

STUDI JENIS *PROBE EDDY CURRENT* UNTUK INSPEKSI PEMBANGKIT UAP PWR

Mudi Haryanto, S. Nitiswati

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir—BATAN

ABSTRAK

STUDI JENIS *PROBE EDDY CURRENT* UNTUK INSPEKSI PEMBANGKIT UAP PWR. Pembangkit uap adalah komponen utama PLTN yang berfungsi sebagai penghasil uap jenuh tekanan tinggi. Degradasi penuaan pembangkit uap khususnya pada tabungnya akan menyebabkan cacat pada dinding tabung bagian luar dan bagian dalam. Cacat pada tabung pembangkit uap adalah *primary water stress corrosion cracking*, korosi, erosi, denting dan retak. Untuk menjamin kelangsungan beroperasinya pembangkit uap, perlu dilakukan inspeksi dengan teknik *eddy current*. Makalah ini mempelajari berbagai jenis *probe* yang digunakan untuk inspeksi pembangkit uap. Untuk teknik *eddy current* ada dua jenis *probe* yang biasa digunakan yaitu *probe* absolut dan *probe* differensial. Dari berbagai jenis cacat pada pembangkit uap perlu ditentukan jenis *probe* yang tepat untuk digunakan mendeteksi semua jenis cacat tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji jenis *probe eddy current* yang dapat digunakan untuk inspeksi *steam generator*, dengan sekali *scanning* pada tiap tabung dalam mendeteksi semua jenis cacat. Metodologi yang digunakan adalah memahami desain pembangkit uap, memahami berbagai jenis cacat yang ada pada pembangkit uap dan mengkaji jenis *probe* didasarkan pada jenis dan karakteristik cacat yang ada pada pembangkit uap. Hasil kajian diperoleh jenis *probe* untuk inspeksi pembangkit uap PWR yaitu *probe array eddy current*. *Probe array* ini mampu mendeteksi semua jenis cacat korosi meliputi korosi lokal (*pitting corrosion*), korosi gradual (*wastage, fretting*) dan berbagai macam retak baik retak melingkar maupun retak memanjang dalam satu kali *scanning* (sapuan). Keunggulan lainnya dari *probe array* ini adalah mampu untuk menghemat waktu dan biaya inspeksi.

Kata Kunci : *eddy current*, tabung pembangkit uap, uji tak rusak

ABSTRACT

STUDY OF EDDY CURRENT PROBE TYPE TO INSPECT PWR STEAM GENERATOR. *Steam generator is a major component of the nuclear power plants that produces high pressure saturated steam. Ageing degradation of steam generator tubes can cause defects on the inside and outside of the tube. Example of steam generator tubes defects are primary water stress corrosion cracking, corrosion and erosion, denting, and crack. To ensure continuity of steam generator operation, an inspection needs to be done by utilizing eddy current technique. This paper studies on the various probe types used for steam generator inspection. There are two type of probes commonly used for eddy current technique such as absolute and differential probes. Based on various defects in the steam generator, an appropriate type of probe to detect all types of the defects needs to be determined. The purpose of this research is to assess the type of eddy current probes used to inspect a steam generator with a single scanning of each tube in detecting all types of defect. The method was used covered understanding design of steam generator, understanding the various types of defects that exist in the steam generator and assessing the types of probes based on the type and characteristics of the existing defects in steam generator. Result of assessment showed that the type of probe for inspection of PWR steam generator was eddy current array probe. This array probe is able to detect all types of corrosion defects covered local corrosion (pitting corrosion), gradual corrosion (wastage, fretting) and circumferential crack or longitudinal crack in a single scanning. The other advantage of array probe is its ability to save time and cost of inspection.*

