksi bisa menggunakan cahaya putih atau polikromatik. Karena bisa dilihat dengan cahaya putih, maka hologram jenis ini disebut hologram cahaya putih. Selain itu hologram ini dinamakan hologram refleksi, karena bayangan yang dihasilkan hologram dapat dilihat dengan cara merefleksikan berkas rekonstruksi. Dalam kehidupan sehari-hari banyak dijumpai hologram pada barang-barang seperti *credit card*, logo merk dan materai. Di Indonesia, sejak 1995 hingga sekarang, satu-satunya pembuat hologram untuk cukai rokok hanya PT Pura Nusapersada di Kudus, Jawa Tengah. Penerapan hologram pada pita cukai rokok dimaksudkan untuk menekan pemalsuan

pita cukai rokok, karena hologram yang diaplikasikan mempunyai fitur tertentu yang spesifik sehingga sangat sulit untuk dipalsu. Sebelumnya menerapkan *security scratch hologram* pada kartu prabayar Mentari. Selain itu, PT Bintang Toedjoe mengaplikasikan *demetallized hologram stripe* dan *micro laser perforation* pada *wrapper* (pembungkus) produk minuman suplemen merk Extra Joss. Tetapi meskipun hologram merupakan produk populer di masyarakat, proses pembuatannya masih sangat asing bagi akademisi seperti mahasiswa, sehingga holografi mempunyai kajian yang menarik untuk diteliti agar dapat menambah wawasan.

Sebelumnya di lingkungan UNDIP, hologram pernah dibuat oleh Rudyansyah [1] berupa hologram transmisi dengan menggunakan Laser Helium-Neon dan media perekam jenis Agfa Geveart 8E-75. Selain itu, telah pula dilakukan studi pembuatan hologram refleksi menggunakan sumber cahaya yang sama dengan media perekam jenis Kodak 649F dan Agfa 10E75 [2]. Sebagai studi lanjut dari penelitian sebelumnya, maka pada kali ini dibuat hologram refleksi dengan objek dari bahan non-transparan (keramik).

Interferensi Dua Gelombang

Interferensi gelombang merupakan superposisi dari dua gelombang koheren. Bila dua buah gelombang itu [3]:

$$U_1 = A_1 e^{i\varphi_1} \text{ dan } U_2 = A_2 e^{i\varphi_2} \quad (1)$$

dengan A_1 dan A_2 masing-masing menyatakan amplitudo gelombang 1 dan 2, sedangkan φ_1 dan φ_2 masing-masing menyatakan sudut fase gelombang 1 dan 2. Jika dijumlahkan diperoleh hasil :

$$U = U_1 + U_2 \quad (2)$$

Intensitas hasil superposisinya adalah sebanding dengan kuadrat resultan medan listrik yaitu :

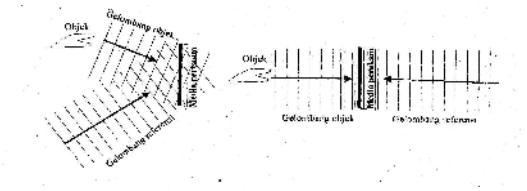
$$I \sim |U|^2 = U.U^*$$

$$|U|^2 = A_1{}^2 + A_2{}^2 + A_1 A_2 2\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

Dari persamaan (3) derajat tingkat pola interferensi, dicerminkan dalam faktor $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Perekaman Hologram

Skema perekaman yang terjadi pada media perekam secara sederhana dapat ditunjukkan pada gambar 1 berikut :



(a) (b)

Gambar 1. Perekaman hologram (a) transmisi dan (b) refleksi [1].

Pada pembuatan hologram transmisi, gambar 1(a) gelombang objek dan gelombang referensi berasal dari arah yang sama, sedangkan pada pembuatan hologram refleksi, gambar 1(b) gelombang objek dan gelombang referensi berasal dari arah yang berlawanan.

Holografi merupakan suatu teknik perekaman dan rekonstruksi gelombang cahaya. Gelombang cahaya yang direkam adalah gelombang objek dan gelombang referensi pada media perekam. Pada rekonstruksi dihasilkan tiruan gelombang objek dengan amplitudo berbeda tetapi mempunyai fase dan arah yang sama dengan gelombang objek. Kesan tiga dimensi yang dihasilkan diperoleh karena amplitudo dan fase gelombang cahaya sekaligus dapat direkam dalam pemotretan. Kedua parameter tersebut terkandung dalam satu fungsi gelombang. Fungsi gelombang tersebut yaitu [4]:

$$U(y,z) = Ae^{i\varphi(y,z)} \quad (4)$$

dengan $U(y,z)$ menyatakan fungsi gelombang, dan $\varphi(y,z)$ fase gelombang.

