

APLIKASI *TIME DOMAIN REFLECTOMETRY* UNTUK DETEKSI LOKASI KERUSAKAN KABEL KOAKSIAL PADA REAKTOR NUKLIR

Yoyok Dwi Setyo Pambudi¹, Abdul Hafid², Syaiful Bakhri³, Muhammad Subekti⁴, Sigit Santoso⁵

^{1,2,3,4,5}*Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir- BATAN,*
^{1,2,3,4,5}*BATAN Gedung 80, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314*

¹*dwisetyo@batan.go.id*

INFORMASI ARTIKEL

diajukan : 11-12-2020
revisi : 17-12-2020
diterima : 30-01-2021
dipublish : 04-02-2021

ABSTRAK

Kabel berperan penting pada sistem instrumentasi namun demikian rentan terhadap kerusakan akibat korosi dan kelelahan. Kerusakan kabel listrik dan instrumentasi seringkali tidak dapat terdeteksi pada inspeksi rutin secara visual. Salah satu jenis kabel instrumentasi pada reaktor riset adalah kabel koaksial. Keunggulan kabel ini adalah tidak mudah bocor dan dapat menghantarkan gelombang elektro-magnetik serta tahan terhadap gaya lateral dan lentur. Namun demikian seiring dengan waktu maka penuaan menjadi hal yang tidak dapat terelakkan. Tujuan penelitian ini adalah pengembangan metode *Time Domain Reflectometry* (TDR) untuk pencarian lokasi kerusakan pada kabel koaksial. Metode yang digunakan adalah penentuan lokasi kerusakan kabel secara memeriksa yaitu memeriksa secara visual dan diukur menggunakan mistar dan kemudian dibandingkan dengan metode TDR. Pengembangan metode TDR ini dapat dilakukan dengan menggunakan pembangkit pulsa dan osiloskop untuk membaca hasil dari sinyal *incident* dan refleksi dari gelombang tersebut. Kabel dibuat dengan variasi lokasi kerusakan kabel yaitu pada daerah 2 m, 5 m, 7 m, 10 m dan 12 m. Hasil pencarian lokasi dengan menggunakan metode TDR mampu mendeteksi letak kerusakan kabel dengan *error* bervariasi dari 0,19% sampai dengan 0,52%. Hasil ini cukup akurat karena kurang dari 1 %. Sehingga dapat membantu dalam inspeksi kabel pada reaktor nuklir dengan lebih mudah.

Kata kunci : TDR; kabel coaxial; penuaan; deteksi kerusakan kabel

ABSTRACT

Application Time Domain Reflectometry for Fault Detection and Localization in Coaxial Cables in Nuclear Reactors. Cable plays an important role in instrumentation system but thus in vulnerable to corrosion and fatigue damage. Electrical cable and instrumentation failures are often undetectable at visual inspection. One type of instrumentation cable in a research reactor is a coaxial cable. The advantage of this cable is not easy to leak and can deliver electro-magnetic wave as well as resistant to lateral and bending styles. However, often with time, aging becomes inevitable. The purpose of this research is development TDR method for examination of coaxial cable length. The method used is conventional measurement compared with the use of TDR method. The development of TDR method can be done by using pulse generator and oscilloskop to read the result of the wave signal generated as incident and reflection of the wave. Cables are made with variations indicating the location of damage or disconnect of cables i.e. in areas of 2 m, 5 m, 7m, 10 m and 12 m. Results using the TDR method were able to detect the location of cable damage with error varying from 0.19% to 0.52%. This result is quite accurate because the error obtained is less than 1%. Therefore, this method can help in the inspection of cables on nuclear reactors more easily.

Keywords : TDR; coaxial cable; aging; cable fault detection.

PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi nuklir untuk sektor energi melalui pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), maupun untuk sektor non energi seperti reaktor riset dan produksi isotop, harus memenuhi faktor keselamatan secara ketat. Upaya ini dilakukan dengan cara menguasai dan mengembangkan teknologi dengan keselamatan reaktor menjadi prioritasnya. Disamping manfaatnya, suatu reaktor nuklir menyimpan potensi bahaya yaitu bahaya terlepasnya radiasi bila terjadi kecelakaan berupa *loss of coolant accident* maupun kecelakaan parah pelelehan teras reaktor seperti kasus pembangkit tenaga nuklir Fukushima Dai-ichi. Untuk menjaga agar reaktor dapat berjalan normal maka pada reaktor nuklir banyak dipasang sensor dan instrumen untuk mengukur parameter proses dan

untuk pengendalian proses seperti pengendalian daya reaktor, suhu, tekanan dan aliran pendingin reaktor (Boguski & Przybytniak, 2016) dan menggunakan sistem instrumentasi dan algoritma sistem kendali yang baik (Pambudi, Wahab, & Kusumoputro, 2016).

Disebuah reaktor nuklir terdapat kabel-kabel yang terpasang pada sistem instrumentasi dan kendali reaktor tersebut. Pada PLTN besar seperti PWR 1000 MWe terpasang kabel dengan panjang total lebih 1000 km kabel terpasang, dan lebih dari 20.000 sirkuit serta ratusan jenis kabel yang berbeda (Hashemian, 2013). Pada sisi pembangkitan daya, kabel digunakan untuk menyalurkan daya listrik, sedang pada sisi instrumentasi dan kendali kabel tersebut digunakan untuk menerima dan

menyalurkan sinyal yang terkait keselamatan dan non-keselamatan seperti peralatan kontrol, perintah untuk mengaktifkan relay, pompa, katup dan motor (Jie, Redouane, Valeria, & Zio, 2013).

Dengan banyaknya kabel-kabel tersebut maka sangat sulit untuk memeriksa semua kabel satu persatu. Meskipun demikian pengambilan sampel kabel yang berada pada posisi vital atau kritis perlu diuji secara berkala sehingga kondisi kabel terpantau dan terjaga dengan baik. Penuaan kabel masuk dalam program manajemen penuaan reaktor dimana dilakukan penerapan teknik inspeksi kabel yang secara mudah dan baik tepat berdasarkan model peringkat risiko atau prediksi sisa umur kabel. Salah satu jenis kabel instrumentasi pada reaktor riset adalah kabel koaksial (Yücel, Legg, Kappatos, & Gan, 2017). Kabel ini ditemukan oleh Oliver Heaviside pada tahun 1950 merupakan kabel transmisi bagian dalam terdiri dari konduktor yang dikelilingi lapisan isolasi dan perisai luar. Konduktor bagian dalam dan luar memiliki sumbu geometris yang sama (Fabbri, n.d.) Keunggulan kabel ini adalah tidak mudah bocor dan dapat menghantarkan gelombang elektromagnetik serta tahan terhadap gaya lateral dan lentur (Zhu, Zhuang, Chen, & Huang, 2018) Kabel berperan penting pada sistem instrumentasi namun demikian rentan terhadap kerusakan akibat korosi dan kelelahan (Dinmohammadi et al., 2019). Dalam banyak kejadian, kerusakan kabel listrik dan instrumentasi pada isolator kabel tidak dapat terdeteksi pada inspeksi rutin melalui pengamatan visual. Selain itu, umumnya instalasi kabel terpasang dalam kondisi tertutup selain isolator kabel itu sendiri. Perkembangan teknik inovasi yang

dipadu dengan teknik rekayasa menghasilkan kemajuan dalam monitoring uji tak rusak, salah satunya adalah penggunaan *ultrasonic* (Li, 2017) untuk pemeriksaan beton, pipa dan kawat.

Biasanya metode TDR menggunakan peralatan pabrikan yang mahal, oleh karenanya penggunaan osiloskop laboratorium untuk mendeteksi kerusakan kabel dengan metode TDR berpeluang untuk dikerjakan. Tujuan penelitian ini adalah pengembangan metode TDR untuk inspeksi kondisi penuaan kabel pada reaktor nuklir, khususnya penentuan lokasi kerusakan kabel koaksial. Jika kabel mengalami kerusakan atau gangguan lain maka jarak ukuran panjang kabel berkurang. Oleh karena itu dengan menggunakan pengukuran panjang kabel menggunakan gelombang ultrasonik pendeteksi cacat pada kabel dapat dilakukan. Metode yang digunakan adalah penentuan lokasi kerusakan kabel secara manual yaitu memeriksa secara visual dan diukur menggunakan mistar. Selanjutnya hasil tersebut dibandingkan dengan metode TDR.