Keywords : *eddy current, steam generator tube, non destructive test*

PENDAHULUAN

Pembangkit uap merupakan komponen utama dari reaktor air bertekanan (*Pressurized Water Reactor, PWR*) yang berfungsi sebagai penghasil uap jenuh tekanan tinggi yang digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik. Pembangkit uap akan mengalami penuaan dan degradasi khususnya pada tabung-tabungnya yang merupakan salah satu penghalang fisik terhadap pelepasan radioaktif. Akibat penuaan, pada tabung-tabung pembangkit uap akan terjadi korosi, erosi, retak, dan lubang-lubang. Apabila tabung mengalami retak tembus atau lubang tembus (*100% through wall*) akan menyebabkan fluida pendingin primer yang radioaktif bocor dan bercampur dengan fluida pendingin sekunder sehingga mengakibatkan pelepasan radioaktif ke lingkungan⁽¹⁾. Hal ini tentu saja tidak diharapkan. Oleh karena itu tabung pembangkit uap harus diinspeksi untuk mengetahui kondisi/keadaannya dari waktu ke waktu, sehingga kemungkinan paling buruk terjadi kebocoran tabung pembangkit uap yang mengakibatkan pembangkit uap harus berhenti beroperasi dapat diminimalisasi.

Untuk menjamin kelangsungan beroperasinya pembangkit uap perlu dilakukan inspeksi dengan metode yang lazim digunakan adalah uji tak rusak (*Non Destructive Test, NDT*) dengan teknik *eddy current*⁽²⁾. Prinsip kerja teknik *eddy current* sangat sederhana yaitu dengan induksi elektromagnetik⁽³⁾. Dengan prinsip tersebut dapat digunakan untuk mendeteksi korosi, erosi, *denting* dan retak. Salah satu faktor yang menentukan keberhasi-

lan dalam melakukan inspeksi pembangkit uap adalah kemampuan seseorang (inspektor) untuk memprediksi terlebih dahulu jenis cacat yang mungkin ada/terjadi pada tabung pembangkit uap. Contohnya: jenis cacat korosi apakah korosi sumuran atau korosi *gradual*, dan retak misalnya apakah arahnya *circumferential* atau *longitudinal*, sehingga dengan sekali melakukan inspeksi tidak ada cacat yang tidak terdeteksi. Untuk itu faktor pemilihan jenis *probe* yang akan digunakan untuk inspeksi tabung pembangkit uap harus tepat sehingga tidak perlu mengganti *probe* sampai berulang-ulang. Oleh karena itu studi terkait jenis *probe eddy current* untuk inspeksi pembangkit uap *PWR* perlu dilakukan. Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji jenis *probe eddy current* yang tepat digunakan untuk inspeksi pembangkit uap dalam sekali *scanning* (sapan). Diharapkan dari hasil kajian ini dapat diperoleh jenis *probe* yang tepat digunakan untuk inspeksi pembangkit uap dengan teknik *eddy current*.

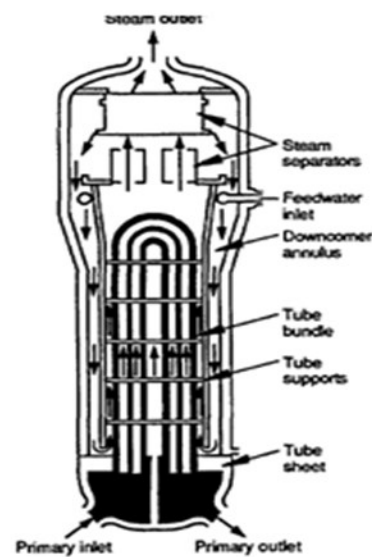
TEORI

Pembangkit uap

Pembangkit uap reaktor air bertekanan (*Pressurized Water Reactor, PWR*) adalah penukar panas skala besar terdiri lebih dari sepuluh ribu tabung penukar panas (desain terkini) yang disebut dengan *tube bundle*. Pembangkit uap dibagi menjadi 2 sisi, yaitu sisi primer dan sisi sekunder. Fluida pendingin primer reaktor yang panas dan radioaktif mengalir di dalam tabung-tabung penukar panas dan mendidihkan fluida sekunder yang

