



TUGAS AKHIR - MN 184802

ANALISIS KEMAMPUAN PENDETEKSIAN *PROBE EDDY CURRENT TESTING* DENGAN VARIASI FREKUENSI TERHADAP KEDALAMAN RETAK PADA *PROPELLER HUB* BERBAHAN PADUAN TEMBAGA

**MOCHAMMAD HAIKAL AUFAR
NRP 0411144000021**

**DOSEN PEMBIMBING
WING HENDROPRASETYO AKBAR PUTRA, S.T., M.Eng.
DONY SETYAWAN, S.T., M.Eng.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



TUGAS AKHIR - MN 184802

ANALISIS KEMAMPUAN PENDETEKSIAN *PROBE EDDY CURRENT TESTING* DENGAN VARIASI FREKUENSI TERHADAP KEDALAMAN RETAK PADA *PROPELLER HUB* BERBAHAN PADUAN TEMBAGA

**MOCHAMMAD HAIKAL AUFAR
NRP 0411144000021**

**DOSEN PEMBIMBING
WING HENDROPRASETYO AKBAR PUTRA, S.T., M.Eng.
DONY SETYAWAN, S.T., M.Eng.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



FINAL PROJECT - MN 184802

**ANALYSIS OF EDDY CURRENT TESTING PROBE
DETECTION CAPABILITY WITH VARIATIONS IN
FREQUENCY TO DEPTH OF CRACKS ON PROPELLER
HUB FROM COPPER ALLOY**

**MOCHAMMAD HAIKAL AUFAR
PRN 0411144000021**

**SUPERVISORS
WING HENDROPRASETYO AKBAR PUTRA, M.Eng.
DONY SETYAWAN, M.Eng.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KEMAMPUAN PENDETEKSIAN *PROBE EDDY CURRENT TESTING* DENGAN VARIASI FREKUENSI TERHADAP KEDALAMAN RETAK PADA *PROPELLER HUB* BERBAHAN PADUAN TEMBAGA

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MOCHAMMAD HAIKAL AUFAR
NRP 0411144000021

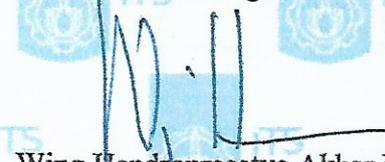
Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing II,



Dony Setyawan, ST., M.Eng.
NIP 19750320 199903 1 001

Dosen Pembimbing I,



Wing Hendroprasetyo Akbar Putra, ST., M.Eng.
NIP 19700615 199512 1 001



Mengetahui
Kepala Departemen Teknik Perkapalan,

Indri Wati Dwi Arsyawan, M.Sc., Ph.D.
NIP 19600210 198903 1 001

SURABAYA, 23 JANUARI 2020

LEMBAR REVISI

ANALISIS KEMAMPUAN PENDETEKSIAN *PROBE EDDY CURRENT TESTING* DENGAN VARIASI FREKUENSI TERHADAP KEDALAMAN RETAK PADA *PROPELLER HUB* BERBAHAN PADUAN TEMBAGA

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 9 Januari 2020

Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MOCHAMMAD HAIKAL AUFAR
NRP 0411144000021

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

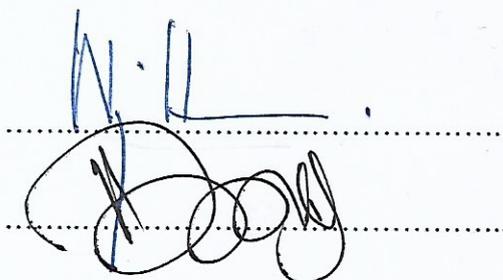
1. Danu Utama, ST., MT.
2. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.
3. Totok Yulianto, ST., MT.
4. Mohammad Nurul Misbah, ST., MT.



Four handwritten signatures in blue ink are positioned to the right of the list of examiners. Each signature is placed above a horizontal dotted line that aligns with the corresponding name in the list.

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Wing Hendroprasetyo Akbar Putra, ST., M.Eng.
2. Dony Setyawan, ST., M.Eng.



Two handwritten signatures in blue ink are positioned to the right of the list of supervisors. Each signature is placed above a horizontal dotted line that aligns with the corresponding name in the list.

SURABAYA, 23 JANUARI 2020

Dipersembahkan kepada kedua orang tua atas segala dukungan dan doanya

KATA PENGANTAR

Kapal terdiri atas berbagai struktur yang kompleks. Ketika kapal terkena beban secara terus-menerus, maka akan menyebabkan kerusakan pada struktur kapal. Kerusakan yang terjadi di permukaan dapat dideteksi dengan berbagai metode, salah satunya *eddy current testing* yang menjadi topik utama dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Salah satu jenis kerusakan pada struktur kapal adalah keretakan. Penyelesaian Tugas Akhir ini menitikberatkan pada material paduan tembaga yang banyak dipakai sebagai bahan pembuatan *propeller*. Retak buatan diperlukan pada material paduan tembaga yang dibuat dengan metode *electrical discharge machining*.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, utamanya kepada yang terhormat:

1. Para Dosen Pembimbing: Bapak Wing Hendroprasetyo Akbar Putra dan Bapak Dony Setyawan;
2. Para Dosen Penguji: Bapak Danu Utama, Bapak Achmad Zubaydi, Bapak Totok Yulianto dan Bapak Mohammad Nurul Misbah;
3. Kepala Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal Departemen Teknik Perkapalan ITS, Bapak Totok Yulianto;
4. Kepala Departemen Teknik Perkapalan ITS, Bapak Wasis Dwi Aryawan;
5. Dosen Wali, Bapak I Ketut Suastika;
6. Para dosen dan staf administrasi di lingkungan Departemen Teknik Perkapalan ITS, utamanya pada Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal;
7. CV. Rahayu Sentosa Ngingas Waru Sidoarjo, utamanya Bapak Yudi Effendi;
8. Keluarga Besar Deadrise P54;
9. Teman-teman peserta Tugas Akhir Kelompok C pada Rumpun Mata Kuliah Konstruksi dan Kekuatan Kapal Semester Gasal 2019/2020: Saudara Akhmad Roni, Saudara Andika Dayongki, Saudara Dzaky Bestari dan Saudara Pramodana Haekal; dan
10. Para anggota Keluarga Budi Suroyo di Kediri dan Keluarga Zainuddin di Palembang.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, Januari 2020

Mochammad Haikal Aufar

ANALISIS KEMAMPUAN PENDETEKSIAN *PROBE EDDY CURRENT TESTING* DENGAN VARIASI FREKUENSI TERHADAP KEDALAMAN RETAK PADA *PROPELLER HUB* BERBAHAN PADUAN TEMBAGA

Nama Mahasiswa : Mochammad Haikal AUFAR
NRP : 0411144000021
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : 1. Wing Hendropasetyo Akbar Putra, ST., M.Eng
2. Dony Setyawan, ST., M.Eng.

ABSTRAK

Penggunaan tembaga baik murni maupun paduan di dunia industri terus berkembang, termasuk di industri perkapalan. Tembaga memiliki beberapa keunggulan untuk dijadikan bahan utama beberapa struktur pada sebuah kapal. Ketika kapal terkena beban secara terus-menerus, maka akan menyebabkan kerusakan pada struktur kapal. Kerusakan yang terjadi di permukaan dapat dideteksi dan diukur sejak dini tanpa merusak benda uji atau disebut dengan pengujian tanpa merusak. Kerusakan pada struktur tersebut dapat berupa retakan. Seberapa dalam keretakan yang terjadi dapat diperiksa dengan metode *eddy current testing* yang merupakan salah satu jenis pengujian tanpa merusak. Pengujian dengan metode *eddy current testing* mendapatkan tingkat keakuratan tinggi dan material yang digunakan lebih variatif. Tugas Akhir ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan pendeteksian kedalaman retak pada *eddy current testing* dengan frekuensi *probe* yang bervariasi terhadap material paduan tembaga. Dibutuhkan delapan *test piece* berukuran 150 mm x 25 mm x 10 mm. Masing-masing *test piece* memiliki empat retak buatan. Masing-masing retak memiliki dimensi panjang dan kedalaman yang berbeda-beda. Hasil penelitian ini menunjukkan variasi frekuensi *probe* akan berpengaruh terhadap jumlah indikasi yang mendekati kesesuaian terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi serta kemampuan kedalaman penembusan. Semakin besar frekuensi yang digunakan semakin tinggi juga sinyal indikasi retak yang muncul. Semakin besar frekuensi yang digunakan akan semakin besar juga kesesuaian tinggi grafik indikasi terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi. Nilai kedalaman penembusan standard untuk frekuensi *probe* 30 kHz, 500 kHz, dan 650 kHz secara urut sebesar 0.379, 0.093 dan 0.081; sedangkan nilai kedalaman penembusan efektifnya secara urut adalah 1.136, 0.278 dan 0.244. Didapat bahwa frekuensi mempengaruhi kemampuan kedalaman penembusan, semakin besar frekuensi semakin berkurang kemampuan kedalaman penembusan suatu sinyal indikasi retak. Hal tersebut dibuktikan semakin besar frekuensi semakin kecil nilai kedalaman penembusan standard dan kedalaman penembusan efektif.

Kata kunci: *Eddy current testing*, frekuensi, *probe*, retak, dan tembaga.

ANALYSIS OF EDDY CURRENT TESTING PROBE DETECTION CAPABILITY WITH VARIATIONS IN FREQUENCY TO DEPTH OF CRACKS ON PROPELLER HUB FROM COPPER ALLOY

Author : Mochammad Haikal AUFAR
Student Number : 0411144000021
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisors : 1. Wing Hendroprasetyo Akbar Putra, M.Eng
2. Dony Setyawan, M.Eng.

ABSTRACT

The use of both pure and alloyed copper in the industrial world continues to grow, including in the shipbuilding industry. Copper has several advantages as the main material for several structures on a ship. When the ship is continuously exposed to the load, it will cause damage to the ship's structure. Damage that occurs on the surface can be detected and measured early without damaging the test object or called non-destructive testing. Damage to the structure can be in the form of cracks. How deep the crack occurs can be checked with the eddy current testing method which is one type of non-destructive testing. Testing with the eddy current testing method gets a high degree of accuracy and the material used is more varied. This Final Project aims to determine the ability to detect the depth of cracks in eddy current testing with a variable probe frequency on copper alloy material. It takes eight test pieces measuring 150 mm x 25 mm x 10 mm. Each test piece has four artificial cracks. Each crack has different dimensions of length and depth. The results of this study indicate that the variation of the probe frequency will affect the number of indications that are close to the height of the graph in the calibration block and the depth of penetration capability. The greater the frequency used, the higher the signal for crack indication that appears. The greater the frequency used, the greater the suitability of the indication graph height to the graph height on the calibration block. Standard depth of penetration values for the 30 kHz, 500 kHz and 650 kHz probe frequencies are in the order of 0.379, 0.093 and 0.081; while the effective depth of penetration values is 1.136, 0.278 and 0.244. It was found that the frequency affects the ability of the depth of penetration, the greater the frequency the reduced depth of penetration of a signal indication of cracking. This is evidenced that the greater the frequency the smaller the value of the standard depth of penetration and the effective depth of penetration.