Dalam pembuatan hologram refleksi ini digunakan sistem perekaman holografi Fresnel, yaitu perekaman dengan jarak antar objek terhadap media perekam dibuat relatif dekat sehingga media perekam dapat menerima berkas hamburan objek tanpa harus menggunakan lensa atau alat bantu lainnya.

Misalkan, interferensi antara gelombang objek U_o dan gelombang referensi U_r, secara matematik pada perekaman holografi dituliskan sebagai:

$$U_o = e^{i\phi} \quad (5)$$

$$U_r = e^{i\alpha} \quad (6)$$

dengan ϕ adalah fase gelombang objek sebagai fungsi *y, z* dan α adalah fase gelombang referensi. Diasumsikan bahwa amplitudo masing-masing gelombang bernilai satu untuk memudahkan perhitungan.

Interferensi di media perekam merupakan perpaduan antara U_o dan U_r, yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$I(y,z) = \left|U_o + U_r\right|^2 = 2 + e^{i(\phi-\alpha)} + e^{i(\alpha-\phi)} \quad (7)$$

dengan $I(y,z)$ menyatakan intensitas cahaya (iradiasi) yang mengenai media perekam. Interferensi ini terjadi mengenai media perekam pada selang waktu tertentu disebut waktu eksposur, t_e dan didefinisikan besaran eksposur:

$$B(y,z) = t_e I(y,z) = S \quad (8)$$

dengan S menyatakan sensitivitas suatu media perekam [1].

Pencucian Hologram

Setelah perekaman maka pada media perekam telah terbentuk bayangan yang kemudian dilanjutkan dengan pencucian media perekam sehingga diperoleh hologram. Dalam pencucian hologram ada dua tahapan yang harus dilakukan, yaitu tahap pengembangan (*developing*) dan tahap penetapan (*fixing*)

1. Pengembangan (*developing*)

Setelah media perekam yang telah merekam pola frinji-frinji dari objek maka dilakukan tahap pengembangan. Di dalam tahap ini perak halida pada emulsi media perekam yang telah dikenai berkas laser akan membentuk butiran-butiran perak yang sangat halus dengan susunan tertentu yang berfungsi sebagai kisi difraksi pada saat rekontruksi. Saat berkas laser (foton) mengenai media perekam, secara proses:

$$foton + Br^- \rightarrow Br + e^-$$

$$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$$

Sedangkan pada media perekam yang tidak terkena berkas laser pengembang tidak banyak berpengaruh, karena tidak ada energi yang diberikan pada lapisan emulsi sehingga akan terjadi pembentukan butir-butir perak dan terlarut dalam larutan.

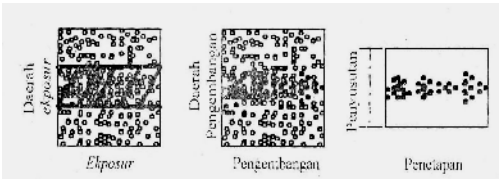
Pengembangan kimia berdasarkan pada reduksi butiran-butiran perak halida oleh larutan *developer*. Reaksi ini terjadi jika kesetimbangan potensial redoks dari sistem *developer* lebih negatif dari sistem Ag^+ / Ag [5].

Bayangan laten terdiri dari bintik-bintik diam (*Specks residing*) dalam kristal/butir perak halida. Bintik-bintik mempunyai efek katalis dalam proses reduksi kimia. Setiap bintik bereaksi seperti mikroelektroda yang membawa molekul-molekul developer ke kontak elektrik dengan ion-ion perak. Jumlah besar dari atom-atom perak dibentuk dalam kristal perak halida dengan bintik-bintik bayangan laten.

2. Penetapan (*fixing*)

Setelah pengembangan selesai sesuai dengan waktunya maka dilakukan penetapan agar emulsi perak tidak reaktif lagi terhadap cahaya. Secara prinsip formula penetapan:

$$AgBr + 3Na_2S_2O_3 \rightarrow Ag(S_2O_3)_3 + 6Na^+ + Br^-$$



Gambar 2. Pembentukan bayangan pada media perekam [5].

Pada tahap ini volume dari emulsi media perekam akan berkurang akibat terkikis ataupun larut dalam larutan pencucian seperti terlihat pada gambar 2 [5].