mengalir pada sisi bagian luar tabung-tabung (sisi sekunder) untuk menghasilkan uap yang akan menggerakkan turbin⁽⁴⁾. Pembangkit uap PLTN tipe PWR yang lazim digunakan adalah tipe cangkang dan tabung (*shell and tube*) dengan bentuk tabungnya resirkulasi yaitu pada salah satu ujung tabung bagian atas berbentuk lengkungan U (*U-bend*) terbalik dan bentuk tabung *once through*. Material terkini digunakan sebagai material tabung pembangkit uap adalah paduan nikel tinggi yaitu *alloy 600*, *alloy 690*, dan *alloy 800 Mod.*⁽⁵⁾. Pembangkit uap dikonstruksi dengan cara memasang tabung-tabung penukar panas secara mekanik pada *tube sheet* yang terbuat dari bahan baja karbon dan di las tertutup. Untuk menjaga kontak fisik antara tabung yang satu dengan sekunder) untuk menghasilkan uap yang akan menggerakkan turbin⁽⁴⁾. Pembangkit uap PLTN tipe PWR yang lazim digunakan adalah tipe cangkang dan tabung (*shell and tube*) dengan bentuk tabungnya resirkulasi yaitu pada salah satu ujung tabung bagian atas berbentuk lengkungan U (*U-bend*) terbalik dan bentuk tabung *once through*. Material terkini digunakan sebagai material tabung pembangkit uap adalah paduan nikel tinggi yaitu *alloy 600*, *alloy 690*, dan *alloy 800 Mod.*⁽⁵⁾. Pembangkit uap dikonstruksi dengan cara memasang tabung-tabung penukar panas secara mekanik pada *tube sheet* yang terbuat dari bahan baja karbon dan di las tertutup. Untuk menjaga kontak fisik antara tabung yang satu dengan tabung yang lainnya, maka sepanjang tabung vertikal yang lurus (*straight tube*) dipasang pelat penyangga tabung (*tube support plate*). Pada tabung bagian atas yaitu pada dae-

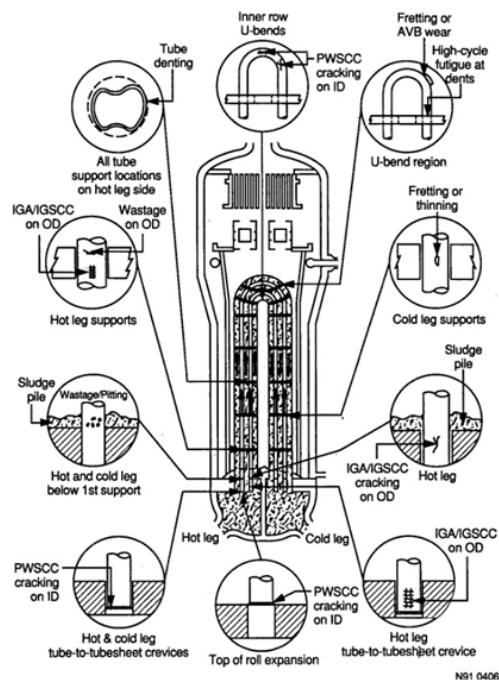
rah lengkungan U (*U-bend*) dipasang batangan pemegang tabung yang dikenal dengan nama *anti vibration bar* (AVB) yang berfungsi untuk menguatkan tabung-tabung dan membatasi amplitudo vibrasi sehingga pengaruh vibrasi yang dapat mengakibatkan tabung retak dapat diminimalisasi⁽¹⁾. Gambar penampang lintang pembangkit uap *PWR* tipe resirkulasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Penampang lintang pembangkit uap *PWR*, tipe resirkulasi⁽¹⁾

Mekanisme degradasi pembangkit uap

Pembangkit uap akan mengalami berbagai mekanisme degradasi selama operasi terutama pada bagian tabung-tabungnya. Degradasi ini dapat disebabkan karena proses pabrikan ketika pembuatan tabung dan karena pengaruh kondisi lingkungan selama beroperasi. Lokasi dan mekanisme degradasi tabung pembangkit uap *PWR* tipe resirkulasi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi dan mekanisme degradasi dinding tabung pembangkit uap PWR tipe resirkulasi^[1]