Keywords: Copper, crack, eddy current testing, frequency and probe.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR REVISI.....	iv
HALAMAN PERUNTUKAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SIMBOL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Manfaat.....	2
1.6. Hipotesis	3
BAB 2 STUDI LITERATUR.....	5
2.1. Dasar Teori	5
2.1.1. Pengujian <i>Eddy Current</i>	5
2.1.1.1. Elektromagnetik.....	6
2.1.1.2. <i>Eddy Current</i>	6
2.1.1.3. Prinsip Pengujian <i>Eddy Current</i>	7
2.1.1.4. Kelebihan Pengujian <i>Eddy Current</i>	7
2.1.1.5. Kekurangan Pengujian <i>Eddy Current</i>	8
2.1.1.6. Faktor-faktor Penting dalam Pengujian <i>Eddy Current</i>	8
2.1.1.7. Aplikasi Pengujian <i>Eddy Current</i>	10
2.1.1.8. Kumparan Pengujian	10
2.1.1.8.1. Kumparan Berdasarkan Struktur Fisik	10
2.1.1.8.1.1. <i>Probe Coil</i>	11
2.1.1.8.1.2. <i>Encircling Coil</i>	12
2.1.1.8.1.3. <i>Bobbin Coil</i>	13
2.1.1.8.2. Kumparan Berdasarkan Susunan Elektrik.....	14
2.1.1.8.2.1. <i>Absolute Coil</i>	15
2.1.1.8.2.2. <i>Differential Coil</i>	16
2.1.1.8.2.2.1. <i>Self-comparison Differential Coil</i>	16
2.1.1.8.2.2.2. <i>External Reference Differential Coil</i>	17
2.1.1.8.2.3. <i>Hybrid Coil</i>	17
2.1.1.9. Kalibrasi pada Pengujian	17
2.1.1.10. Menyeimbangkan Instrumen Pengujian	18
2.1.1.11. Pemilihan Sistem Frekuensi	18
2.1.1.12. Sistem Analisis Fase.....	19
2.1.1.13. Kedalaman Penembusan.....	19

2.1.1.14. Kedalaman Penembusan Standard.....	20
2.1.2. <i>Electrical Discharge Machining</i>	22
2.1.2.1. Cara Kerja <i>Electrical Discharge Machining</i>	23
2.1.2.2. Cairan Dielektrik dan Elektroda	23
2.1.3. Bahan <i>Propeller</i>	23
2.1.3.1. Kriteria Bahan <i>Propeller</i>	24
2.1.3.2. Tembaga dan Paduannya sebagai Bahan <i>Propeller</i>	24
2.1.3.3. Pembuatan <i>Propeller</i>	25
2.2. Tinjauan Pustaka.....	26
BAB 3 METODOLOGI	27
3.1. Bagan Alir.....	27
3.2. Alur Pengerjaan	28
3.2.1. Alur Pengerjaan Tugas Akhir	28
3.2.2. Alur Eksperimen.....	29
3.3. Proses Pengerjaan	29
3.3.1. Persiapan Material dan Peralatan	29
3.3.1.1. Persiapan Material	30
3.3.1.2. Persiapan Peralatan.....	30
3.3.1.2.1. Peralatan Pengolahan Material	30
3.3.1.2.2. Peralatan Pembuatan Retak	32
3.3.1.2.3. Peralatan Pengujian <i>Eddy Current</i>	32
3.3.2. Pembuatan Retak	34
3.3.3. Pengujian <i>Eddy Current</i>	39
3.4. Lokasi Pengerjaan.....	40
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN	41
4.1. Pengantar	41
4.2. Hasil-hasil Kalibrasi	41
4.3. Hasil-hasil Pengujian.....	43
4.3.1. Frekuensi 30 kHz.....	43
4.3.1.1. Kedalaman Retak 0.5 mm	43
4.3.1.2. Kedalaman Retak 1.0 mm	45
4.3.1.3. Kedalaman Retak 1.5 mm	48
4.3.2. Frekuensi 500 kHz.....	50
4.3.2.1. Kedalaman Retak 0.5 mm	50
4.3.2.2. Kedalaman Retak 1.0 mm	52
4.3.2.3. Kedalaman Retak 1.5 mm	54
4.3.3. Frekuensi 650 kHz.....	56
4.3.3.1. Kedalaman Retak 0.5 mm	56
4.3.3.2. Kedalaman Retak 1.0 mm	57
4.3.3.3. Kedalaman Retak 1.5 mm	59
4.4. Analisis Hasil Pengujian.....	61
4.4.1. Analisis Kesesuaian dan Kemampuan Pendeteksian.....	61
4.4.1.1. Lokasi-lokasi Indikasi yang Mendekati Kesesuaian	61
4.4.1.1.1. Frekuensi 30 kHz.....	62
4.4.1.1.2. Frekuensi 500 kHz.....	62
4.4.1.1.3. Frekuensi 650 kHz.....	62
4.4.1.2. Rasio dan Persentase Kesesuaian	63
4.4.2. Analisis Ketidaksesuaian (<i>Error</i>)	63
4.4.2.1. Frekuensi 30 kHz.....	63

4.4.2.1.1.	Kedalaman 0.5 kHz	64
4.4.2.1.2.	Kedalaman 1.0 kHz	64
4.4.2.1.3.	Kedalaman 1.5 kHz	65
4.4.2.2.	Frekuensi 500 kHz	66
4.4.2.2.1.	Kedalaman 0.5 kHz	66
4.4.2.2.2.	Kedalaman 1.0 kHz	66
4.4.2.2.3.	Kedalaman 1.5 kHz	67
4.4.2.3.	Frekuensi 650 kHz	68
4.4.2.3.1.	Kedalaman 0.5 kHz	68
4.4.2.3.2.	Kedalaman 1.0 kHz	69
4.4.2.3.3.	Kedalaman 1.5 kHz	70
4.5.	Pembahasan	70
4.5.1.	Hubungan antara Rata-rata Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman Retak	71
4.5.2.	Hubungan antara Frekuensi <i>Probe</i> dengan Jumlah Indikasi Retak yang Mendekati Kesesuaian	72
4.5.3.	Hubungan antara Rata-rata Persentase Ketidaksesuaian (<i>Error</i>) dengan Variasi Penggunaan Frekuensi	72
4.5.4.	Hubungan antara Rata-rata Realisasi Kedalaman Retak dengan Variasi Penggunaan Frekuensi	73
4.5.5.	Hubungan antara Variasi Frekuensi dengan Kemampuan Kedalaman Penembusan Sinyal (<i>Depth of Penetration</i>)	74
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	77
5.1.	Kesimpulan	77
5.2.	Saran	78
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN		
Lampiran A	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 0.5 mm dengan Probe 30 kHz	
Lampiran B	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.0 mm dengan Probe 30 kHz	
Lampiran C	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.5 mm dengan Probe 30 kHz	
Lampiran D	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 0.5 mm dengan Probe 500 kHz	
Lampiran E	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.0 mm dengan Probe 500 kHz	
Lampiran F	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.5 mm dengan Probe 500 kHz	
Lampiran G	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 0.5 mm dengan Probe 650 kHz	
Lampiran H	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.0 mm dengan Probe 650 kHz	
Lampiran I	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.5 mm dengan Probe 650 kHz	
Lampiran J	Hasil Retak Buatan pada Material	
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi Arus <i>Eddy</i> yang Berlawanan terhadap Arus Utama (Workman & Moore, 2012).....	7
Gambar 2.2 Ilustrasi Bagian-bagian Kumputan Permukaan (Hendroprasetyo, 2015).....	12
Gambar 2.3 Ilustrasi Pengujian dengan <i>Encircling Coil</i> (NDT Technologies (P) Limited, 2017).....	13
Gambar 2.4 <i>Encircling Coil</i> (Prüftechnik, 2019).....	13
Gambar 2.5 Ilustrasi <i>Bobbin Coil</i> (Hendroprasetyo, 2015).....	14
Gambar 2.6 Ilustrasi Konfigurasi Kumputan (Hendroprasetyo, 2015).....	14
Gambar 2.7 Ilustrasi Kumputan Tunggal dengan Susunan Absolut (Hendroprasetyo, 2015).....	15
Gambar 2.8 Ilustrasi Kumputan Ganda dengan Susunan Absolut (Hendroprasetyo, 2015).....	16
Gambar 2.9 Ilustrasi <i>Self-Comparison Differential Coil</i> (Integrated Publishing, Inc., n.d.).....	17
Gambar 2.10 Ilustrasi <i>External Reference Differential Coil</i> (Integrated Publishing, Inc., n.d.).....	17
Gambar 2.11 Diagram Bidang Impedansi (NDT Resource Center, 2014).....	19
Gambar 2.12 Pengaruh Frekuensi, Konduktivitas Listrik, dan Permeabilitas Magnetik terhadap Kedalaman Penembusan (Olympus Inspection Solutions, n.d.).....	20
Gambar 2.13 Hubungan antara Kedalaman Penembusan Standard dengan Frekuensi terhadap Berbagai Jenis Material (Hagemaiier, 2002).....	21
Gambar 2.14 Ilustrasi Sistem Dasar EDM (Poco Graphite, 2003).....	22
Gambar 2.15 Diagram Fase Paduan Tembaga – Seng (Carlton, 2007).....	25
Gambar 2.16 Diagram Fase Paduan Tembaga – Nikel (Carlton, 2007).....	25
Gambar 3.1 Bagan Alir.....	27
Gambar 3.2 Ilustrasi <i>Test Piece</i>	30
Gambar 3.3 <i>Flap Disc</i>	31
Gambar 3.4 Kondisi <i>Test Piece</i> Sebelum dan Sesudah Penghalusan.....	31
Gambar 3.5 Kegiatan Penghalusan <i>Test Piece</i>	32
Gambar 3.6 Blok Kalibrasi.....	33
Gambar 3.7 <i>Probe</i> dengan Frekuensi 30 kHz.....	33
Gambar 3.8 <i>Probe</i> dengan Frekuensi 500 kHz.....	33
Gambar 3.9 <i>Probe</i> dengan Frekuensi 650 kHz.....	34
Gambar 3.10 Mesin <i>Eddy Current Testing</i>	34
Gambar 3.11 Rancangan Lokasi Retak pada <i>Test Piece</i> #1.....	35
Gambar 3.12 Rancangan Lokasi Retak pada <i>Test Piece</i> #2.....	35
Gambar 3.13 Rancangan Lokasi Retak pada <i>Test Piece</i> #3.....	35
Gambar 3.14 Rancangan Lokasi Retak pada <i>Test Piece</i> #4.....	36
Gambar 3.15 Rancangan Lokasi Retak pada <i>Test Piece</i> #5.....	36
Gambar 3.16 Rancangan Lokasi Retak pada <i>Test Piece</i> #6.....	37
Gambar 3.17 Rancangan Lokasi Retak pada <i>Test Piece</i> #7.....	37
Gambar 3.18 Rancangan Lokasi Retak pada <i>Test Piece</i> #8.....	37
Gambar 4.1 Hasil Kalibrasi dengan <i>Probe</i> Frekuensi 30 kHz.....	42
Gambar 4.2 Hasil Kalibrasi dengan <i>Probe</i> Frekuensi 500 kHz.....	42
Gambar 4.3 Hasil Kalibrasi dengan <i>Probe</i> Frekuensi 650 kHz.....	42
Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak b.....	44

Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak d.....	44
Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #2 dengan Kode Retak b.....	45
Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak a.....	46
Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak c.....	47
Gambar 4.9 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #2 dengan Kode Retak a.....	47
Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #4 dengan Kode Retak b.....	49
Gambar 4.11 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #5 dengan Kode Retak a.....	49
Gambar 4.12 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #6 dengan Kode Retak c.....	49
Gambar 4.13 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak b.....	50
Gambar 4.14 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak d.....	51
Gambar 4.15 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #2 dengan Kode Retak b.....	51
Gambar 4.16 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak a.....	52
Gambar 4.17 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak c.....	53
Gambar 4.18 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #2 dengan Kode Retak a.....	53
Gambar 4.19 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #4 dengan Kode Retak b.....	54
Gambar 4.20 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #5 dengan Kode Retak a.....	55
Gambar 4.21 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #6 dengan Kode Retak c.....	55
Gambar 4.22 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak b.....	56
Gambar 4.23 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak d.....	56
Gambar 4.24 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #2 dengan Kode Retak b.....	57
Gambar 4.25 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak a.....	58
Gambar 4.26 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #1 dengan Kode Retak c.....	58
Gambar 4.27 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #2 dengan Kode Retak a.....	58
Gambar 4.28 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #4 dengan Kode Retak b.....	60
Gambar 4.29 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #5 dengan Kode Retak a.....	60
Gambar 4.30 Grafik Hasil Pengujian pada <i>Test Piece</i> #6 dengan Kode Retak c.....	60
Gambar 4.31 Grafik Hubungan antara Rata-rata Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman Retak	71
Gambar 4.32 Grafik Hubungan antara Penggunaan Frekuensi dengan Jumlah Indikasi yang Mendekati Kesesuaian.....	72
Gambar 4.33 Grafik Hubungan antara Rata-rata Persentase <i>Error</i> dengan Frekuensi	73
Gambar 4.34 Grafik Hubungan antara Rata-rata Realisasi Kedalaman Retak dengan Frekuensi	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinggi Rata-rata Indikasi Retak dari Garis <i>Lift-off</i> (Mufti & Hendroprasetyo, 2016)	26
Tabel 3.1 Rekapitulasi Ukuran Retak Buatan	38
Tabel 4.1 Rekapitulasi Ketinggian Grafik terhadap Pengujian Blok Kalibrasi	43
Tabel 4.2 Lokasi-lokasi Indikasi Retak untuk Kedalaman 0.5 mm	44
Tabel 4.3 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 0.5 mm	45
Tabel 4.4 Lokasi-lokasi Indikasi Retak untuk Kedalaman 1.0 mm	46
Tabel 4.5 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.0 mm	47
Tabel 4.6 Lokasi-lokasi Indikasi Retak untuk Kedalaman 1.5 mm	48
Tabel 4.7 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.5 mm	50
Tabel 4.8 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 0.5 mm	51
Tabel 4.9 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.0 mm	53
Tabel 4.10 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.5 mm	55
Tabel 4.11 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 0.5 mm	57
Tabel 4.12 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.0 mm	59
Tabel 4.13 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.5 mm	61
Tabel 4.14 Lokasi-lokasi Indikasi yang Mendekati Kesesuaian pada Frekuensi 30 kHz	62
Tabel 4.15 Lokasi-lokasi Indikasi yang Mendekati Kesesuaian pada Frekuensi 500 kHz	62
Tabel 4.16 Lokasi-lokasi Indikasi yang Mendekati Kesesuaian pada Frekuensi 650 kHz	63
Tabel 4.17 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 0.5 mm	64
Tabel 4.18 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1,0 mm	65
Tabel 4.19 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.5 mm	65
Tabel 4.20 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 0.5 mm	66
Tabel 4.21 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.0 mm	67
Tabel 4.22 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.5 mm	67
Tabel 4.23 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 0.5 mm	68
Tabel 4.24 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.0 mm	69
Tabel 4.25 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.5 mm	70
Tabel 4.26 Hasil Perhitungan Kedalaman Penembusan Standard	74
Tabel 4.27 Hasil Perhitungan Kedalaman Penembusan Efektif	74
Tabel 4.28 Rekapitulasi Ketinggian Grafik terhadap Pengujian Blok Kalibrasi	75

DAFTAR SIMBOL

δ	=	Kedalaman penembusan standard	[mm]
ρ	=	Resistivitas	$[\mu\Omega\text{-cm}]$
f	=	Frekuensi	[Hz]
μ_{rel}	=	Permeabilitas relatif	

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Penggunaan tembaga baik murni maupun paduan di dunia industri terus berkembang, termasuk di dunia industri perkapalan. Tembaga memiliki beberapa keunggulan untuk dijadikan bahan utama beberapa struktur pada sebuah kapal. Dengan menggabungkan tembaga dengan sejumlah material lain untuk membentuk paduan berbasis tembaga, sifat-sifat material yang dihasilkan dapat dirancang untuk menghasilkan perpaduan yang tepat dari sifat *ductile* yang tinggi, ketahanan korosi yang baik ditambah dengan kekuatan dan karakteristik kekakuan yang wajar.

Kapal terdiri atas berbagai struktur yang kompleks. Ketika kapal terkena beban secara terus-menerus, maka akan menyebabkan kerusakan pada struktur kapal. Apabila kerusakan pada struktur kapal tidak secepatnya diketahui dan dilakukan perbaikan, maka pada area tersebut akan memunculkan kerusakan yang semakin meluas sehingga memungkinkan untuk patah yang dapat menyebabkan kerugian yang sangat besar. Kerusakan yang terjadi di permukaan dapat dideteksi dan diukur sejak dini tanpa merusak benda uji atau biasa disebut dengan pengujian tanpa merusak atau *non-destructive testing* sehingga dapat meminimalkan dampak yang ditimbulkan. Salah satu jenis pengujian tanpa merusak adalah dengan metode *penetrant testing*. Namun metode *penetrant testing* hanya mendeteksi ada tidaknya indikasi kerusakan pada struktur yang dilakukan pengujian dan belum sampai mengukur seberapa dalam kerusakan yang terjadi. Ada kemungkinan, kerusakan pada struktur tersebut berupa retakan pada materialnya. Seberapa dalam keretakan yang terjadi dapat diperiksa dengan metode *eddy current testing*.

Pengujian dengan metode *eddy current testing* mendapatkan tingkat keakuratan yang tinggi dan juga batasan bahan material yang digunakan lebih bervariasi seperti material feromagnetik dan non feromagnetik. Jika dibandingkan dengan pengujian tanpa merusak atau *non-destructive testing* yang lain, material yang bisa digunakan hanya terbatas pada logam feromagnetik.

Berdasarkan permasalahan yang ada, maka dilakukan analisis pengaruh penggunaan frekuensi *probe* yang bervariasi pada metode *eddy current testing* terhadap pendeteksian kedalaman retak pada material paduan tembaga yang banyak dipakai sebagai bahan pembuatan *propeller*.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji adalah bagaimana pengaruh penggunaan frekuensi *probe* yang bervariasi pada metode *eddy current testing* terhadap pendeteksian kedalaman retak pada material paduan tembaga?

1.3. Tujuan

Tujuan dari pembuatan Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui kemampuan pendeteksian kedalaman retak pada metode *eddy current testing* dengan frekuensi *probe* yang bervariasi terhadap material paduan tembaga.

1.4. Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, permasalahan difokuskan pada:

- a. Material yang akan digunakan adalah paduan tembaga dengan ukuran 150 mm x 25 mm x 10 mm sebanyak 8 *test piece*;
- b. Pembentukan retak pada setiap *test piece* uji sebanyak 4 retak buatan dengan menggunakan *Electrical Discharging Machining* (EDM) dengan variasi kedalaman 0.5 mm, 1 mm dan 1.5 mm; variasi panjang 3 mm, 4 mm, 5 mm, 7 mm, 8 mm, 10 mm dan 11 mm; serta lebar retak 0.25 mm;
- c. Metode pengujian menggunakan *eddy current testing*; dan
- d. Frekuensi *probe* yang digunakan yaitu 30 KHz, 500 KHz, dan 650 KHz.

1.5. Manfaat

Dari Tugas Akhir ini, dapat diambil beberapa manfaat sebagai berikut:

- a. Secara akademis, hasil pengerjaan Tugas Akhir ini dapat dijadikan referensi dalam proses belajar mengajar dan dapat memajukan khazanah pendidikan di Indonesia; dan

- b. Secara praktis, hasil pengerjaan Tugas Akhir ini dapat berguna sebagai referensi dalam mengetahui perbandingan sensitivitas dengan variasi frekuensi *probe* terhadap pendeteksian material paduan tembaga menggunakan metode *eddy current testing*.

1.6. Hipotesis

Hipotesis dari Tugas Akhir ini adalah frekuensi *probe* yang lebih kecil mampu mendeteksi retak yang lebih dalam karena kedalaman penembusan lebih dalam daripada menggunakan frekuensi yang lebih besar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

STUDI LITERATUR

2.1. Dasar Teori

Dasar teori secara umum menjelaskan tentang pengujian *eddy current*, *Electrical Discharge Machining* (EDM) dan tinjauan material paduan tembaga sebagai bahan *propeller*. Pengujian *eddy current* didasarkan pada prinsip elektromagnetisme yang terdiri dari efek magnetik dari arus listrik. *Electrical Discharge Machining* adalah sebuah alat yang memungkinkan proses manufaktur untuk menghasilkan bentuk yang diinginkan pada suatu material dan didapat dengan menggunakan *electrical discharges*. Tembaga yang dibuat sebagai bahan *propeller* tidak dalam bentuk murni, melainkan dalam bentuk paduan berbasis tembaga, yaitu paduan tembaga – seng dan paduan tembaga – nikel.

2.1.1. Pengujian Eddy Current

Pengujian *eddy current* termasuk dalam salah satu metode pengujian tanpa merusak (*non-destructive testing*), yang dipelopori oleh Friedrich Forster pada tahun 1940-an, dan mengalami kemajuan yang sangat pesat dalam perkembangannya sejak saat itu. Pengujian *eddy current* dapat dilakukan pada semua material yang memiliki sifat konduktif terhadap listrik. Pengujian ini dapat menemukan ukuran retak permukaan maupun di bawah permukaan, pengukuran ketebalan lapisan logam maupun non-logam pada material logam, pengukuran konduktivitas listrik dan permeabilitas magnetik, serta perkiraan adanya korosi pada suatu material logam. Konduktivitas listrik dan permeabilitas magnet dapat berkaitan dengan struktur material, seperti kekerasan, komposisi kimia, ukuran butir (*grain*), dan kekuatan material (Blitz, 1997).

Pengujian *eddy current* (juga disebut pengujian elektromagnetik) adalah metode pengujian yang sangat fleksibel. Pengujian tersebut dapat digunakan untuk mengukur ketebalan pada bagian yang tipis, konduktivitas listrik, permeabilitas magnetik, kekerasan dan kondisi perlakuan panas dari benda uji. Metode pengujian tersebut juga dapat digunakan untuk menyortir logam yang berbeda dan untuk mengukur ketebalan lapisan non-konduktif pada benda uji yang bersifat konduktif terhadap listrik. Selain itu, metode tersebut dapat

digunakan untuk mendeteksi retakan dan rongga di dekat permukaan benda uji (American Welding Society, 2008)

2.1.1.1. Elektromagnetik

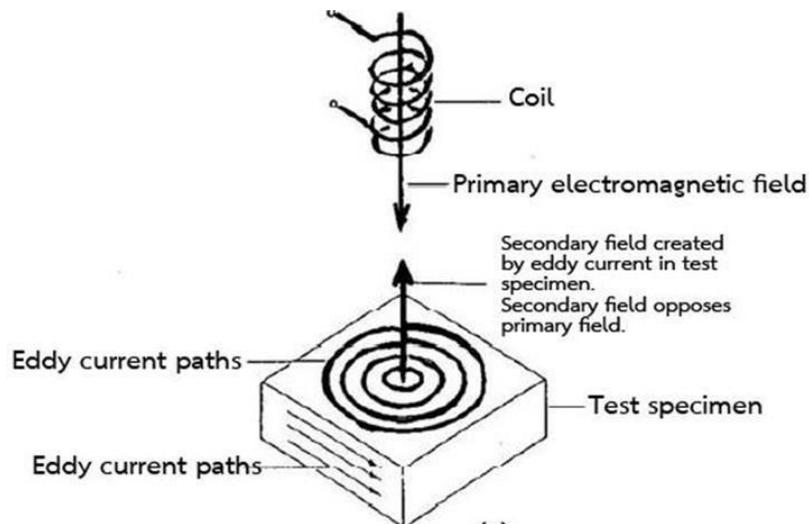
Hubungan antara magnet dan listrik ditemukan pada tahun 1824 oleh Oersted, yang menemukan bahwa arus di dalam kabel dapat menggerakkan jarum kompas magnetik di luar kabel. Beberapa tahun kemudian efek sebaliknya ditemukan medan magnet dalam gerakan dapat memaksa elektron untuk bergerak, menghasilkan arus. Penemuan penting tersebut dilakukan pada tahun 1831 secara independen oleh Faraday dan Henry. Oleh karena itu, elektromagnetisme terdiri dari efek magnetik dari arus listrik. Elektron-elektron yang bergerak berhubungan dengan medan magnet; medan magnet yang bergerak dapat menghasilkan arus. Efek elektromagnetik tersebut memiliki banyak aplikasi yang merupakan dasar dari pengujian *eddy current* (Hagemaiier, 2002).

Elektromagnetik, arti sederhananya adalah proses dimana ada keterlibatan aliran listrik dan magnet. Aliran listrik, dalam kondisi tertentu dapat menimbulkan magnet. Magnet, dalam kondisi tertentu juga dapat menimbulkan aliran listrik. Ketika arus bolak-balik (AC) melewati sebuah kumparan, terjadi perubahan medan magnet. Kemudian saat kumparan diletakkan di benda uji yang konduktif, medan magnet akan menginduksikan arus yaitu *eddy current* (Sadek, 2006).