Rekonstruksi Hologram

Hologram yang telah selesai melalui tahap pencucian, kemudian dapat direkontruksi. Untuk hologram transmisi, rekonstruksi dilakukan dengan gelombang yang identik seperti pada saat perekaman. Sedangkan untuk hologram refleksi, rekontruksi dapat dilakukan dengan cahaya putih atau polikromatik. Secara matematis gelombang rekonstruksi dapat dituliskan identik dengan referensi sebagai berikut:

$$U_{r'} = e^{i\alpha} \quad (9)$$

Dari rekonstruksi tersebut akan menghasilkan amplitudo komplek:

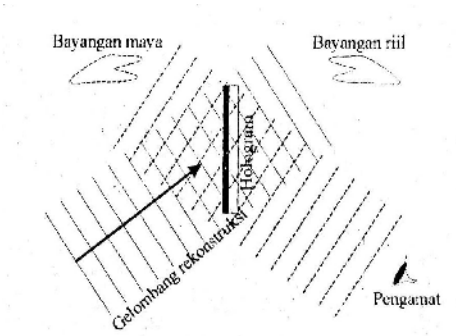
$$A_k = U_{r'} T_a$$

$$= 2Ke^{i\alpha} + Ke^{i\phi} + Ke^{i(2\alpha-\phi)} \quad (10)$$

dengan A_k menyatakan amplitudo komplek, $U_{r'}$ menyatakan gelombang rekonstruksi, *K* menyatakan Konstanta yang tergantung pada

kondisi pencucian dan T_a menyatakan amplitudo transmisi.

Dari persamaan (10), pada ruas kanan suku pertama adalah sebagian gelombang rekonstruksi yang diteruskan, suku kedua adalah sebagian gelombang objek yang menghasilkan bayangan imajiner dan suku terakhir adalah sebagian gelombang objek dengan fase terbalik dikalikan faktor $e^{i(2\alpha)}$ dan menghasilkan bayangan riil. Skema proses rekonstruksi dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. rekonstruksi hologram transmisi [1].

METODE PENELITIAN

Alat dan Set-Up Peralatan

Sumber cahaya yang digunakan adalah laser He-Ne dengan daya laser 15 mW dengan panjang gelombang 632,8 nm. Laser yang digunakan untuk membuat hologram telah di operasikan pada mode $TEM_{(00)}$ artinya bahwa kekoherensian laser ini harus sudah terjamin.

Objek yang digunakan harus dapat menghamburkan berkas laser, sehingga berkasnya dapat terekam oleh media perekam. Objek yang digunakan dalam penelitian ini dari bahan non-transparan yaitu keramik putih berbentuk kucing.

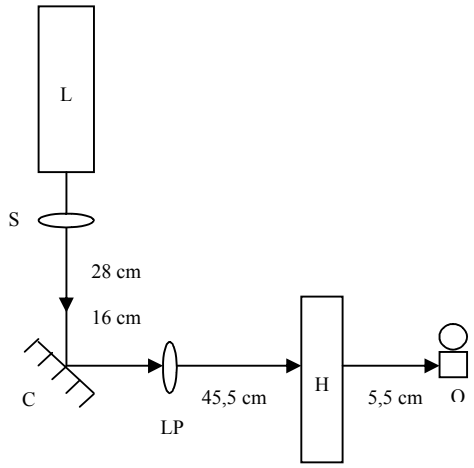
Pemegang Optik atau *Holder* berfungsi untuk meletakkan alat-alat optik dan juga media perekam, terbuat dari besi yang mempunyai *magnetic base* sehingga dapat menempel kuat pada meja optik, agar menahan adanya getaran maupun goncangan.

Meja optik digunakan untuk meletakkan semua komponen optik saat perekaman. Meja ini untuk mengurangi noise berupa gerakan yang tidak perlu.

Sebuah cermin digunakan untuk memantulkan cahaya laser ke arah yang diinginkan, serta sebuah lensa penyebar berkas digunakan untuk memperbesar *spot* dari cahaya laser ke film.

Larutan yang digunakan untuk mencuci media perekam terdiri dari cairan pengembangan (*developing*), penetapan (*fixing*), dan air. Untuk cairan pengembangan (*developing*) menggunakan Kodak D-76, sedangkan untuk cairan penetapan (*fixing*) menggunakan *Acifix*. Untuk air digunakan air bersih secukupnya.