Dari Gambar 2 di atas diketahui bahwa mekanisme degradasi tabung pembangkit uap antara lain PWSCC (*primary water (stress corrosion cracking)*), *pitting*, *denting*, *wastage*, *fretting* atau *wear*. Mekanisme degradasi tersebut dijelaskan sebagai berikut:

Primary water stress corrosion cracking (PWSCC) adalah retak yang terjadi pada lokasi tertentu dari permukaan bagian dalam tabung pembangkit uap resirkulasi yang disebabkan karena adanya tegangan sisa yang tinggi karena proses pabrikasi.. Lokasi yang rentan terjadi *PWSCC* adalah daerah-daerah lengkungan U (*U-bend*) dari deretan tabung bagian dalam (tabung dengan radius lengkungan kecil), daerah transisi rol dari pada *tube sheet* dan pada lokasi *denting*⁽¹⁾.

Pitting adalah korosi lokal disebabkan karena tumpukan endapan pengotor (*sludge*

pile) atau kerak air yang mengandung deposit tembaga sehingga mengakibatkan lubang-lubang kecil (sumuran-sumuran) pada permukaan luar tabung pembangkit uap dimana fluida sekunder mengalir.. Apabila lokasi antara *pitting* yang satu dengan *pitting* yang lain saling bersinggungan dapat membentuk retak. *Pitting* dapat terjadi di semua lokasi sepanjang tabung pembangkit uap⁽¹⁾.

Denting adalah deformasi plastis tabung akibat pertumbuhan dan penumpukan produk korosi (*magnetite*) pelat penyangga tabung (*tube support plate*) yang terbuat dari material baja karbon. Untuk pembangkit uap desain generasi lama, pada pelat penyangga tabung tidak ada celah sehingga endapan pengotor atau sisa produk korosi terakumulasi terus menerus pada area kontak antara bagian luar tabung dengan pelat penyangga tabung. Karena hal ini berlangsung terus menerus mengakibatkan terjadinya *denting* pada tabung. *Denting* tidak termasuk cacat (*defect*) karena dinding tabung tidak mengalami penipisan, hanya terjadi perubahan geometri tabung^(1,4). Akibatnya terjadi perubahan geometri tabung dan diameter dalam tabung mengecil. *Denting* tidak termasuk cacat (*defect*) karena dinding tabung pembangkit uap tidak mengalami penipisan^(1,4).

Wastage adalah penipisan logam secara merata sebagai akibat adanya korosi yang ditimbulkan oleh substansi agresif yang terkonsentrasi pada permukaan tabung akibat adanya endapan yang ada di dinding tabung. *Wastage* pada umumnya terjadi pada pembangkit uap yang menggunakan bahan fosfat

yang dibutuhkan untuk mengendalikan kimia air sisi sekunder⁽¹⁾.

Fretting adalah degradasi tabung akibat adanya vibrasi yang disebabkan oleh aliran dengan kecepatan aliran yang tinggi (*flow induced vibration*) di daerah sekitar bundel tabung, sehingga tabung mengalami keausan (*wear*). Keausan ini disebabkan oleh gesekan atau terjadinya kontak antara tabung dengan bagian struktur seperti pelat penyangga tabung (*tube support plates*), penyangga tabung *U* (*U-bend*), *baffle preheater*. Penipisan pada tabung atau bagian struktur lainnya mungkin saja bisa terjadi. Mekanisme penipisan tersebut pada awalnya merupakan persoalan mekanik, dan penipisan tersebut dapat dipercepat dengan adanya proses korosi.

Intergranular Stress Corrosion (IGSCC) adalah proses korosi yang menghasilkan retak pada tabung yang disebabkan oleh kombinasi tegangan, material yang rentan, dan lingkungan yang korosif. *Intergranular Attack (IGA)* adalah proses korosi yang menyebabkan kehilangan logam pada batas butir. Terjadinya korosi IGA tidak memerlukan faktor *stress*, tidak seperti IGSCC yang memerlukan faktor *stress*^(1,5).