2.1.1.2. Eddy Current

Eddy current adalah arus listrik yang terinduksi yang mengalir dan membentuk lintasan melingkar. Arah dari arus *eddy* yang diinduksikan dan medan magnet yang ditimbulkan akan berlawanan dengan arah arus primer (arus pada kumparan) serta medan magnet primer (medan magnet pada kumparan) (Workman & Moore, 2012). Arus *eddy* sendiri menimbulkan medan magnet yang berinteraksi dengan medan magnet kumparan sedemikian rupa hingga impedansi kumparan berubah. Sembarang perubahan pada arus *eddy* dicerminkan oleh perubahan impedansi kumparan pengujian. Karena impedansi kumparan pengujian dapat dimonitor oleh instrumen, faktor apapun yang timbul pada material yang diuji yang mempengaruhi arus *eddy* dapat dideteksi. Konsep yang penting di sini adalah bahwa artikel yang diperiksa harus mampu menghantarkan arus listrik. Arus *eddy* yang dihasilkan oleh kumparan pengujian selalu mengalir dalam arah sejajar terhadap bidang

kumparan yang menghasilkannya (Putra, 2015). Arah arus yang berlawanan diilustrasikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Ilustrasi Arus *Eddy* yang Berlawanan terhadap Arus Utama (Workman & Moore, 2012)

2.1.1.3. Prinsip Pengujian *Eddy Current*

Prinsip pengujian *eddy current* didasarkan pada fenomena induksi elektromagnetik. 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 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 fase. Amplitudo menunjukkan besaran cacat sedangkan sudut fase menunjukkan kedalaman cacat (Razak, 1990).

2.1.1.4. Kelebihan Pengujian *Eddy Current*

Beberapa kelebihan pengujian *eddy current* adalah peralatan pengujian *eddy current* relatif sederhana dan mudah dibawa sehingga tidak perlu persiapan yang berlebih. Kemudian pengujian *eddy current* memiliki sensitivitas yang baik terhadap cacat kecil pada atau dekat permukaan *test piece* (Yolken, 2007). Di sisi lain, pengujian *eddy current* menggunakan baterai sehingga dapat tidak menggunakan sumber listrik. Pengujian *eddy current* juga

memiliki risiko yang kecil. Pengujian *eddy current* tidak memerlukan pembersihan material setelah pengujian (Singh, 2015).

2.1.1.5. Kekurangan Pengujian *Eddy Current*

Di sisi lain, pengujian *eddy current* memiliki beberapa kekurangan. Pertama, pengujian *eddy current* hanya dapat diaplikasikan pada material yang bersifat konduktif. Kemudian pengujian *eddy current* rentan terhadap perubahan permeabilitas material yang dapat memengaruhi hasil uji. Hasil pengujian juga dapat dipengaruhi oleh kekasaran permukaan material. Penguji atau operator pengujian *eddy current* membutuhkan *skill* dan latihan dibutuhkan lebih mendalam dibandingkan metode lainnya. Pengujian *eddy current* juga memiliki keterbatasan cakupan luasan yang diuji, sebab daerah inspeksi yang luas membutuhkan tambahan alat yang tidak murah harganya (Singh, 2015).

2.1.1.6. Faktor-faktor Penting dalam Pengujian *Eddy Current*

Terdapat beberapa faktor penting yang berpengaruh terhadap pengujian *eddy current*, yaitu konduktivitas, permeabilitas, frekuensi, *lift-off*, *skin effect* dan *signal to noise ratio*.

a. Konduktivitas

Konduktivitas atau daya hantar adalah kemampuan sebuah material dalam menghantarkan arus listrik. Tetapi definisi ini dirasa kurang praktis dalam penerapan pengujian *eddy current*. Maka pada pengujian *eddy current* dipakai definisi dari *International Annealed Copper Standard (IACS)*. Menurut IACS, konduktivitas dari tembaga murni dipilih sebagai standard konduktivitas dan konduktivitas material lainnya dinyatakan sebagai persentase dari standard konduktivitas ini (Sadek, 2006).

b. Permeabilitas

Permeabilitas adalah kemampuan dari suatu material untuk memusatkan garis gaya magnet. Faktor ini hanya akan berpengaruh pada material yang bersifat feromagnetik. Efek ini dapat terlihat jelas dengan meningkatnya ketebalan material, dimana permeabilitas dapat mengurangi kemampuan penetrasi *eddy current* (Hagemaier, 2002).

c. Frekuensi

Frekuensi dari suatu arus bolak-balik dapat diartikan sebagai jumlah siklus (satu siklus lengkap) dari arus yang terjadi dalam satu detik. Satuan frekuensi adalah hertz (Hz), dimana 1 Hz merupakan satu siklus per detik. Frekuensi pengujian merupakan faktor yang paling penting dalam pengujian *eddy current* karena dapat mempengaruhi kedalaman

penembusan yang dapat dicapai (Sadek, 2006). Saat frekuensi pengujian meningkat, maka tingkat sensitivitas terhadap pendeteksian juga meningkat, tapi kemampuan penetrasi *eddy current* ke dalam material akan menurun. Jika frekuensi menurun, maka tingkat sensitivitas terhadap pendeteksian menurun, tapi kemampuan penetrasi *eddy current* akan meningkat. Frekuensi optimal yang terbaik ditentukan oleh eksperimen. Pengujian *eddy current* biasanya menggunakan frekuensi dengan rentang kilohertz (kHz) hingga megahertz (MHz) (Hagemai, 2002).

d. *Lift-off*

Lift-off merupakan suatu istilah yang digunakan untuk mendefinisikan jarak yang terjadi antara kumparan pengujian (*probe*) dengan material yang akan diuji (Sadek, 2006). Dapat dikatakan secara lebih sederhana, *lift-off* merupakan perubahan yang terjadi pada arus *eddy* saat *probe* dijauhkan dari permukaan material yang diuji. Saat melakukan pengujian dengan tujuan untuk mencari diskontinuitas yang terjadi pada benda uji, sinyal dari *lift-off* harus dapat dibedakan dengan sinyal yang dihasilkan dari diskontinuitas secara jelas. Untuk pengujian dengan tujuan mencari ketebalan lapisan cat pada material uji, maka harus dibuat standard *lift-off*. Standard *lift-off* mudah dibuat dengan menempelkan material non-konduktif (tidak menghantarkan listrik) yang telah diketahui ketebalannya di atas permukaan sampel material yang diuji (Cox, 1997).

e. *Skin Effect*

Pengujian *eddy current* paling sensitif terhadap variabel-variabel benda uji yang letaknya dekat dengan kumparan pengujian akibat adanya *skin effect*. *Skin effect* adalah hasil dari interaksi yang saling berhubungan antara *eddy current*, frekuensi pengujian, konduktivitas dan permeabilitas benda uji. Akibat adanya *skin effect*, konsentrasi *eddy current* di dalam benda uji terjadi paling dekat dengan kumparan pengujian dan menjadi lebih jelas saat frekuensi pengujian, konduktivitas, dan permeabilitas benda uji bertambah besar (Sadek, 2006).

f. *Signal to Noise Ratio*

Signal to noise ratio adalah perbandingan sinyal pengujian arus *eddy* yang menjadi perhatian terhadap sinyal yang tidak diinginkan. Sumber-sumber gangguan yang umum terjadi adalah variasi pada benda uji seperti kekasaran, bentuk, dan ukuran serta homogenitas. Gangguan kelistrikan lainnya dapat diakibatkan oleh sumber-sumber luar

seperti mesin las, motor listrik dan generator. *Signal to noise ratio* merupakan keadaan yang terjadi pada hampir seluruh metode pengujian tidak merusak (*nondestructive testing*) dan memiliki persyaratan 3:1 (Sadek, 2006). Hal ini berarti bahwa sinyal pengujian yang menjadi perhatian harus menunjukkan respons paling jelas dibandingkan sinyal lain yang tidak diinginkan.

2.1.1.7. Aplikasi Pengujian *Eddy Current*

Pada mulanya, pengujian *eddy current* sangat banyak dipakai dalam industri pesawat terbang karena sebagian besar material pesawat terbuat dari aluminium yang mempunyai sifat penghantar listrik cukup baik. Pengujian mencakup pengukuran ketebalan logam dan *coating*; penyortiran campuran paduan aluminium; evaluasi terhadap umur atau kerusakan akibat panas pada aluminium; pemeriksaan lubang baut pada struktur pesawat; pendeteksian pengelupasan kulit pesawat akibat korosi serta pendeteksian retak permukaan maupun di bawah permukaan pada struktur aluminium pesawat (Workman & Moore, 2012).

Dewasa ini, aplikasi pengujian *eddy current* di dalam industri sangat banyak dan luas. Pengujian *eddy current* dapat mendeteksi diskontinuitas yang terletak dengan arah tegak lurus terhadap arus *eddy* yang diinduksikan pada material atau mendeteksi perubahan ketebalan suatu material dan mengukur ketebalan lapisan non-konduktif. Beberapa diskontinuitas tersebut yaitu retak (*cracks*), *seams*, *laps* dan lubang serta laminasi pada sebuah pelat. Semua material yang dapat menghantarkan listrik baik feromagnetik maupun non feromagnetik dapat diperiksa menggunakan pengujian *eddy current* (Sadek, 2006).

2.1.1.8. Kumpulan Pengujian

Terdapat beberapa jenis kumpulan pengujian *eddy current*. Kumpulan pengujian dapat memiliki bermacam-macam bentuk dan tersusun dalam berbagai macam cara. Pemilihan jenis kumpulan yang akan digunakan bergantung pada kondisi pengujian. Secara garis besar, ada dua kelompok utama pengelompokan jenis kumpulan, yaitu berdasarkan struktur fisik dan berdasarkan susunan elektrik.

2.1.1.8.1. Kumpulan Berdasarkan Struktur Fisik

Berdasarkan struktur fisik dan jenis pengujiannya, terdapat tiga jenis kumpulan pengujian, yaitu *probe coil*, *encircling coil* dan *bobbin coil*. *Probe coil* digunakan untuk *scanning* permukaan benda uji. *Encircling coil* digunakan untuk menguji permukaan diameter

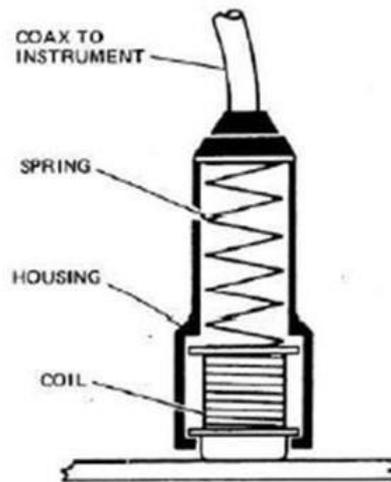
luar dari suatu benda yang dilewatkan pada sisi bagian dalam kumparan. *Bobbin coil* digunakan untuk memeriksa dari sisi dalam benda uji yang berbentuk tabung.

2.1.1.8.1.1. Probe Coil

Probe coil biasa disebut juga dengan kumparan permukaan, kumparan datar, atau kumparan *pancake*. Pada *probe* jenis ini terdapat mekanisme pegas untuk meminimalkan *lift-off*. Pada ujung *probe* diberikan lapisan *epoxy* yang melindungi kumparan dan memberikan ketahanan terhadap keausan. *Probe* ini dapat digunakan secara manual maupun dipasangkan pada peralatan pengujian otomatis. Luas medan magnet yang dihasilkan dari kumparan mendekati dari ukuran (diameter) kumparan tersebut (Sadek, 2006).

Kumparan permukaan adalah salah satu kumparan pengujian yang paling umum digunakan pada pengujian *eddy current*. Kumparan ini digunakan untuk memeriksa permukaan yang datar atau permukaan yang memiliki lengkungan dengan ukuran relatif sangat besar terhadap ukurannya (mendekati datar). Ujung kumparan permukaan ini juga dapat didesain mempunyai lengkungan untuk menyesuaikan kontur permukaan benda yang akan diuji (Workman & Moore, 2012). Saat menggunakan kumparan permukaan beresolusi tinggi, permukaan benda uji harus dilakukan *scanning* dengan teliti untuk menjamin area pemeriksaan yang menyeluruh. *Scanning* secara teliti tentunya membutuhkan banyak waktu. Oleh karenanya, pemeriksaan menggunakan kumparan permukaan pada benda uji yang besar biasanya dibatasi pada daerah yang kritis (Sadek, 2006).