Pada penelitian ini dibuat hologram refleksi dengan skema seperti yang diberikan pada gambar 4



Gambar 4. Skema peralatan hologram refleksi. Keterangan gambar: L adalah laser He-Ne, S adalah *shutter*, C adalah cermin, LP adalah lensa penyebar berkas, H adalah media perekam, dan O adalah objek.

Prosedur Penelitian

Proses perekaman dilakukan dengan terlebih dahulu membersihkan semua peralatan optik dari debu, sehingga hologram yang dihasilkan tidak kotor. Pembersihan peralatan optik menggunakan *tissue* lensa khusus untuk membersihkan lensa.

Setelah itu dilakukan penyusun peralatan untuk perekaman hologram pada meja optik seperti pada gambar 4. Media perekam jenis PFG-03M disiapkan dalam wadah. Proses penempatan media perekam dalam wadah pada kondisi gelap.

Untuk proses pencucian, dipersiapkan bahan untuk pencucian dengan jarak yang mudah diraih dalam kondisi gelap. Bahan-bahan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan (*developing*)

Untuk pengembangan digunakan bahan pengembang yaitu Kodak D-76 (*Black and white developer*) yang sering digunakan untuk

pencucian film hitam putih. Bahan pengembangan tersebut dimasukkan ke dalam ember yang berisi air dingin sebanyak 2 liter dan air panas sebanyak 1 liter, diaduk terus menerus ± 15 menit sampai Kodak D-76 larut dalam air. Temperatur larutan diukur menggunakan termometer yang dipasang dalam ember sampai temperaturnya ± 35°C. Setelah air menjadi bening maka dimasukkan ke dalam wadah atau botol tertutup.

2. Penetapan (*fixing*)

Larutan penetap yang digunakan adalah *acifix*, bahan ini juga sering digunakan dalam pemprosesan film fotografi. Bahan-bahan ini kemudian dimasukkan ke dalam ember yang berisi air dingin sebanyak 1 liter dan air panas sebanyak 1 liter, diaduk terus menerus ± 5 menit sampai *acifix* larut dalam air. Setelah air menjadi bening maka dimasukkan ke dalam wadah atau botol tertutup.

Baik bahan pengembangan (*developing*) maupun penetapan (*fixing*) kedua-duanya melarutkannya dalam wadah terbuat dari plastik (nampan) agar menghindari adanya kontak reaksi bahan kimia dengan wadah.

Persiapan berikutnya adalah pengecekan kembali semua kedudukan lensa dengan memperhatikan beberapa hal yaitu:

1. Menghindari segala macam getaran terutama dari AC maupun ventilasi udara.
2. Ruangan yang harus gelap jangan sampai ada kebocoran sinar lain masuk.

Waktu eksposur.

3. Emulsi media perekam yang menghadap objek.

Proses perekaman

Setelah menyusun peralatan seperti pada gambar 4, proses perekaman bisa dilakukan dalam ruang gelap. Laser dinyalakan terlebih dahulu dan objek berupa kucing keramik dapat diletakkan ditempatnya dengan jarak 5,5 cm dari media perekam. Namun media perekam kedudukannya sementara digantikan oleh layar putih untuk melakukan pengecekan sebelum pencahayaan dimulai. Di depan laser ditempatkan sebuah *shutter* (berupa pembuka dan penutup otomatis) yang telah disiapkan.

Cahaya referensi yang menuju media perekam ada yang menembus layar dan mengenai objek. Cahaya yang mengenai objek non-transparan tersebut, ada yang dihamburkan ke media perekam. Cahaya tersebut merupakan cahaya objek. Sehingga diperoleh cahaya referensi dan cahaya objek yang berlawanan arah.

Perpaduan antara cahaya referensi dan cahaya objek dapat dilihat pada layar, dengan membuka dan menutup jalannya cahaya menggunakan tangan. Sesaat setelah ditutup akan terlihat getaran interferensi kecil. Interferensi yang berupa frinji terlihat ditabung laser He-Ne pada bagian samping tempat keluarnya cahaya laser dari tabung.

Setelah itu menutup *shutter* dan membiarkan susunan peralatan optik beberapa menit. Ini berfungsi untuk menghilangkan getaran yang ditimbulkan pada saat pengaturan dan jangan sampai ada bagian tubuh yang menyentuh meja optik. Kemudian media perekam yang telah disiapkan dipasang sesuai susunannya, dengan emulsi film menghadap objek. Setelah itu melakukan pencahayaan dengan waktu eksposurnya telah diperkirakan yaitu 8-10 detik, kemudian menutup *shutter* saat waktu pencahayaan selesai dan mencuci media perekam dalam ruang gelap pula.