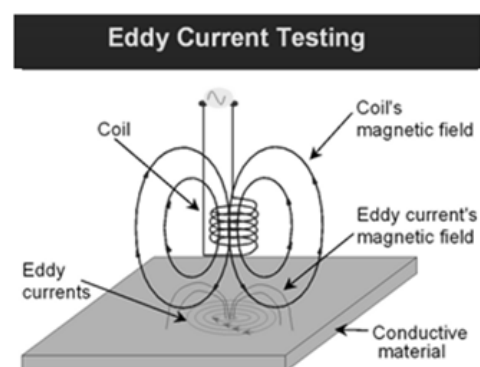
Fatigue adalah retak *circumferential* tabung pembangkit uap khususnya pada puncak pelat penyangga tabung atau pada penyangga di daerah *U-bend*. Retak terjadi dengan arah melingkar (*circumferential*) dan mengalami propagasi sekitar keliling tabung. Retak biasanya adalah *transgranular*. Propagasi fatik disebabkan oleh vibrasi aliran yang menghasilkan tegangan siklik. Kehadiran korosi pada umumnya

didominasi oleh fatik mekanik, namun pertumbuhan keretakan dapat dipercepat dengan meningkatnya kondisi korosi.

Metoda Eddy Current

Prinsip uji teknik *eddy current* didasarkan pada fenomena fisika induksi elektromagnetik, ditunjukkan pada Gambar 3. Bila pada *probe eddy current* diberi arus bolak balik maka arus akan mengalir melalui kumparan kawat dan menghasilkan medan magnetik. Jika *probe* tersebut didekatkan pada bahan konduktif seperti potongan uji logam, maka akan timbul arus pusar pada logam tersebut akibat pengaruh medan magnet *probe*. Arus pusar yang timbul pada logam akan membangkitkan medan

magnet yang akan berinteraksi dengan kumparan *probe*. Bila pada logam tersebut ada cacat maka akan terjadi pola perubahan impedansi pada kumparan *probe*. Pola perubahan impedansi ditunjukkan dengan besaran *amplitude* dan sudut fasa. Amplitudo menunjukkan besaran cacat sedangkan sudut fasa menunjukkan kedalaman cacat⁽³⁾.

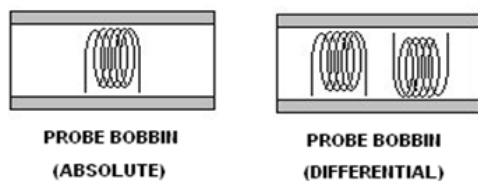


Gambar 3. Prinsip kerja teknik *eddy current*⁽³⁾

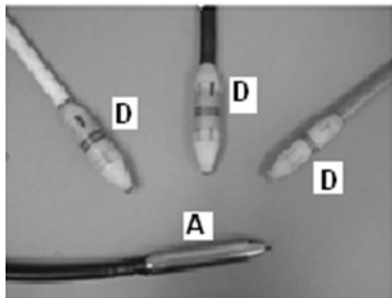
Jenis – jenis probe

1. Probe Bobbin

Probe bobbin adalah *probe* yang khusus untuk memeriksa tabung dengan kumparan yang arahnya melingkar searah radius tabung yang diperiksa dan letaknya di dalam tabung. Dilihat dari bentuk sinyal yang dikeluarkan, ada 2 jenis *probe bobbin* yaitu *probe bobbin absolute* yang hanya mempunyai satu kumparan dan *probe bobbin differential* yang mempunyai 2 kumparan dengan arah lilitan yang saling berlawanan seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Sedangkan bentuk fisik *probe bobbin absolute* dan *probe bobbin differential* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Kumparan *Probe bobbin absolute* dan *probe bobbin differential*⁽³⁾



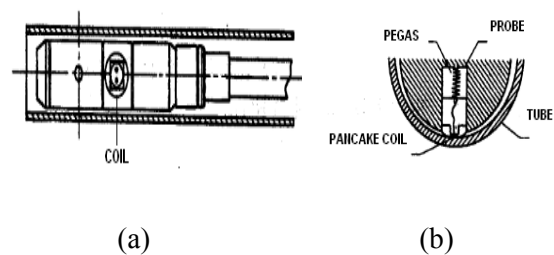
Gambar 5. Bentuk fisik *probe bobbin absolute* (A) dan *probe bobbin differential* (D)⁽³⁾

Kegunaan dari *probe bobbin* secara umum adalah dapat digunakan untuk mendeteksi korosi apakah korosi sumuran (*pitting*) dan korosi *gradual* (memanjang) serta

retak yang arahnya memanjang (*longitudinal*) searah panjang tabung.