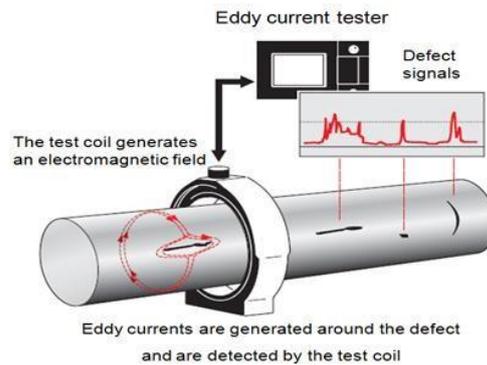
Probe coil dan bentuk *probe coil* dapat disesuaikan dengan geometri tertentu untuk menyelesaikan masalah pemeriksaan yang rumit. Sebagai contoh, *probe coil* yang dibuat dalam bentuk pensil dapat dipakai untuk memeriksa permukaan dalam melalui suatu lubang tangan atau jari-jari dalam sudu turbin. *Probe coil* dapat dipasang pada peralatan pemegang dan dapat dipakai untuk memeriksa jari-jari dalam tube atau lubang baut. *Probe coil* memiliki beberapa fitur klasik. Pertama, *probe coil* memiliki rumah kumparan yang terbuat dari material bukan logam nonkonduktif untuk mencegah perpindahan panas dari tangan penguji ke kumparan. Lalu *probe coil* ini memiliki desain modular (dua bagian) yang terdiri dari kepala *probe* dan kabel penguat. Dengan cara ini, jika penguji menarik kumparan menggunakan kabel, jika kabelnya rusak, maka yang harus diganti hanya kabelnya saja, bukan seluruh *probe* (Putra, 2015). Ilustrasi bagian-bagian kumparan permukaan ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi Bagian-bagian Kumaran Permukaan
(Putra, 2015)

2.1.1.8.1.2. *Encircling Coil*

Encircling coil juga biasa disebut kumaran diameter luar atau kumaran *feed-through*. Kumaran ini digunakan untuk menguji permukaan diameter luar dari suatu benda yang dilewatkan pada sisi bagian dalam kumaran. *Encircling coil* umumnya dipakai untuk memeriksa produk berbentuk tabung dan batang. Kawat dililitkan mengelilingi *tube*. Ini berarti bahwa arus utama di dalam kawat mengalir mengitari *tube*. Arus *eddy* yang terbentuk juga mengelilingi *tube*, sehingga akan sulit mendeteksi cacat yang searah dengan diameter *tube* (melingkar) karena tidak tegak lurus dengan arus *eddy* yang terbentuk (Sadek, 2006). *Tube* yang akan diperiksa pada pengujian dilewatkan ke dalam kumaran diameter luar ini (Workman & Moore, 2012). Saat menggunakan kumaran luar, adalah penting untuk menjaga agar benda uji berada di tengah-tengah kumaran seperti pada Gambar 2.3. Jika benda uji tidak pas di bagian tengah, sulit didapat respons diskontinuitas yang seragam. Umumnya dilakukan beberapa kali kalibrasi standard di daerah lokasi diskontinuitas buatan sehingga diperoleh posisi yang paling tengah dan respons yang tepat dari diskontinuitas buatan tersebut. Lebar kumaran adalah fungsi dari pemakaiannya. Dengan maksud kumaran yang lebar mencakup daerah yang luas, sehingga dapat merespons pengaruh yang luas seperti konduktivitas. Sebaliknya, kumaran yang sempit mendeteksi perubahan kecil seperti yang dihasilkan oleh diskontinuitas (Putra, 2015). Ilustrasi pengujian dengan *encircling coil* ditunjukkan oleh Gambar 2.3 dan contoh *encircling coil* ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Ilustrasi Pengujian dengan *Encircling Coil* (NDT Technologies (P) Limited, 2017)

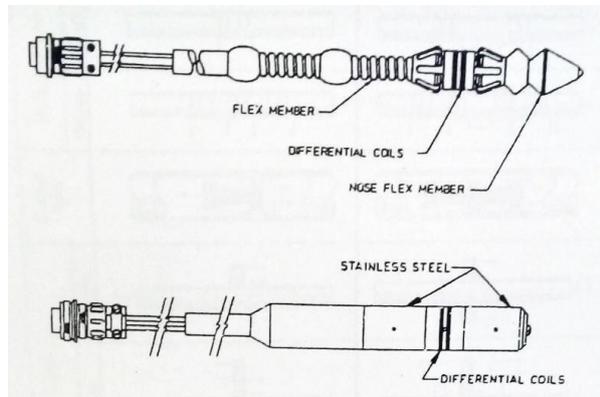


Gambar 2.4 *Encircling Coil* (Prüftechnik, 2019)

2.1.1.8.1.3. *Bobbin Coil*

Bobbin coil, kumparan diameter dalam, atau kumparan dalam merupakan istilah untuk kumparan yang digunakan pada saat melakukan pengujian dari sisi dalam benda uji dengan bentuk silinder. Kumparan jenis ini dapat mendeteksi adanya diskontinuitas dan perubahan ketebalan yang terjadi pada sisi dalam dinding silinder. Arus yang diinduksikan mengitari seluruh keliling dalam silinder sehingga seluruh bagian yang mengelilingi kumparan dapat diperiksa. Karena arus yang diinduksikan di dalam material paling kuat di dekat kumparan, maka kumparan dalam paling sensitif mendeteksi retak yang terletak pada permukaan atau dekat permukaan bagian dalam silinder. Kumparan dalam merupakan kebalikan dari kumparan luar. Kumparan dalam biasanya digunakan untuk memeriksa *tube* pada sebuah *heat exchanger* (Sadek, 2006). Seperti halnya pada *encircling coil*, *bobbin coil* menginduksikan

arus yang mengitari seluruh keliling silinder sehingga seluruh bagian yang melingkupi kumparan dapat diperiksa (Putra, 2015). Ilustrasi *bobbin coil* ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Ilustrasi *Bobbin Coil*
(Putra, 2015)

2.1.1.8.2. Kumparan Berdasarkan Susunan Elektrik

Kumparan *probe*, kumparan luar dan kumparan *bobbin* dapat dikelompokkan lebih lanjut. Pengelompokan tambahan ini berdasarkan pada bagaimana kumparan tersebut dihubungkan secara elektris. Terdapat tiga jenis susunan kumparan dasar yang dapat digunakan yaitu susunan kumparan *absolute*, *differential*, dan *hybrid*. Ilustrasi konfigurasi kumparan ditunjukkan oleh Gambar 2.6.

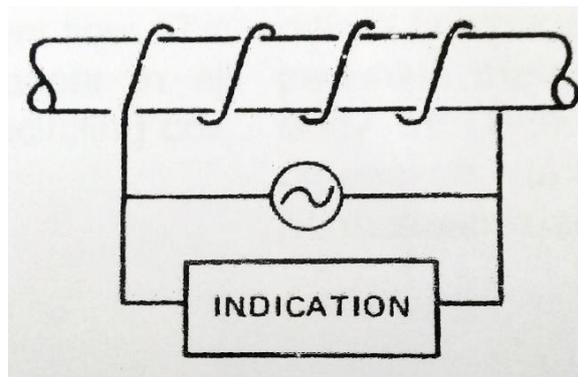
		Absolute	Differential
Encircling coils	Single		
	Double		
Bobbin coils			
Probe coils	Single		
	Double		

Gambar 2.6 Ilustrasi Konfigurasi Kumparan
(Putra, 2015)

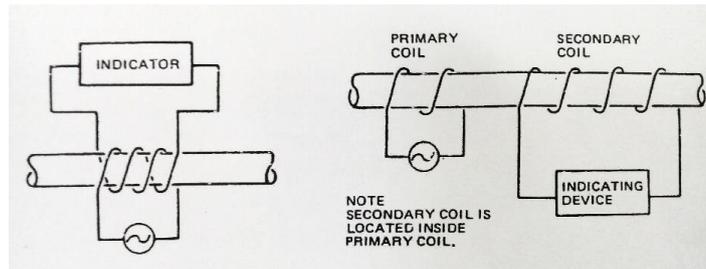
2.1.1.8.2.1. *Absolute Coil*

Susunan kumparan ini dikatakan *absolute* karena melakukan pengukuran tanpa referensi atau perbandingan langsung terhadap suatu standard saat pengukuran dilakukan. Beberapa penggunaan untuk sistem kumparan absolut yaitu pengukuran konduktivitas, permeabilitas, dimensi dan kekerasan (Sadek, 2006). Masalah yang timbul saat menggunakan susunan *absolute coil* yaitu kesulitan saat mendeteksi perubahan nilai impedansi yang kecil. Perubahan parameter pada kumparan yang disebabkan oleh faktor lingkungan dan *lift-off* sering kali dapat menutupi perubahan yang diakibatkan oleh diskontinuitas, hal ini membuat interpretasi sinyal hasil pengujian menjadi sangat sulit (Workman & Moore, 2012).

Absolute coil memiliki dua macam jenis kumparan yang umum digunakan, yaitu *single coil* dan *double coil*. Pada *single coil*, *coil* yang sama digunakan untuk menginduksikan arus *eddy* pada benda uji dan juga untuk mendeteksi reaksi benda uji terhadap arus *eddy*. *Single coil* hanya akan memeriksa pada daerah yang berada di bawahnya dan tidak membandingkan dirinya sendiri dengan sebuah standard referensi (referensi dari luar). Oleh karena *single coil* menguji benda tanpa pembanding, maka dinamakan absolut. Susunan absolut ini dapat dipakai untuk semua jenis kumparan, baik *probe coil*, *encircling coil* dan *bobbin coil*. Seperti namanya, *double coil* menggunakan dua kumparan. Kumparan pertama digunakan untuk menghasilkan medan magnet dan menginduksikan arus *eddy* di dalam suatu benda sedangkan kumparan kedua untuk mendeteksi perubahan aliran arus *eddy* yang terjadi. Lokasi kumparan kedua biasanya terletak di dalam kumparan pertama. Susunan absolut ini dapat dipakai untuk semua jenis kumparan (Sadek, 2006). Ilustrasi kumparan tunggal dan kumparan ganda dengan susunan absolut ditunjukkan oleh Gambar 2.7 dan Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Ilustrasi Kumparan Tunggal dengan Susunan Absolut (Putra, 2015)



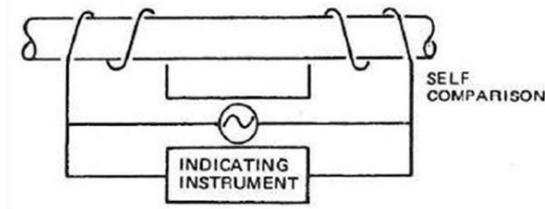
Gambar 2.8 Ilustrasi Kumbaran Ganda dengan Susunan Absolut (Putra, 2015)

2.1.1.8.2.2. *Differential Coil*

Differential coils merupakan dua kumparan atau lebih yang dihubungkan dengan sedemikian rupa sehingga apabila terjadi perbedaan elektromagnetik pada daerah di bawah kumparan akan menyebabkan munculnya sinyal ketidakseimbangan di antara kedua kumparan tersebut. *Differential coil* terdiri atas dua buah kumparan atau lebih yang dihubungkan secara kelistrikan untuk melawan satu sama lainnya (Workman & Moore, 2012). Dapat dikatakan bahwa susunan ini lebih sensitif terhadap perubahan impedansi yang kecil. *Differential coil* terbagi menjadi dua jenis yaitu *self-comparison differential coil* dan *external reference differential coil*.