Proses pencucian

Proses pencucian pada holografi dilakukan dengan beberapa tahap yang sederhana dan hampir sama dengan proses pencucian fotografi biasa. Gambar 5 menunjukkan tahapan dan urutan dari proses pencucian. Tahap pengembangan dan penetapan merupakan tahap yang terpenting dalam proses pencucian hologram.

Pengembangan 12 detik Tahap I	Air 15 detik Tahap II	Penetapan 15 detik Tahap III	Air 15 detik Tahap IV

pengembangan air penetapan

Gambar 5. Letak larutan untuk tahap pencucian media perekam

Proses pertama sesuai dengan gambar 5 yaitu memasukkan media perekam yang telah direkam ke dalam larutan pengembang dengan emulsi menghadap ke atas lalu digoyang-goyang agar reaksi merata. Hal ini berfungsi untuk membangkitkan (menimbulkan) butiran-

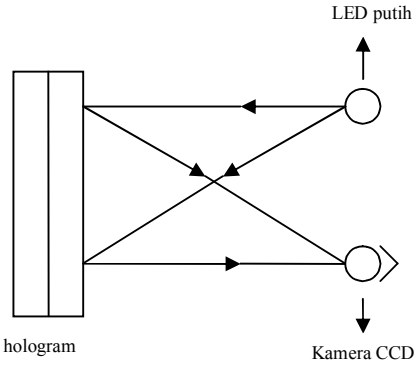
butiran perak selama kurang lebih 12 detik, setelah proses pengembangan selesai dilanjutkan dengan mencelupkan media perekam ke dalam air selama kurang lebih 15 detik. Ini berfungsi untuk menghilangkan kandungan larutan kimia dari pengembang.

Tahapan selanjutnya yaitu penetapan yang berfungsi untuk menetapkan atau menahan gambar yang telah dibangkitkan developing selama kurang lebih 15 detik. Kemudian mencelupkannya ke dalam air untuk menghilangkan larutan fixing. Setiap tahap-tahap pencelupan dilakukan sambil menggoyang-goyangkan media perekam dan emulsi menghadap ke atas. Setelah tahap-tahap pencucian selesai kemudian mengeringkan hologram refleksi untuk merekonstruksi (melihat) hasilnya.

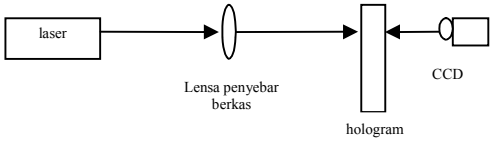
Hologram refleksi tidak dapat dilihat dalam keadaan basah sehingga memerlukan waktu kurang lebih 1 jam untuk mengeringkannya secara alami. Berbeda dengan hologram transmisi yang dapat dilihat dalam keadaan basah, hologram refleksi dalam keadaan basah bagian emulsinya akan luntur jika terkena sentuhan atau goresan. Oleh karena itu, setelah pencucian selesai maka hologram refleksi diletakkan di tempat yang bebas dari gangguan apapun agar hasilnya maksimal.

Proses rekonstruksi

Hasil perekaman yang telah dicuci dan dikeringkan kemudian direkonstruksi. Proses rekonstruksi tidak serumit proses perekaman karena hologram refleksi dapat direkonstruksi dengan menggunakan cahaya putih atau polikromatik. Proses rekonstruksi ini dapat dilakukan dengan merefleksikan cahaya yang datang dari arah depan yaitu sama seperti kedudukan pengamat. LED putih sebagai gelombang rekonstruksi dan kamera CCD sebagai pengamat. Skema sederhana proses rekonstruksi dapat dilihat pada gambar 6. Proses rekonstruksi hologram transmisi menggunakan cahaya yang identik seperti pada saat perekaman yaitu cahaya dari laser Helium Neon (He-Ne). Laser He-Ne sebagai gelombang rekonstruksi dan untuk kedudukan pengamat digunakan kamera CCD. Susunan rekonstruksi hologram transmisi dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 6. Skema rekonstruksi hologram refleksi