Pengembangan cara pengukuran dengan metode TDR dilakukan dengan menggunakan pembangkit pulsa dan osiloskop. Sebagai langkah awal sebelum dilakukan di tempat pengukuran dengan menggunakan sampel. Bahan uji adalah beragam kabel koaksial yang terdapat kerusakan atau terputus pada lokasi tertentu. Kabel koaksial dipilih karena banyak digunakan untuk pengiriman data yang menghubungkan perangkat-perangkat di dalam instrumen pada sebuah reaktor nuklir. Konfigurasi sambungan kabel untuk pengukuran panjang adalah *open loop configuration*. Terdapat lima kabel koaksial

yang dijadikan pengujian TDR yaitu pada panjang 2 m, 5 m, 7 m, 10 m dan 12 m.

TEORI

Time Domain Reflectometry (TDR) adalah suatu cara pemeriksaan kabel berbasis teknologi uji tak rusak menggunakan ultrasonik. Gelombang ultrasonik berupa sinyal listrik didapatkan dari pembangkit pulsa (Jones, Wraith, & Or, 2002). Sinyal akan mengalir melalui kabel kemudian akan memberikan pantulan kembali ke generator. Hasil sebaran sinyal dan pantulannya akan ditampilkan pada monitor osiloskop dalam bentuk gelombang berupa *phase* dan *delay*.

Ada tiga cara yang dapat digunakan untuk pemeriksaan kabel dengan metode TDR menggunakan pembangkit pulsa dan osiloskop, yaitu *short circuit configuration*, *matched load* dan *open circuit configuration*. Pemeriksaan dengan cara *short circuit configuration* dapat digunakan untuk mengetahui besar kehilangan daya yang dialami oleh suatu kabel sedangkan dengan *matched load* untuk mendeteksi jumlah komponen yang terdapat pada suatu jaringan kabel, misalnya kabel telepon dalam hal penentuan panjang kabel cara yang digunakan adalah *open circuit configuration* (Shin et al., 2005).

Teknik pengujian kabel yang paling populer dan efektif saat ini, TDR, digunakan untuk menemukan masalah di sepanjang kabel, di konektor, atau di perangkat pasif di ujung kabel dengan mengirimkan sinyal uji melalui konduktor di kabel dan mengukur pantulannya. TDR bekerja dengan prinsip yang sama dengan radar (Cataldo et al., 2014). Suatu sinyal DC dikirim melalui kabel yang diuji, dan refleksinya diukur. Identifikasi

lokasi didapatkan dengan mendeteksi adanya diskontinuitas impedansi atau perubahan pada kabel dan perangkat akhir (beban). Setiap perubahan impedansi yang signifikan di sepanjang kabel akan menyebabkan pantulan yang akan muncul pada layar osiloskop, membentuk gelombang sinus dengan besar amplitudonya tergantung pada karakteristik impedansi kabel.

Pada sebuah pembangkit listrik PLTN penggunaan TDR berguna untuk pengujian rangkaian instrumentasi, lilitan kawat motor dan transformator, gulungan pemanas pressurizer, termokopel, kabel pada detektor suhu, kabel detektor neutron, dan komponen lainnya yang biasanya tidak dapat diakses karena kondisi lingkungan seperti suhu tinggi dan zona radiasi tinggi (Hashemian, 2013). Pada penelitian ini kabel yang diuji adalah kabel koaksial RG58/U yaitu kabel yang biasa digunakan untuk menyalurkan sinyal pada instrumen di reaktor nuklir.