2.1.1.8.2.2.1. *Self-comparison Differential Coil*

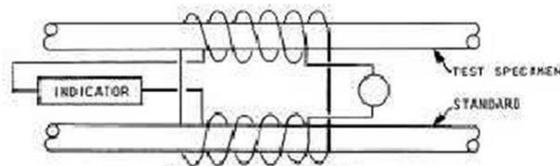
Self-comparison differential coil tersusun atas dua kumparan yang dihubungkan secara elektrik dan arah gulungannya berlawanan satu sama lain. Hal ini menyebabkan sinyal yang ditimbulkan saling menghilangkan satu sama lain apabila kondisi benda uji yang berada di bawah kedua kumparan tidak terdapat perbedaan. Dapat dikatakan bahwa kumparan jenis ini kedua kumparannya melakukan perbandingan pada daerah yang berbeda dalam satu benda uji itu sendiri (Sadek, 2006). Susunan *self-comparison* tidak sensitif terhadap variable benda uji yang terjadi berangsur-angsur. Variabel-variabel seperti perubahan ketebalan, diameter atau konduktivitas yang terjadi berangsur-angsur sulit dideteksi menggunakan kumparan *self-comparison*. Saat menggunakan kumparan diferensial *self-comparison*, diasumsikan bahwa Panjang diskontinuitas tidak akan melebihi kedua daerah kumparan. Jika diskontinuitas melebihi kedua daerah tersebut, perbedaan tidak akan dihasilkan atau ditampilkan melalui indikasi. Sinyal luaran akan dihasilkan hanya apabila ada kondisi yang berbeda terhadap salah satu kumparan pengujian (Putra, 2015). Ilustrasi *self-comparison differential coil* ditunjukkan oleh Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Ilustrasi *Self-Comparison Differential Coil*
(Integrated Publishing, Inc., n.d.)

2.1.1.8.2.2. *External Reference Differential Coil*

External reference differential coil sama persis seperti teknik *self-comparison* kecuali bahwa susunan kumparan diferensial ini melakukan perbandingan terhadap benda lain dengan benda yang diuji atau biasa disebut dengan *reference standard*. Referensi pengujian harus dipilih secara hati-hati dan bersih dari diskontinuitas (Sadek, 2006). Ilustrasi *external reference differential coil* ditunjukkan oleh Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Ilustrasi *External Reference Differential Coil*
(Integrated Publishing, Inc., n.d.)

2.1.1.8.2.3. *Hybrid Coil*

Hybrid coil terdiri dari dua kumparan yang diletakkan secara berlawanan dengan tepat satu sama lain pada sebuah benda uji. Susunan ini dipakai saat menggunakan teknik *through transmission*. Teknik ini menginduksikan arus *eddy* ke benda uji dengan kumparan pemancar pada salah satu sisi benda uji dan kumparan penerima pada sisi benda uji sebaliknya (arah berlawanan). Hanya material tipis yang dapat diperiksa menggunakan *hybrid coil* (Sadek, 2006). *Hybrid coil* bias memiliki ukuran yang sama atau berbeda dan tidak perlu berdekatan satu sama lainnya. Jenis kumparan hibrid yang umum adalah *driver/pick-up*, *through-transmission* atau gabungan kumparan utama-sekunder (Putra, 2015).

2.1.1.9. Kalibrasi pada Pengujian

Kalibrasi pada pada pengujian *eddy current* dapat dilakukan menurut *code The American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, yaitu *Boiler and Pressure Vessel Code*.

Frekuensi *probe* dan pengaturan *gain* harus dipilih untuk memberikan besaran sudut fase yang sesuai saat menyediakan penembusan yang mencukupi untuk memastikan bahwa indikasi cacat di bawah permukaan terdeteksi. Tampilan *gain* baik pada sumbu vertikal maupun horizontal harus diatur agar memberikan respons sinyal yang sama. Instrumen pengujian *eddy current* harus disesuaikan untuk memutar sudut fase agar respons sinyal *lift-off* berada pada posisi 270 derajat terhadap bidang horizontal. Arah *scanning* harus tegak lurus terhadap panjang diskontinuitas (The American Society of Mechanical Engineers, 2015).

2.1.1.10. Menyeimbangkan Instrumen Pengujian

Menyeimbangkan (*balancing*) instrumen dapat dilakukan dengan menempatkan *probe* di permukaan yang tidak terdapat diskontinuitas. Kecepatan *scanning* harus disesuaikan agar terbentuk tampilan yang dapat digunakan untuk evaluasi. *Persistence* (salah satu fungsi alat untuk mengatur lama tampilan) dari layar harus disesuaikan agar perbandingan dari masing-masing respons sinyal diskontinuitas terlihat jelas. Layar harus selalu dibersihkan untuk mencegah tampilan menjadi terlalu penuh. Tampilan harus diseimbangkan tepat sebelum membuat pengaturan awal dan akhir dari sudut fase dan amplitudo. Respons dari amplitudo dan sudut fase yang dihasilkan dari *scanning* semua diskontinuitas baik yang berada pada permukaan maupun di bawah permukaan harus dicatat (The American Society of Mechanical Engineers, 2015).

2.1.1.11. Pemilihan Sistem Frekuensi

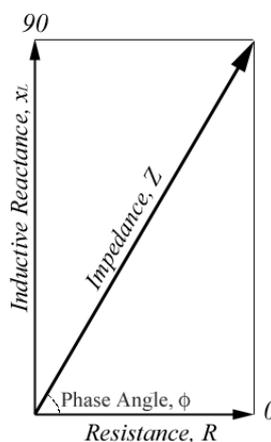
Kedalaman penembusan arus *eddy* pada sebuah material sangat dipengaruhi oleh frekuensi pengujian, permeabilitas, dan konduktivitas. Frekuensi yang lebih tinggi biasanya membatasi arus *eddy* hanya berada pada permukaan material yang paling dekat dengan kumparan pengujian utama (*probe*). Frekuensi yang lebih rendah memungkinkan arus *eddy* untuk melakukan penembusan yang lebih dalam. Penggunaan frekuensi tinggi biasanya untuk mendeteksi retak kecil pada permukaan. Frekuensi menengah sangat berguna untuk melakukan pengukuran konduktivitas sedangkan frekuensi rendah biasanya dibutuhkan untuk memeriksa material yang tebal (Sadek, 2006).

Dalam memilih frekuensi, terdapat dua sistem yang umum digunakan yaitu *single frequency systems* dan *multiple frequency systems*. *Single frequency systems* ini berhubungan dengan sistem kumparan yang dialiri oleh satu macam frekuensi. Dengan mengatur frekuensi, seorang teknisi dapat lebih responsif terhadap variabel benda uji. Sistem ini dipakai dalam

pemeriksaan *surface weld*. Sedangkan untuk *multiple frequency systems* menggunakan lebih dari satu frekuensi dinamakan sistem multifrekuensi atau multiparameter. Kumaran pengujian dialiri dengan tiga frekuensi atau lebih secara serentak. Meskipun beberapa frekuensi dapat diberikan pada kumaran pengujian secara serentak atau berurutan, masing-masing frekuensi individu mengikuti aturan yang ditetapkan untuk *single frequency system*. Sinyal yang dihasilkan oleh berbagai frekuensi sering digabungkan atau dicampur di dalam rangkaian elektronik dimana sinyalnya ditambahkan atau dikurangkan secara aljabar untuk memperoleh hasil yang diinginkan (Cox, 1997).

2.1.1.12. Sistem Analisis Fase

Karena perubahan impedansi diikuti oleh pergeseran fase, maka dimungkinkan untuk mengamati pergeseran fase daripada mengamati perubahan impedansi dalam menentukan kondisi yang terjadi pada material (Sadek, 2006). Impedansi merupakan hasil dari hambatan dan reaktansi, dimana saling tegak lurus satu sama lain sehingga perubahan impedansi dapat digambarkan pada sebuah grafik untuk berbagai kondisi pengujian. Penggambaran tersebut dikenal dengan diagram bidang impedansi (*impedance-plane diagram*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Diagram tersebut merupakan diagram dua dimensi yang menampilkan amplitudo dan sudut fase dari sebuah respons pengujian (Hagemaiier, 2002).



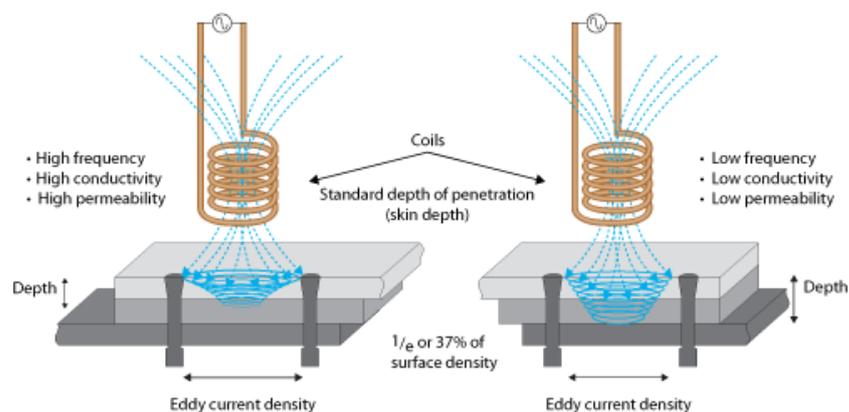
Gambar 2.11 Diagram Bidang Impedansi
(NDT Resource Center, 2014)

2.1.1.13. Kedalaman Penembusan

Saat dilakukan pengujian *eddy current*, kedalaman penembusan sangat dipengaruhi oleh frekuensi yang digunakan, konduktivitas listrik, dan permeabilitas magnetik dari

spesimen tersebut. Fenomena yang terjadi adalah arus *eddy* tidak terdistribusi secara merata pada material uji. Arus-arus *eddy* yang terbentuk cenderung rapat pada permukaan material uji yang paling dekat dengan kumparan (*probe*). Sebaliknya, arus-arus *eddy* menjadi semakin berkurang kerapatannya seiring dengan bertambahnya jarak di bawah permukaan dari material uji tersebut. Pada beberapa jarak di bawah permukaan pada suatu material yang tebal, tidak terdapat arus *eddy* yang mengalir (Sadek, 2006).

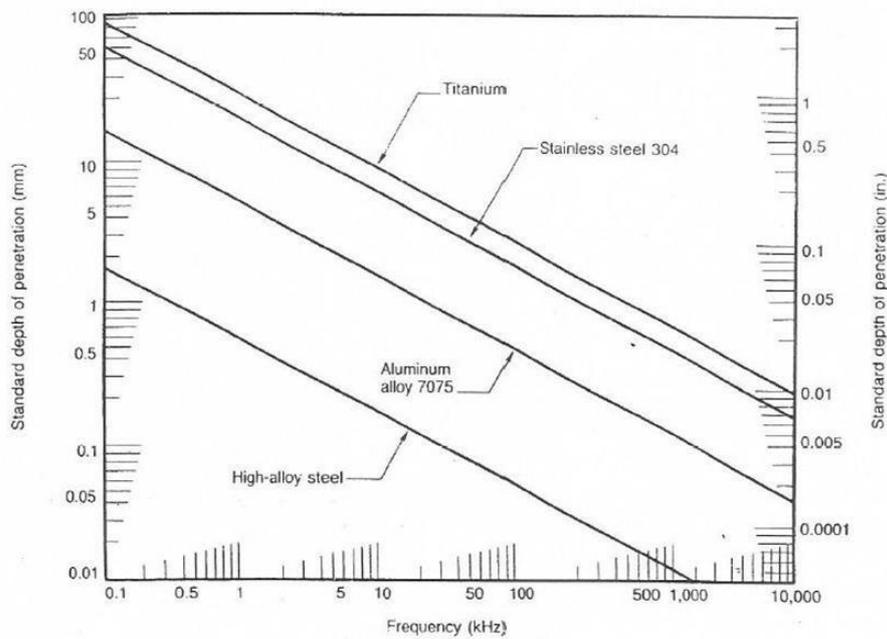
Masuk akal jika berharap bahwa kedalaman penetrasi akan bervariasi untuk material-material yang berbeda. Kedalaman penetrasi juga dipengaruhi oleh konduktivitas dan permeabilitas magnetik dalam kasus material feromagnetik. Kedalaman penetrasi terhadap material yang memiliki konduktivitas dan permeabilitas magnetik tinggi akan lebih kecil jika dibandingkan dengan material yang memiliki konduktivitas dan permeabilitas magnetik yang rendah (Mix, 2005). Pengaruh frekuensi, konduktivitas listrik, dan permeabilitas magnetik terhadap kedalaman penetrasi diilustrasikan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Pengaruh Frekuensi, Konduktivitas Listrik, dan Permeabilitas Magnetik terhadap Kedalaman Penembusan (Olympus Inspection Solutions, n.d.)