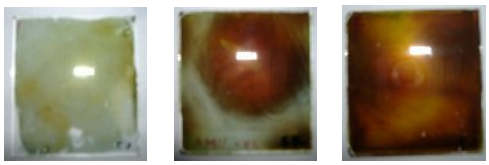


Gambar 7. Susunan rekonstruksi hologram transmisi dengan kamera CCD

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perekaman

Hologram refleksi tidak dapat direkonstruksi dalam kondisi basah sehingga perlu dikeringkan terlebih dahulu. Setelah kering maka dapat diperoleh hasil perekaman. Foto hasil perekaman setelah dicuci sesuai waktu eksposurnya ditunjukkan pada gambar 8. Perekaman yang dilakukan dengan waktu eksposur kurang lebih 6 detik berwarna coklat transparan (bening) seperti ditunjukkan gambar 8a, ini menunjukkan kurangnya waktu eksposur. Untuk perekaman dengan waktu eksposur 8 sampai 10 detik media perekam berwarna coklat seperti ditunjukkan gambar 8b, sedangkan perekaman dengan waktu eksposur yang lebih lama yaitu kurang lebih 12 detik sehingga berwarna coklat kehitaman (terbakar) seperti ditunjukkan gambar 8c.



(a) (b) (c)

Gambar 8. Foto hasil perekaman pada media perekam dengan waktu eksposur (a) ± 6 detik, (b) 8-10 detik, (c) ± 12 detik.

Faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan dalam pembuatan hologram refleksi adalah:

1. Media perekam yang digunakan sebaiknya sesuai dengan jenis hologram yang akan dibuat. Media perekam untuk hologram refleksi digunakan jenis PFG-03M yang emulsi dan kaca terpisah menjadi dua sisi. Jika menggunakan jenis Agfa Geveart 8E-75 yang emulsi di dua sisi plat maka dalam merekam hologram refleksi akan terbakar sehingga hasil yang diperoleh tidak tampak.
2. Susunan peralatan dirancang tidak sesuai dengan hologram yang akan dibuat.
3. Waktu eksposur yang kurang atau berlebihan. Waktu eksposur yang kurang tampak berwana coklat transparan (bening) dan waktu eksposur yang berlebihan tampak berwarna coklat kehitaman (hangus seperti terbakar), keduanya memberikan gambar yang kurang tajam saat rekonstruksi.
4. Teknik pencucian yang kurang baik

Hasil Rekonstruksi

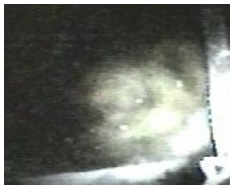
Foto asli dari objek dapat dilihat pada gambar 9. Foto objek yang diambil dari tampak samping kiri ditunjukkan pada gambar 9a, sedangkan gambar 9b diambil dari tampak samping kanan. Dari kedua gambar ini tidak ditemukan adanya perspektif baru bila pandangan berubah arah begitu pula gambar 9c yang difoto tampak dari depan. Hasil dari fotografi juga tidak menyebabkan bayangan terapung tetapi sekeliling dari objek masuk dalam bayangan.

Untuk hasil rekonstruksi hologram refleksi yang difoto seperti gambar 9d, bayangan objek mempunyai sisi tiga dimensi karena didapat pendekatan perspektif baru. Bila pandangan diarahkan ke samping kanan maka bayangan bergerak ke kanan, begitu juga bila pandangan diarahkan ke arah kiri, atas dan bawah mengikuti gerak arah pandangan.

(a)

(b)

(c)



(d)

Gambar 9. Foto objek asli dengan kamera digital yang diambil dari (a) tampak samping kiri, (b) tampak samping kanan, (c) tampak depan dan (d) foto hasil rekonstruksi hologram refleksi di foto dengan kamera CCD.

Jika cahaya putih atau polikromatik yang dikenai hologram tersebut menyebar, maka bayangan objek tampak besar dan jika cahaya di dekatkan ke hologram atau berkas cahaya akan menyempit maka bayangan objek akan tampak mengecil. Bayangan pada hologram tampak mengapung di ruangan berlatar merah seperti warna laser Helium-Neon. Pada bayangan hanya bagian yang menghamburkan cahaya laser saja yang terekam pada media perekam.

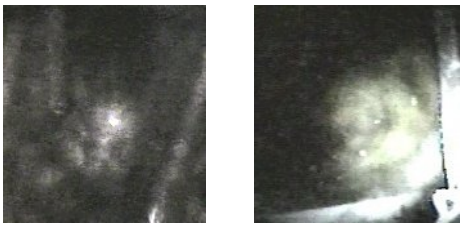
Berdasarkan hasil penelitian terdahulu [2] tentang studi pembuatan hologram refleksi, dapat dibandingkan bahwa rekonstruksi hologram refleksi menggunakan cahaya putih sangat selektif terhadap panjang gelombang. Warna bayangan ditentukan oleh spektrum yang masuk hologram karena jarak frinji hasil perekaman hologram refleksi sangat kecil maka frinji-frinji ini akan berfungsi sebagai filter, hanya pita panjang gelombang rekonstruksi yang memenuhi syarat Bragg yang didifraksikan.