Kecepatan rambat gelombang listrik dalam kabel merupakan kecepatan transmisi (V_p) yang secara matematis dapat ditulis seperti Persamaan 1 (Balanis, 2012)

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1)$$

dimana

c = kecepatan cahaya (m/s)

μ_r = nilai *permittivity relative*

ϵ_r = permeabilitas media

Sinyal listrik yang merambat pada kabel mempunyai kecepatan hampir setara kecepatan cahaya, tetapi dengan dikalikan dengan faktor bahan kabel yang dilalui Sehingga panjang kabel L_{cable} dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 2.

$$L_{cable} = \Delta T V_{cable} 0.5 \quad (2)$$

$$V_{cable} = c V_f \quad (3)$$

Dengan ΔT waktu terukur dari sinyal pantul dalam ns, V_{cable} adalah laju sinyal listrik di dalam kabel dalam satuan cm/ns, dan V_f adalah dengan faktor kecepatan kabel

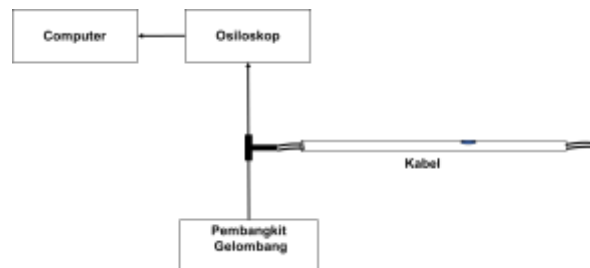
METODOLOGI

Sistem pemantauan TDR umumnya terdiri dari generator sinyal, osiloskop digital, sistem pemrosesan sinyal dan konektor antar perangkat atau T dan kabel, seperti yang ditunjukkan secara skematis pada Gambar 2. Osiloskop yang digunakan adalah *Digital Storage Oscilloscope* SDS 1304 CFL. yang menggunakan *bandwidth* 300 Mhz, dan *sampling rate* 1G/detik tiap kanal. Pembangkit pulsa atau signal generator yang digunakan adalah Hantek, HDG 2012 B, dengan pulsa sinusoidal dengan frekuensi 1 μ Hz hingga 10MHz, dan memori 64 MPts.

Bahan uji adalah kabel koaksial type RG58/U. Panjang kabel tersebut berada pada kisaran 2 m, 5 m, 7 m, 10 m dan 12 m. Pada kabel tersebut dibuat kerusakan atau putus pada lokasi tertentu. Kabel-kabel tersebut selanjutnya diukur dengan meteran pita secara berulang. Hasil pengukuran rata-rata akan dibandingkan dengan pengukuran dengan metode TDR.

Untuk melakukan pengukuran panjang kabel dengan metode TDR, konfigurasi yang digunakan adalah *open loop configuration*. Untuk penelitian ini, digunakan pembangkit pulsa dan osiloskop, seperti terlihat pada Gambar 1. Pertama, sinyal *ultrasonic* dibangkitkan dari pembangkit pulsa pada frekuensi tertentu dialirkan ke dalam kabel serta dihubungkan dengan osiloskop. Sinyal tersebut dapat dikirimkan dalam bentuk

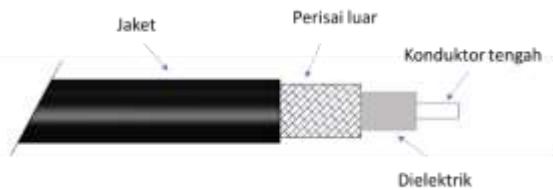
sinusoidal atau bentuk kotak. Pada penelitian ini, sinyal yang digunakan adalah berbentuk sinusoidal



Gambar 1. Diagram pengujian lokasi kerusakan pada kabel koaksial RG58/U

Kabel Koaksial

Kabel koaksial atau disebut kabel BNC merupakan kabel metal lunak yang terdiri atas dua kabel yang diselubungi oleh dua tingkat isolasi. Tingkat isolasi pertama adalah yang paling dekat dengan kawat konduktor tembaga (dos Santos, Novo, Fontgalland, & Perotoni, 2017). Tingkat pertama ini dilindungi oleh serabut konduktor yang menutup bagian atasnya yang melindungi dari pengaruh elektromagnetik, kabelnya memiliki impedansi karakteristik baik 50 atau 52 Ω . Pada penelitian ini digunakan kabel koaksial tipe RG58/U yang mempunyai spesifikasi diameter 5 mm, massa kabel persatuan adalah 0,0257 g/m, kapasitas sekitar 82 pF/m dan dapat mentolerir tegangan maksimum 300 V pada (1800 W). Kabel RG-58A/U ini memiliki konduktor pusat 7 atau 19 untai yang fleksibel (Wei, Wu, Huang, Xiao, & Fan, 2011). Bagian-bagian kabel koaksial RG-58A/U beserta fungsinya ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. kabel koaksial RG58/U