2.1.1.14. Kedalaman Penembusan Standard

Kedalaman penetrasi standard didefinisikan sebagai kedalaman dimana kerapatan arus *eddy* kurang lebih 37% kerapatannya di permukaan. Gambar 2.13 memperlihatkan kedalaman penetrasi dari beberapa material pada frekuensi yang berbeda. Pengaruh konduktivitas dan permeabilitas terhadap kedalaman penetrasi juga ditunjukkan oleh Gambar 2.13 dimana kedalaman penetrasi aluminium lebih kecil daripada kedalaman penetrasi titanium pada sembarang frekuensi sebagai akibat dari sifat aluminium yang merupakan penghantar listrik yang lebih baik daripada titanium (Putra, 2015).



Gambar 2.13 Hubungan antara Kedalaman Penembusan Standard dengan Frekuensi terhadap Berbagai Jenis Material (Hagamaier, 2002)

Jika kedalaman penembusan standard melebihi ketebalan material yang diuji, pembatasan lintasan arus *eddy* diperlihatkan sebagai perubahan konduktivitas dari material tersebut. Respons dari kumparan selanjutnya menunjukkan ketebalan material. Arus *eddy* tidak hilang begitu saja saat melebihi kedalaman standard. Umumnya material harus memiliki ketebalan dua atau tiga kali kedalaman penembusan standard sebelum arus *eddy* berangsur-angsur menghilang. Perlu diingat bahwa arus *eddy* tidak hilang begitu saja saat melebihi kedalaman standard. Umumnya material harus memiliki ketebalan dua atau tiga kali kedalaman penembusan standard sebelum arus *eddy* berangsur-angsur menghilang (Putra, 2015).

Hubungan kedalaman penembusan, resistivitas, frekuensi, dan permeabilitas dinyatakan sebagai:

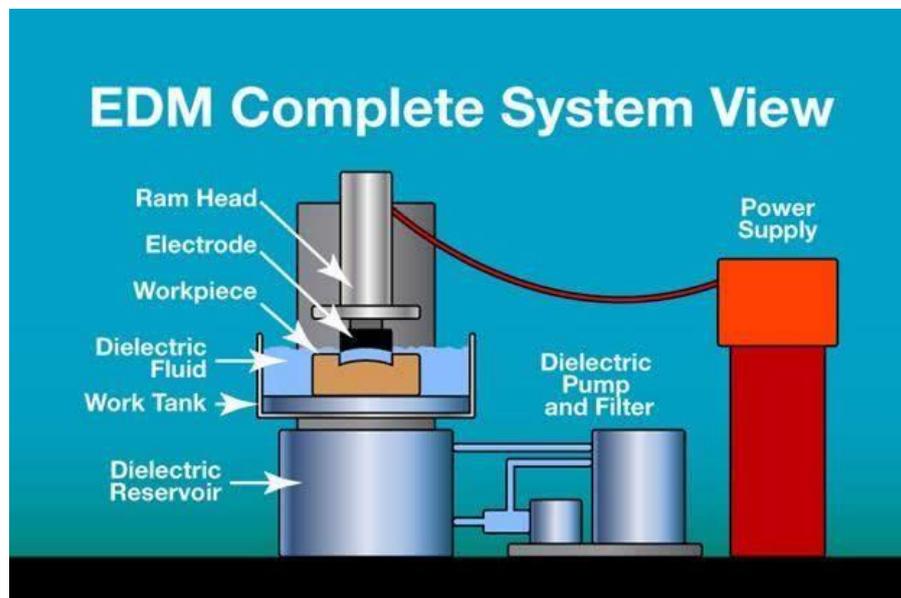
$$\delta = K \sqrt{\frac{\rho}{f \mu_{rel}}} \quad (2.1)$$

dengan kedalaman penembusan standard δ , nilai K adalah 50 untuk satuan mm atau 1.98 untuk satuan inci, resistivitas ρ dalam $\mu\Omega \cdot \text{cm}$, frekuensi f dalam Hertz dan nilai 1 untuk μ_{rel} pada material selain feromagnetik. μ_{rel} sendiri adalah permeabilitas relatif (Putra, 2015).

Karena dalam Tugas Akhir ini menggunakan material tembaga, maka nilai resistivitas tembaga adalah $1.72 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (The American Society for Nondestructive Testing, 2004).

2.1.2. *Electrical Discharge Machining*

Electrical Discharge Machining (EDM) memiliki nama lain seperti *spark machining*, *spark eroding*, *burning*, *die sinking* atau *wire erosion*, adalah sebuah alat yang memungkinkan proses manufaktur untuk menghasilkan bentuk yang diinginkan pada suatu material dan didapat dengan menggunakan *electrical discharges*. Salah satu kegunaan EDM adalah dapat membuat retak pada permukaan (Grote & Antonsson, 2009). EDM disebut *spark machining* karena metode ini memotong atau mengerosi logam dengan menghasilkan aliran listrik berulang antara elektroda dengan bagian logam yang sedang dikerjakan. Munculnya EDM tidak dapat dilepaskan dari munculnya teknik *spark erosion* oleh ilmuwan Inggris Joseph Priestly sekitar tahun 1770an, namun baru pada tahun 1943 teknik tersebut dikembangkan untuk keperluan permesinan oleh ilmuwan Rusia. Selanjutnya komersialisasi EDM terjadi pada tahun 1970 sampai 1980an. Saat ini EDM digunakan untuk memotong atau mengerosi material keras dan logam dengan tingkat presisi pemotongan yang tinggi. Proses EDM ini merupakan proses panas yang melibatkan pencairan dan penguapan benda kerja (Himpunan Mahasiswa Teknik Pengelasan PPNS, 2015). Ilustrasi bagian-bagian sistem dasar EDM ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Ilustrasi Sistem Dasar EDM
(Poco Graphite, 2003)

2.1.2.1. Cara Kerja *Electrical Discharge Machining*

Proses EDM menggunakan aliran bermuatan listrik untuk memotong atau mengerosi material dari material induknya, dengan tiap lompatan listrik (*spark*) menghasilkan temperatur antara 10.000 hingga 20.000 °C. Akibatnya, benda kerja akan mendapat panas di bawah lapisan pembekuan hasil pemotongan EDM. Dapat dikatakan bahwa proses EDM mengubah permukaan dan sub-permukaan benda kerja. Untuk menghasilkan aliran listrik yang dapat memotong atau mengerosi benda kerja diperlukan hubungan antara dua material yang sama-sama dapat dialiri listrik. Pertama adalah elektroda yang terhubung dengan polaritas negatif; kemudian benda kerja yang dihubungkan dengan polaritas positif. Adanya perbedaan polaritas ini menyebabkan terjadinya aliran muatan listrik yang terlihat sebagai *spark*. Maka, material yang akan diproses EDM harus material yang bersifat konduktif listrik (Himpunan Mahasiswa Teknik Pengelasan PPNS, 2015).

2.1.2.2. Cairan Dielektrik dan Elektroda

Pada proses EDM, salah satu variabel yang berperan adalah cairan dielektrik. Cairan dielektrik memiliki tiga fungsi, yaitu sebagai insulator antara alat dan benda kerja, lalu cairan dielektrik bekerja sebagai pendingin serta sebagai media pembilas untuk menghilangkan serpihan. Cairan dielektrik biasanya berbahan dasar hidrokarbon, namun cairan jenis lain seperti trietilen glikol dan tetraetilen glikol juga digunakan untuk meningkatkan kecepatan kerja. Elektroda yang digunakan pada EDM terbuat dari grafit dan tembaga, namun material lainnya dapat digunakan (Grote & Antonsson, 2009).

2.1.3. Bahan *Propeller*

Bahan *propeller* yang dibuat hari ini secara luas dapat diklasifikasikan sebagai anggota *bronze* atau *stainless steel*. Bahan-bahan dengan sifat mekanik dan tahan kavitasi yang lebih baik lebih sering digunakan. Selain kelompok *broze* dan *stainless steel*, bahan-bahan yang umum digunakan untuk membuat semua jenis *propeller* mulai dari kapal komersial besar hingga kapal perang yaitu besi cor (*cast iron*), baja tuang (*cast steel*), aluminium duralumin, polimer dan serat karbon. Pada pertengahan hingga akhir 1980-an, *bronze* nikel-aluminium lebih mendominasi daripada bahan-bahan lainnya, terhitung sekitar 82 persen dari baling-baling yang dikelaskan oleh Lloyd's Register selama periode itu. Tren ini terus berlanjut hingga saat ini (Carlton, 2007).

2.1.3.1. Kriteria Bahan *Propeller*

Sifat yang diperlukan dalam bahan baling-baling akan tergantung pada tugas dan kondisi layanan kapal tempat baling-baling dipasang. Namun, beberapa sifat yang harus dimiliki adalah ketahanan lelah korosi yang tinggi di air laut, daya tahan tinggi terhadap erosi kavitasi, rasio *strength to weight* yang tinggi, daya tahan yang baik terhadap korosi umum, resistensi tinggi terhadap serangan tumbukan dan celah serta karakteristik perbaikan yang baik termasuk kemampuan las dan bebas dari keretakan selanjutnya (Carlton, 2007).

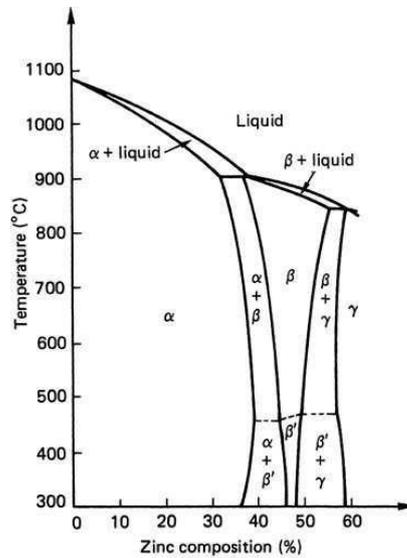
2.1.3.2. Tembaga dan Paduannya sebagai Bahan *Propeller*

Tembaga murni dengan struktur *face-centred-cubic*, memiliki ketahanan korosi yang baik dan merupakan bahan yang ulet yang memiliki *elongation* sekitar 60 persen dalam kondisi lunaknya bersama dengan kekuatan tarik 215 N/mm². Dengan demikian, ketika dipertimbangkan dalam hal sifat kekuatannya, tembaga adalah bahan yang relatif lemah dalam bentuk murni. Dengan menggabungkan tembaga dengan sejumlah material lain untuk membentuk paduan berbasis tembaga, sifat-sifat material yang dihasilkan dapat dirancang untuk menghasilkan perpaduan yang tepat dari sifat *ductile* yang tinggi, ketahanan korosi yang baik ditambah dengan kekuatan dan karakteristik kekakuan yang wajar (Carlton, 2007).

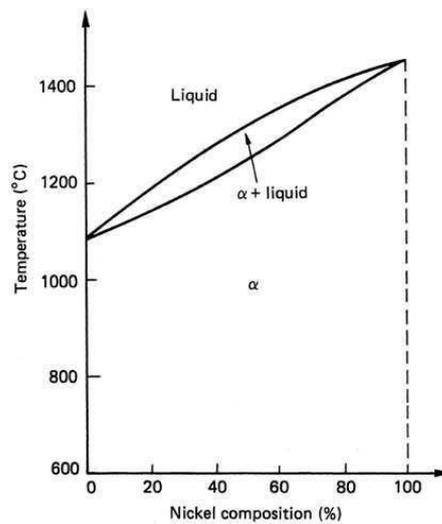
Salah satu paduan tersebut adalah paduan tembaga – seng yang mengandung hingga sekitar 45 persen seng, sering dikaitkan dengan sejumlah kecil unsur lainnya. Paduan tembaga – seng seperti itu, dimana seng memiliki struktur *close-packed hexagonal*, secara umum dikenal sebagai kuningan. Campuran tersebut membentuk kombinasi sifat material yaitu kekuatan dan ketahanan korosi yang tinggi. Diagram fase paduan tembaga-seng ditunjukkan pada Gambar 2.15. Dalam fase α mereka, yang mengandung hingga sekitar 37 persen seng, kuningan-kuningan tersebut memiliki keuletan tinggi yang mencapai maksimum untuk komposisi seng 30 persen. Jika kadar seng yang lebih tinggi digunakan, di wilayah 40 hingga 45 persen, maka struktur yang dihasilkan berbentuk dupleks. Dalam fase β' , yang menunjukkan struktur yang teratur, bahan tersebut ditemukan keras dan *brittle* yang berbeda dengan fase β yang karakteristiknya sangat lunak (Carlton, 2007). Dari Gambar 2.15 dapat dilihat bahwa ketika kuningan yang memiliki komposisi seng 40 persen dipanaskan hingga sekitar 850°C, paduannya menjadi sepenuhnya berfase β .