Pada hologram transmisi jika dipakai cahaya putih atau tidak koheren dalam rekonstruksi tiap panjang gelombang cahaya tersebut akan bergeser satu sama lain sehingga secara keseluruhan akan terbentuk bayangan yang kabur dari berbagai warna sekaligus. Hal ini tidak terjadi pada hologram refleksi karena permukaan hologram akan menginterferensikan cahaya cukup banyak dengan efisiensi refleksi yang tinggi.

Kedua hologram baik transmisi maupun refleksi saat pencucian mengalami penyusutan, hal ini berpengaruh pada hologram refleksi. Akibatnya hologram refleksi dalam keadaan basah tidak dapat direkonstruksi sedangkan hologram transmisi baik keadaan basah maupun kering dapat direkonstruksi karena jarak antar frinjinya yang tidak sekecil hologram refleksi.

Untuk hologram transmisi media perekam dengan resolusi rendah dapat digunakan. Akan tetapi untuk hologram refleksi media perekam yang digunakan sangat selektif. Sehingga untuk memperoleh hologram refleksi yang baik digunakan media perekam yang mempunyai resolusi tinggi.

Perbandingan hasil rekonstruksi hologram transmisi dengan hologram refleksi menggunakan *CCD video camera* ditunjukkan pada gambar 10.

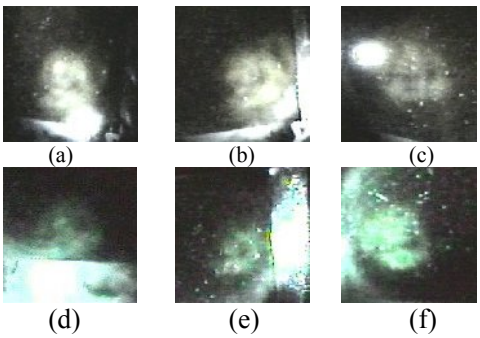


(a) (b)

Gambar 10. foto hasil rekonstruksi (a) hologram transmisi dan (b) hologram refleksi

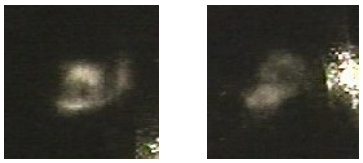
Dari gambar tersebut dapat dilihat perbedaannya karena rekonstruksinya menggunakan sumber cahaya yang berbeda. Pada rekonstruksi hologram transmisi sebagai sumber cahayanya. digunakan laser Helium-Neon sedangkan pada rekonstruksi hologram refleksi sebagai sumber cahayanya digunakan cahaya putih.

Rekonstruksi hologram refleksi tidak menggunakan cahaya putih saja, tapi dapat divariasi dengan warna LED yang berbeda seperti warna kuning dan biru. Cahaya tersebut termasuk cahaya tampak yang mempunyai panjang gelombang dalam rentang 400 nm hingga 700 nm. Foto hasil rekonstruksi hologram refleksi ditunjukkan oleh gambar 11, yang menggunakan beberapa panjang gelombang yang berbeda dari LED berwarna putih, biru, dan kuning.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)



(g) (h)

Gambar 11. Foto hasil rekonstruksi hologram refleksi menggunakan LED putih (a)bagian bawah, (b)bagian samping kanan, (c)bagian samping kiri, LED biru (d)bagian bawah, (e)bagian samping kanan, (f)bagian kiri, LED kuning (g)bagian bawah, (h)bagian samping kanan menggunakan *CCD video camera*.

Dengan menggunakan *CCD video camera* dapat dilihat berbagai sisi hologram tersebut. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal posisi kamera jauh dari hologram sedangkan LED diletakkan sedemikian rupa agar objek tampak jelas di kamera.