Jaket merupakan isolator yang terbuat dari karet plastik yang berfungsi untuk melindungi kabel keseluruhan. Perisai luar terbuat dari aluminium merupakan kabel berserabut yang dipilin menyilang dan mengelilingi isolator dalam. Bagian kabel ini berfungsi untuk mengantisipasi pengaruh interferensi frekuensi listrik yang tidak diinginkan. Dielektrik yang biasa terbuat dari foamed PE merupakan bagian kabel yang berfungsi untuk melindungi bagian konduktor tengah atau inti. Sedangkan bagian inti yang digunakan untuk transfer data adalah bagian tengahnya yang selanjutnya ditutup atau dilindungi dengan plastik sebagai pelindung akhir untuk menghindari goresan kabel (Langham, McLaughlin, & Harrison, 2001). Spesifikasi umumnya kabel koaksial RG58/U ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi umum koaksial *cab*le tipe RG58U (poly) (Shirkoochi & Hasan, 2010)

Nama	Tahanan (ohms)	Loss (dB per ft)		Kecepatan (relatif thd c)	Tegangan Maksimal (RMS kv)
		At 50 MHz	At 1 GHz		
RG58U	53	3.1	20	0.66 (poly)	1.9
RG58U	50	3.2	-	0.78 (foam)	0.2

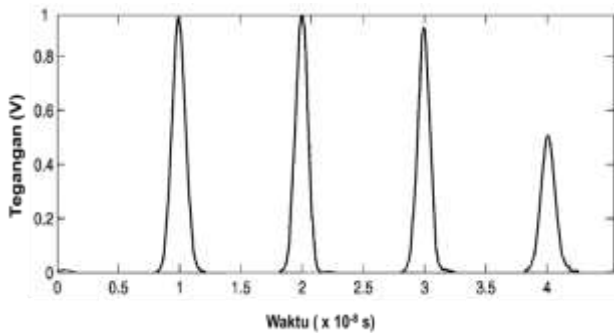
Kabel koaksial dibuat dalam kondisi rusak atau putus pada beberapa lokasi yang bervariasi. Penentuan lokasi kerusakan atau putusnya kabel dilakukan dalam dua cara. Cara pertama adalah pengukuran secara konvensional dimana pengukuran

dilakukan dengan menggunakan meteran pita. Akurasi pengukuran dengan cara konvensional rendah, selain itu pengukuran dengan cara ini juga memiliki banyak keterbatasan kondisi ditempat, misalnya jika kabel tertutup tembok, dinding sekat dan lain-lain. Cara kedua adalah pengukuran uji tak merusak dengan gelombang ultrasonik dengan metode TDR dimana cara ini memakai dua alat yaitu pembangkit pulsa sebagai pembangkit gelombang dan osiloskop.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pengukuran konvensional menggunakan meteran pita kabel didapatkan lokasi kerusakan atau putusnya kabel yaitu pada panjang 2 m, 5 m, 7 m, 10m dan 12 m. Pengukuran dengan metode TDR pada penelitian ini menggunakan alat bantu berupa sinyal generator dan osiloskop. Teknik pengukuran ini dapat dilakukan dengan kondisi *offline*. Bentuk sambungan yang digunakan adalah *open circuit configuration*. Ultrasonik dibangkitkan oleh pembangkit pulsa. Pengaturan frekuensi terhadap panjang panjang kabel cukup penting untuk mendapatkan hasil pengukuran yang akurat. Setelah dilakukan pengaturan frekuensi berulang-ulang akhirnya diperoleh bahwa besar frekuensi sesuai untuk pengukuran kabel dengan rentang panjang 2 m hingga 12 m adalah 100.000 kHz..