2. Probe Multifrequency Rotating Pancake Coil (MRPC)

Probe MRPC terdiri dari 2 bagian yaitu bagian unit motor dan kepala *probe* yang mempunyai bentuk kumparan terdiri dari satu kumparan atau 3 kumparan dengan posisi 120° seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Keunggulan *probe MRPC* adalah dapat mendeteksi semua jenis cacat baik korosi sumuran, korosi *gradual* dan retak yang arahnya axial (*longitudinal*) dan *circumferential* (melingkar)^(3,6).



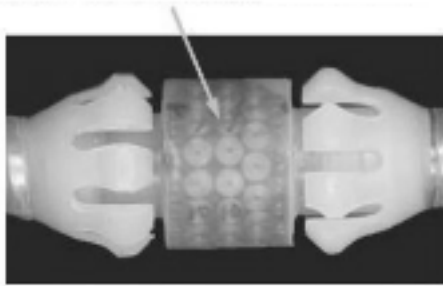
Gambar 6. (a) Probe MRPC di dalam tabung, dan (b) penampang lintang probe MRPC di dalam tabung yang mempunyai satu kumparan⁽³⁾

3. Probe Array

Probe array eddy current terdiri dari sejumlah kumparan tunggal diatur dalam tiga baris paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Jumlah kumparan tergantung pada diameter dalam tabung, artinya semakin besar diameter dalam tabung akan bertambah juga banyaknya kumparan untuk mencapai resolusi yang sama sepanjang

permukaan tabung yang di inspeksi. Pada *probe array eddy current* bisa tersusun 8 sampai 18 kumparan tunggal. Keunggulan *probe array* mampu mendeteksi retak *axial (longitudinal)*, *circumferential* (melingkar), korosi *pitting* dan korosi *gradual*^(3,6).

Coil tersusun 3 baris melingkar



Gambar 7. *Probe array eddy current*^(3,6)

METODOLOGI

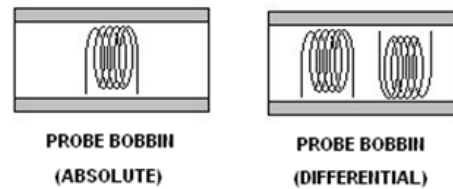
Metodologi yang digunakan dalam kajian ini yaitu memahami disain pembangkit uap, memahami berbagai jenis cacat yang ada pada pembangkit uap, dan mengkaji jenis *probe* didasarkan pada jenis dan karakteristik cacat yang ada pada pembangkit uap.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah diketahui berbagai jenis dan karakteristik cacat yang terjadi pada tabung pembangkit uap, maka secara umum dapat dikelompok menjadi 3 jenis cacat yaitu jenis cacat korosi sumuran (*pitting corrosion*), korosi memanjang (*gradual corrosion*) dan cacat retak.

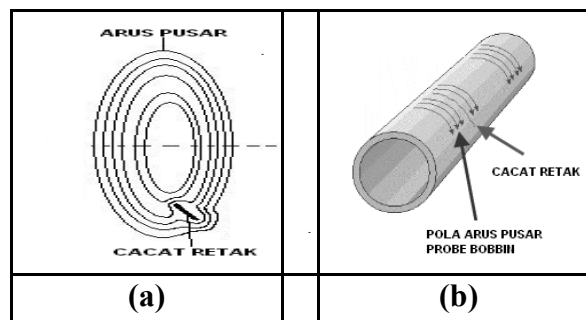
Probe eddy current yang sering digunakan untuk inspeksi tabung pembangkit uap adalah *probe bobbin coil*, dari jenis *absolute* dan *differential*. *Probe* dari jenis ini mudah

dibuat (mudah melilitkan kumparan-kumparannya/*coil*), ditunjukkan pada Gambar 8⁽³⁾.