Rekonstruksi menggunakan LED berwarna putih menghasilkan gambar paling jelas daripada yang lain, karena cahaya berwarna putih merupakan cahaya polikromatik. Cahaya polikromatik merupakan cahaya yang tersusun dari cahaya-cahaya monokromatik. Sehingga dalam rekonstruksi hologram refleksi, cahaya monokromatik penyusun cahaya putih dengan panjang gelombang yang memenuhi syarat difraksi Bragg saja yang dapat merekonstruksi hologram refleksi. Panjang gelombang cahaya monokromatik penyusun cahaya putih yang memenuhi syarat tidak hanya satu, maka hasil rekonstruksinya paling jelas daripada cahaya lain.Pada penggunaan cahaya biru yang berasal dari LED berwarna biru untuk merekonstruksi hologram refleksi. Karena cahaya biru memiliki panjang gelombang rekonstruksi yang memenuhi syarat difraksi Bragg, maka dapat digunakan untuk merekonstruksi hologram refleksi. Tetapi hasil rekonstruksinya tidak sejelas menggunakan cahaya putih, karena cahaya biru merupakan cahaya monokromatik yang hanya memiliki satu panjang gelombang. Pada proses rekonstruksi panjang gelombang yang didifraksikan oleh frinji-frinji hanya satu, maka resolusi gambar yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan rekonstruksi menggunakan cahaya putih. Sehingga rekonstruksi hologram refleksi mengunakan cahaya biru tidak sejelas hasil rekonstruksi mengunakan cahaya putihPada penggunaan cahaya kuning yang berasal dari LED berwarna kuning untuk rekonstruksi hologram refleksi. Cahaya kuning juga memiliki panjang gelombang rekonstruksi

yang memenuhi syarat difraksi Bragg. Hasil rekonstruksi hologram refleksi menggunakan cahaya kuning tidak sejelas menggunakan cahaya putih ataupun biru, karena frekuensi cahaya kuning lebih kecil daripada cahaya putih ataupun biru. Frekuensi cahaya kuning yang lebih kecil, maka pada proses rekonstruksi banyaknya gelombang yang di difraksikan oleh frinji-frinji semakin sedikit. Oleh karena itu resolusi gambar hasil rekonstruksi menggunakan cahaya kuning lebih kecil daripada gambar hasil rekonstruksi dengan cahaya putih ataupun biru.

Penentuan panjang gelombang rekonstruksi harus memenuhi syarat difraksi Bragg, dengan persamaan:

$$2d \sin\theta = m\lambda$$

Jika berkas objek dan berkas rekonstruksi yang mengenai media perekam dari arah yang berlawanan maka persamaan menjadi

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\alpha}{2}}$$

dengan d menyatakan jarak frinji, λ menyatakan panjang gelombang, α menyatakan sudut antara berkas objek dengan berkas rekonstruksi dan dimisalkan $\theta_r = \theta_o = \theta$ maka diperoleh

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\pi - 2\theta}{2}} = \frac{\lambda}{2\cos\theta}.$$

Untuk hologram refleksi dengan sudut $\theta = 45°$ dan daya pisah media perekam $\frac{1}{d} =$ 2235 garis/mm maka panjang gelombang rekonstruksi yang memenuhi syarat difraksi Bragg yaitu:

$$\lambda = 2d\cos\theta$$
$$\lambda = 2(4{,}475.10^{-4})\cos 45$$
$$\lambda = 6{,}328.10^{-4}\, mm = 632{,}8nm$$

Sehingga pada panjang gelombang 632,8nm (warna merah) hasil rekonstruksi hologram refleksi akan tampak jelas karena identik seperti warna pada saat perekaman.

KESIMPULAN

1. Waktu eksposur saat perekaman sangat penting, jika eksposur kurang atau berlebih akan menghasilkan bayangan yang kurang jelas. Pada pembuatan hologram dengan media perekam jenis PFG-03M diperoleh waktu eksposur terbaik yaitu 8-10 detik.
2. Rekonstruksi hologram refleksi menggunakan beberapa panjang gelombang yang berbeda dari LED berwarna putih, biru, dan kuning. Rekonstruksi menggunakan LED berwarna putih menghasilkan gambar lebih jelas dibanding penggunaan warna yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Rudyansyah, A., 2004, *Pembuatan Hologram Transmisi* (skripsi), Semarang: FMIPA, Universitas Diponegoro.
[2] Yuliyanto, G., 1995, *Studi Tentang Pembuatan Hologram Refleksi dengan Menggunakan Laser Helium-Neon* (skripsi), Semarang: FMIPA, Universitas Diponegoro.
[3] Jenkins, A. F dan E.H. White, 1976, *Fundamentals of Optics,* New York: McGraw Hill Inc.
[4] Levi, L., 1976, *Applied Optic Volume 1 dan 2,* New York: John Willey and Sons.
[5] Einar, K.O., 1996, *Holographic Multi – Stereogram Constructed from Computer Image Applied 3-D Printer* (tesis),