Pengujian pertama yaitu untuk kabel dengan kondisi kerusakan pada jarak 2 m. Sinyal dibangkitkan oleh pembangkit pulsa dan setelah berjalan sepanjang kabel hingga mencapai posisi kerusakan kabel dipantulkan dan diterima oleh osiloskop berupa sinyal deter waktu dengan seperti diperlihatkan pada Gambar 3



Gambar 3. Sinyal deret waktu dari sinyal yang dipantulkan dalam oleh kabel koaksial yang diuji.

Pada osiloskop timbul suatu puncak pertama korelasi pada orde waktu 10 ns, kemudian sinyal kedua muncul pada 21 ns, sinyal ketiga berada 30 ns, dan sinyal berikutnya di 40 ns. Amplitudo tegangan sinyal mula mula adalah 1 V, dan berlanjut menurun hingga 0,5 V pada pulsa ke empat. Selanjutnya dilakukan juga pengujian pada ke empat kabel lainnya. Setelah pengujian untuk kelima kabel koaksial tersebut maka disusunlah hasil pengukuran letak kabel yang diukur manual dengan pita mistar dan hasil pengukuran dengan metode TDR seperti diperlihatkan dalam Tabel 2. Dalam metode TDR maka data yang diperoleh adalah waktu T_0 dan T_1 .

Tabel 2. Hasil pengujian lokasi kerusakan pengukuran kabel koaksial dengan metode TDR

No	Letak kerusakan kabel (cm)	Hasil Pengukuran Metode TDR			
		T_1 (ns)	T_0 (ns)	ΔT (ns)	ΔL (cm)
1	212	62,40	40,93	21,47	212,41
2	508	91,07	39,60	51,47	509,20
3	720	153,47	80,53	72,94	721,60
4	1019	141,20	37,80	103,40	1022,95
5	1231	161,87	36,80	125,07	1237,34

Selisih nilai T_0 dan T_1 merupakan waktu yang menunjukkan waktu terukur dari sinyal pantul dalam ns. Panjang kabel koaksial hasil dari TDR didapatkan dengan perhitungan menggunakan persamaan 2 dan 3.

Untuk membandingkan akurasi pengujian TDR dalam menentukan lokasi kerusakan kabel lokasi kesalahan maka dilakukan perhitungan *error* dalam kesalahan variasi seperti ditunjukkan dalam tabel 3.

Tabel 3. Perbedaan hasil pengukuran pengukuran kerusakan kabel secara manual dan TDR.

No	Pengukuran secara manual (cm)	Pengukuran dengan TDR (cm)	Error (%)
1	212	212,41	0.19
2	508	509,20	0.24
3	720	721,60	0.22
4	1019	1022,95	0.39
5	1231	1237,34	0.52

Seperti terlihat pada Tabel 3, *error* pengukuran penentuan letak kerusakan kabel dengan menggunakan TDR bervariasi dari 0,19% sampai dengan 0,52%. Hasil ini cukup akurat karena *error* yang didapat kurang dari 1 %. Namun demikian, semakin panjang ukuran kabel maka semakin besar prosentase *error* pengukuran manual dengan TDR. Hal ini mungkin disebabkan oleh karena metode TDR dapat menghasilkan pengukuran hingga orde yang lebih kecil dibandingkan manual yang menggunakan mistar pita. Dari hasil penelitian ini dapat dikatakan bahwa untuk menentukan lokasi kerusakan atau putus kabel koaksial maka penggunaan metode TDR menggunakan pembangkit gelombang dan osiloskop cukup baik.