Gambar 8. *Probe bobbin absolute* dan *probe bobbin differential*⁽³⁾

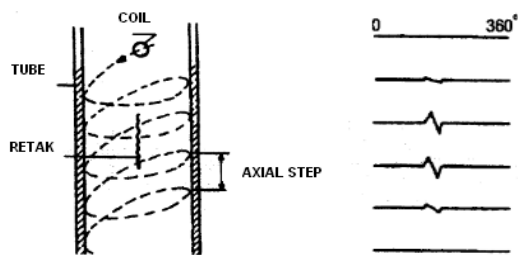
Kemampuan *probe bobbin* sangat handal untuk mendeteksi cacat yang bersifat *volumetric* seperti *fretting wear* dan korosi sumuran. Kelemahan jenis *probe bobbin* ini tidak mampu untuk mendeteksi jenis cacat retak yang melingkar (*circumferential*) karena alur arus pusarnya sejajar dengan retak *circumferential*^(7,8). Tetapi retak arah *axial* lebih mudah terdeteksi karena alur memotong retak seperti ditunjukkan Gambar 9.



Gambar 9. (a) Retak memotong alur arus pusar, dan (b) retak tabung yang arahnya melingkar tidak dapat dideteksi *probe bobbin*⁽⁷⁾

Untuk mengatasi kelemahan *probe bobbin* tersebut ada jenis *probe* yang lain yaitu *Multifrequency Rotating Pancake Coil (MRPC)* yang dapat mendeteksi cacat arah

circumferential dan *axial*. *MRPC* dikembangkan untuk mendeteksi jenis cacat retak yang sulit dideteksi dengan *probe bobbin* seperti *Stress Corrosion Cracking (SCC)*. Pendeteksian atau inspeksi dilakukan dengan cara menjalankan *probe MRPC* dan melakukan sapuan (*scanning*) pada permukaan bagian dalam tabung yang *probe* nya terhubung ke unit motor untuk memutar *probe* dalam tabung dengan gerakan *probe* membentuk pola *helical* apabila *probe* ditarik/dijalankan, seperti ditunjukkan pada Gambar 10^(7,8). Dari Gambar 10 terlihat pada bagian tabung yang terdeteksi tidak ada cacat akan membentuk garis lurus, sedangkan ketika *probe* bergerak dan mendekati sekitar daerah yang ada cacatnya maka akan membentuk *amplitude* kecil. *Probe MRPC* akan menunjukkan *amplitude* maksimum apabila *probe MRPC* tepat dipermukaan cacat di dalam tabung (*inside tube*).

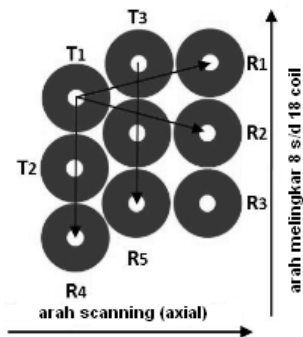


Gambar 10. Gerakan *scan probe MRPC* yang *helical* dan data rekaman^(7,8)

Keterbatasan dari *probe MRPC* adalah kecepatan inspeksi hanya 500 mm/s. Selain kecepatan ada kendala lain yaitu apabila *probe MRPC* melewati bagian tabung yang mengalami *denting* dimana akibat *denting* diameter bagian dalam tabung berkurang (diameter bagian dalam menyempit) sehingga terjadi gesekan mekanik antara permukaan dinding tabung ba-

gian dalam dengan permukaan *probe MRPC*, akibatnya *probe MRPC* sering rusak/pecah dan memerlukan penggantian *probe MRPC* berulang-ulang sehingga biaya inspeksi semakin mahal karena *probe MRPC* sangat mahal.