Pengetahuan tentang panjang kabel yang berfungsi baik dengan cara

membandingkan hasil pengukuran konvensional dan metode TDR akan berguna dalam memeriksa kabel putus atau akibat korosi tidak dapat menghantarkan listrik dengan baik. Sehingga jika suatu kabel mengalami putus/patah dalam kondisi pembungkus kabel tidak rusak, dan tidak dapat dilihat secara visual, maka dengan metode TDR akan dapat diprediksikan jarak kabel yang mengalami kerusakan sehingga dapat dilakukan perbaikan. Kemampuan memperkirakan jarak kerusakan ini akan sangat membantu padapemeriksaan kabel yang berada dalam kondisi tertutup oleh beton atau penutup lainnya. Akhirnya dapat dikatakan bahwa dengan metode TDR akan sangat membantu dalam memprediksikan panjang kabel secara menyeluruh jika dalam kondisi baik dan juga dapat memperkirakan posisi kerusakan apabila kabel mengalami kerusakan.

KESIMPULAN

Penuaan merupakan salah satu masalah yang tidak dapat dihindari pada komponen instrumentasi di reaktor nuklir karena faktor korosi, panas, maupun tekanan. Salah satu jenis kabel instrumentasi yang digunakan instrumen pada reaktor riset adalah kabel koaksial type RG58/U. Eksperimental yang dilakukan menggunakan beberapa kabel koaksial, dengan beragam variasi menunjukkan lokasi kerusakan atau putusnya kabel yaitu pada daerah 2 m, 5 m, 7 m, 10 m dan 12 m. Hasil dengan menggunakan metode TDR mampu mendeteksi lokasi putus atau rusaknya pada kabel koaksial. Dengan kemampuan korelasi dengan sebesar 0.15%. Error pengukuran penentuan letak kerusakan kabel dengan menggunakan TDR bervariasi dari 0,19% sampai dengan 0,52%. Hasil ini cukup akurat karena error yang didapat

kurang dari 1 %. Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan pengukuran dengan metode TDR akan dapat digunakan untuk memprediksi jarak indikasi pada kabel yang mengalami kerusakan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kami mengucapkan terimakasih kepada DIPA PTKRN yang telah membiayai penelitian ini dan pihak-pihak yang telah membantu sehingga penelitian ini dapat terselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Boguski, J., & Przybytniak, G. (2016). Benefits and drawbacks of selected condition monitoring methods applied to accelerated radiation aged cable. *Polymer Testing*, 53, 197–203.
- Dinmohammadi, F., Flynn, D., Bailey, C., Pecht, M., Yin, C., Rajaguru, P., & Robu, V. (2019). Predicting damage and life expectancy of subsea power cables in offshore renewable energy applications. *IEEE Access*, 7, 54658–54669.
- dos Santos, K. M. G., Novo, M. S., Fontgalland, G., & Perotoni, M. B. (2017). A simple and effective method for cable shielding measurement using electric field probe. *2017 IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*, 1–5. IEEE.
- Fabbri, I. M. (n.d.). *Introduction to The Classical Spiral Electrodynamics: The "Spiral-Spin"*.
- Hashemian, H. M. (2013). Ageing of electric cables in light water reactors (LWRs). In *Materials Ageing and Degradation in Light Water Reactors* (pp. 284–311). Elsevier.
- Jie, L., Redouane, S., Valeria, V., & Zio, E. (2013). *Nuclear power plant*

components condition monitoring by probabilistic support vector machine.

Langham, A. L., McLaughlin, W. D., & Harrison, G. L. (2001, April 3). *Coaxial cable connector*. Google Patents.

Li, J. (2017). *Time domain model and experimental validation of the non-contact surface wave ultrasonic scanner*.

Pambudi, Y. D. S., Wahab, W., & Kusumoputro, B. (2016). Particle Swarm Optimization-Based Direct Inverse Control for Controlling the Power Level of the Indonesian Multipurpose Reactor. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2016, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/1065790>

Wei, T., Wu, S., Huang, J., Xiao, H., & Fan, J. (2011). Coaxial cable Bragg grating. *Applied Physics Letters*, 99(11), 113517.

Yücel, M. K., Legg, M., Kappatos, V., & Gan, T.-H. (2017). An ultrasonic guided wave approach for the inspection of overhead transmission line cables. *Applied Acoustics*, 122, 23–34.

Zhu, C., Zhuang, Y., Chen, Y., & Huang, J. (2018). A hollow coaxial cable Fabry–Pérot resonator for liquid dielectric constant measurement. *Review of Scientific Instruments*, 89(4), 45003.