Untuk menanggulangi keterbatasan *probe MRPC*, maka dikembangkan jenis *probe* terbaru yaitu *probe array eddy current*^(6,7,8,9). Prinsip kerja *probe array* ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Prinsip kerja *probe array eddy current*^(7,9)

Untuk deteksi dan estimasi luasan panjang retak yang berorientasi *axial* pada tabung pembangkit uap dapat dilakukan pengukuran sebagai berikut: sinyal *transmisi* dibuat menggunakan pemancar kumparan T1 dan penerima sinyal menggunakan *receiver* R1 dan R2. Langkah pengukuran selanjutnya dengan mengubah kumparan pemancar dari T1 ke T2 dan kumparan penerimanya adalah R2 dan R3, dan seterusnya masing-masing mengikuti algoritma T_{n+1} , R_{n+1} dan R_{n+2} , sehingga dengan prinsip kerja ini, sebuah pemeriksaan cacat *axial* dalam lingkaran tabung seluruhnya dapat tercapai. Sedangkan untuk mendeteksi retak yang berorientasi melingkar

(*circumferentially*), kumparan pengirim adalah T1 dan T2 dan penerima adalah R4 dan R5. Dengan prinsip kerja tersebut baik cacat retak *axial* dan retak *circumferential* (melingkar) pada tabung dapat dideteksi. Keunggulan *probe array* dibandingkan dengan jenis *probe* lainnya adalah kemampuannya untuk melakukan sapuan (*scanning*) sebesar 1 m/detik^(6,7,9).

Selain itu karena *probe array* terbuat dari bahan yang lebih lembut dibandingkan dengan *probe MRPC*, maka akibat gesekan mekanik antara permukaan dinding tabung bagian dalam dengan permukaan *probe array* ketika *probe* melewati bagian tabung yang mengalami *denting* tidak mengakibatkan *probe* rusak/pecah. Dengan kecepatan *scanning* tinggi maka dapat menghemat waktu dalam melakukan pekerjaan inspeksi tabung pembangkit uap, berarti akan menurunkan biaya inspeksi.

KESIMPULAN

Dari hasil kajian berbagai jenis *probe eddy current* yang dihubungkan dengan berbagai karakteristik cacat yang terjadi pada tabung pembangkit uap *PWR* disimpulkan bahwa *probe eddy current* yang paling tepat digunakan untuk inspeksi pembangkit uap dengan sekali sapuan (*scanning*) adalah *probe array eddy current*. Karena selain mempunyai kemampuan untuk mendeteksi beberapa jenis cacat sekaligus juga kemampuannya yang tinggi untuk melakukan sapuan (*scanning*) yaitu 1 m/detik sehingga sangat efisien.

DAFTAR PUSTAKA

1. V.N. SYAH, et.all., "Aging And Life Extension of Major Light Water Reactor Components", Elsevier, 1993.
2. ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, "Rules of service Inspection of Nuclear Power Components", Section XI, Edition 2007.
3. AHMAD SABRI AB RAZAK, "Eddy Current Level II", Classroom Training Handbook, 1990.
4. S.NITISWATI, "Kajian Manajemen Umur Pembangkit Uap PWR", Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir VI, Jakarta, Juni, 2013.
5. S. NITISWATI, "Kajian Keandalan Material Tabung Pembangkit Uap PWR", Prosiding Seminar Nasional Keselamatan Nuklir 2014, Jakarta, Juni, 2014.
6. ANONIM, "Korea Non Destructive Test", ASNT Level III, Training Material, 2000.
7. IAEA TECDOC 1668, "Assesment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generator", Vienna 2011
8. L.OBRUTSKY, J.RENAUD, R.LAKHAN, "Steam Generator Inspections: Faster, Cheaper And Better, Are We There Yet?", IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, 2007
9. L S OBRUTSKY, N J WATSON, C H FOGAL, M CANTIN, "Experiences and Applications of the X-Probe for CANDU Steam Generators", Presented at the 20th EPRI Steam Generator NDE Workshop, Orlando, Florida, July 2001