Komposisi paduan penting kedua adalah paduan tembaga – nikel yang diagram fasenya ditunjukkan pada Gambar 2.16. Nikel, seperti tembaga adalah elemen strukturnya

face-centered-cubic, memiliki dimensi atom dan sifat kimia yang mirip dengan tembaga, sehingga kedua elemen ini membentuk sebuah *substitutional solid solution* bila dikombinasikan dalam semua proporsi. Sifat bahan yang dihasilkan adalah *ductile*, cukup kuat dan memiliki ketahanan korosi yang baik (Carlton, 2007).



Gambar 2.15 Diagram Fase Paduan Tembaga – Seng (Carlton, 2007)



Gambar 2.16 Diagram Fase Paduan Tembaga – Nikel (Carlton, 2007)

2.1.3.3. Pembuatan *Propeller*

Mayoritas baling-baling dibuat dengan *casting*; Namun, logam cor tidak homogen seluruhnya dan semakin besar *casting* maka semakin banyak perbedaan antara berbagai

bagian *casting*. Perbedaan sifat disebabkan oleh perbedaan dalam tingkat pendinginan di berbagai bagian *casting*; dengan anggapan bahwa logam cair pada awalnya bersuhu dan komposisi yang sama. Tingkat pendinginan logam pada ujung *blade*, yang mungkin tebalnya 15 mm, akan jauh lebih cepat daripada di *boss* yang mungkin tebalnya 1000 mm untuk baling-baling yang sama (Carlton, 2007).

2.2. Tinjauan Pustaka

Pada pengujian yang dilakukan oleh Mufti dan Hendroprasetyo (2016) tentang pengaruh variasi panjang dan kedalaman retak terhadap kemampuan *scanning* indikasi retak, telah didapatkan hasil rekapitulasi perbandingan antara tinggi indikasi *lift-off* masing-masing kedalaman retak terhadap empat spesimen yang disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tinggi Rata-rata Indikasi Retak dari Garis *Lift-off*
(Mufti & Putra, 2016)

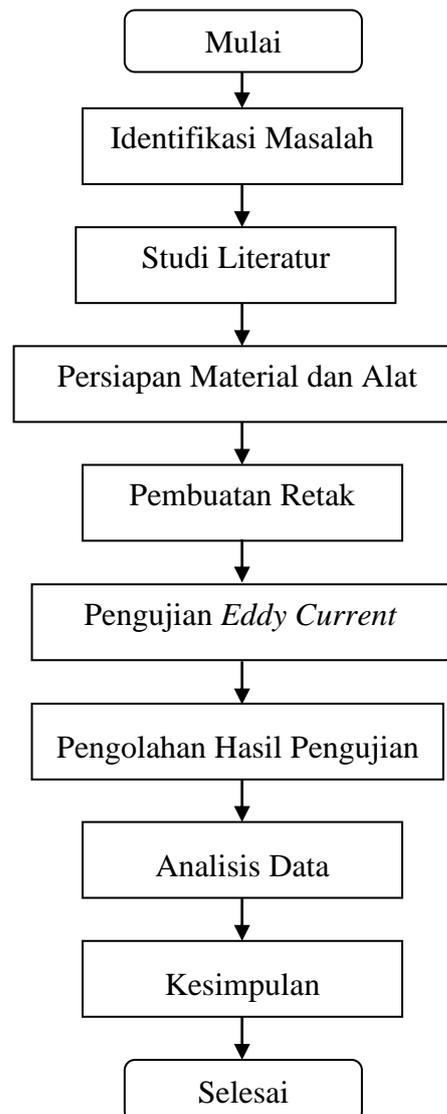
Kedalaman Retak [mm]	Tinggi Rata-rata Indikasi Retak dari Garis <i>Lift-off</i> [mm]
1,0	20,0
2,0	26,5
3,0	32,0

Dari keseluruhan data yang ditampilkan pada Tabel 2.1 di atas dapat dilihat bahwa ketika *probe* melewati retak pada keempat spesimen uji dengan kedalaman 1 mm akan menghasilkan tinggi indikasi retak dari garis *lift-off* yang terkecil. Kemudian tinggi indikasi retak akan membesar pada retak dengan kedalaman 2 mm dan tinggi indikasi retak dari garis *lift-off* yang terbesar dihasilkan pada retak dengan kedalaman 3 mm. Kesimpulan yang didapat melalui pengujian yang dilakukan oleh Mufti dan Hendroprasetyo (2016), metode *Eddy Current Testing* (ECT) memiliki tingkat sensitivitas yang baik dalam mendeteksi panjang dan kedalaman retak sambungan las di permukaan material. Semakin dalam suatu retak pada material maka tinggi indikasi retak dari garis *lift-off* akan semakin besar (Mufti & Putra, 2016).

BAB 3 METODOLOGI

3.1. Bagan Alir

Tahapan-tahapan pengerjaan Tugas Akhir digambarkan oleh bagan alir sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Tugas Akhir ini dilaksanakan dengan diawali dari tahapan identifikasi masalah yang mencakup penetapan tujuan penelitian dan melakukan perumusan dan pembatasan masalah dari apa yang akan dikerjakan pada Tugas Akhir serta diakhiri pada tahapan penarikan kesimpulan. Tahapan-tahapan tersebut saling berkesinambungan satu sama lain dan memiliki peranan penting dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.



Gambar 3.1 Bagan Alir

3.2. Alur Pengerjaan

Alur pengerjaan Tugas Akhir ini diklasifikasikan menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah alur pengerjaan Tugas Akhir yang menjelaskan tentang langkah-langkah pengerjaan Tugas Akhir. Bagian kedua adalah alur eksperimen yang menjelaskan tentang langkah-langkah pengerjaan eksperimen terhadap material.

3.2.1. Alur Pengerjaan Tugas Akhir

Langkah-langkah yang dilakukan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut, diawali dari identifikasi masalah yang mencakup penetapan tujuan penelitian dan melakukan perumusan dan pembatasan masalah dari apa yang akan dikerjakan pada Tugas Akhir serta diakhiri pada tahapan penarikan kesimpulan.

a. Identifikasi Masalah

Tahap ini merupakan tahap awal dari pengerjaan Tugas Akhir, yaitu dengan menetapkan tujuan penelitian serta melakukan perumusan dan pembatasan masalah dari apa yang akan dikerjakan pada Tugas Akhir.

b. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pembelajaran dan pengumpulan teori-teori maupun kajian pustaka yang berkaitan dengan *Eddy Current Testing* (ECT), *Electrical Discharge Machine* (EDM) dan material tembaga sebagai bahan pembuatan *propeller*, meliputi dan definisi-definisi beserta prinsip-prinsip dasarnya, hal-hal yang dapat mempengaruhi proses, kelebihan dan kekurangan, dan lain-lain.

c. Persiapan Material dan Alat

Material yang akan digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah material paduan tembaga. Sedangkan alat yang perlu disiapkan yaitu untuk pengolahan material yaitu sarung tangan, kacamata, spidol, penggaris, gerinda dan *flap disc*.

d. Pembuatan Retak

Pembuatan retak pada semua *test piece* dilakukan menggunakan *Electrical Discharge Machine* (EDM) yang membutuhkan seperangkat mesin EDM dan elektrodanya berupa lembaran tembaga dengan variasi ukuran yang telah ditentukan seperti variasi panjang retak dan kedalaman retak.

e. Pengujian *Eddy Current*

Setelah *test piece* telah diberikan retak buatan, material siap diuji *eddy current* dengan menggunakan tiga variasi *probe*, dengan tiga variasi frekuensi yaitu 30 kHz, 500 kHz dan

650 kHz. Untuk melakukan pengujian juga dibutuhkan blok kalibrasi serta *eddy current monitor*.

f. Pengolahan Hasil Pengujian dan Analisis Data

Dari hasil uji *eddy current*, dicatat hasil sensitivitas yang dibaca melalui monitor untuk semua *test piece* yang diuji. Setelah itu, hasil uji dianalisis dengan membandingkan sensitivitas di tiap-tiap variasi ukuran retak pada *test piece*.

g. Kesimpulan

Setelah hasil pengujian *eddy current* dilakukan analisis, dapat ditarik kesimpulan apakah sesuai dengan hipotesis atau tidak.

3.2.2. Alur Eksperimen

Langkah-langkah yang harus dilakukan dalam melaksanakan eksperimen adalah sebagai berikut, agar hasil eksperimen sesuai dengan tujuan Tugas Akhir.

- a. *Test piece* disiapkan sejumlah 8 buah pelat paduan tembaga dengan dimensi 150 mm x 25 mm x 10 mm;
- b. Masing-masing *test piece* dilakukan penghalusan dengan menggunakan gerinda pada tiap permukaan *test piece*;
- c. Pemberian identitas pada masing-masing *test piece* dengan tujuan untuk memudahkan identifikasi masing-masing *test piece*;
- d. Setiap *test piece* akan diberikan retak buatan dengan menggunakan *electrical discharge machining*;
- e. Pengujian *eddy current testing* pada semua *test piece* dengan tiga variasi frekuensi *probe* yaitu 30 kHz, 500 kHz dan 650 kHz; dan
- f. Pencatatan hasil pengujian.

3.3. Proses Pengerjaan

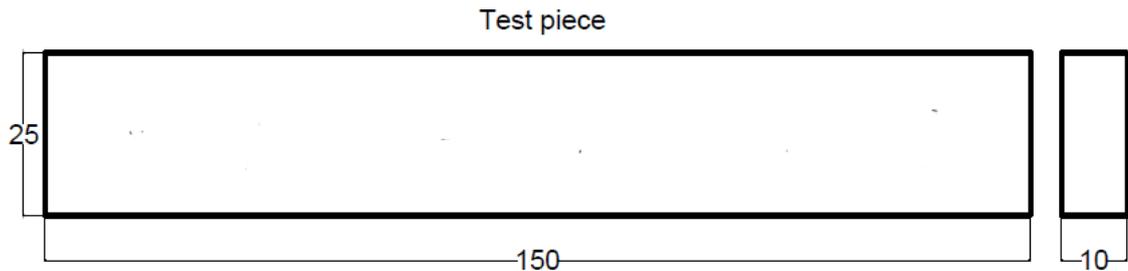
Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini terdapat beberapa proses atau tahapan yang perlu diikuti sehingga bisa tercapai tujuan awal dari pengerjaan Tugas Akhir ini, diawali dari persiapan material dan peralatan serta berakhir pada pencatatan hasil pengujian.

3.3.1. Persiapan Material dan Peralatan

Pada tahapan ini, dilakukan pengadaan material dan peralatan yang digunakan untuk pengerjaan Tugas Akhir. Persiapan material dan peralatan merupakan hal yang utama untuk disiapkan sebaik mungkin pada penelitian ini.

3.3.1.1. Persiapan Material

Material yang dipersiapkan adalah pelat tembaga sebanyak delapan lembar dengan masing-masing ukuran panjang 150 mm, lebar 25 mm dan tebal 10 mm. Saat pembelian, material tersebut masih berupa batangan panjang yang harus dipotong sesuai dengan ukuran yang direncanakan. Pemotongan dilakukan menggunakan gerinda jenis *cutting wheel*. Setelah dipotong sesuai ukuran, material dilakukan penghalusan. Gambaran dimensi *test piece* yang dibutuhkan ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Ilustrasi *Test Piece*

3.3.1.2. Persiapan Peralatan

Persiapan peralatan merupakan hal yang utama untuk disiapkan sebaik mungkin pada penelitian ini. Peralatan-peralatan yang dibutuhkan secara umum dikelompokkan menjadi tiga bagian. Bagian pertama yaitu peralatan pengolahan material hingga menjadi *test piece*. Bagian kedua yaitu peralatan *electrical discharge machining* untuk membuat retak buatan. Bagian terakhir adalah peralatan pengujian *eddy current*.

3.3.1.2.1. Peralatan Pengolahan Material

Dalam mengolah material menjadi *test piece*, dibutuhkan beberapa peralatan pemotong, penanda (*marking*) dan alat pelindung diri dalam rangka meminimalkan risiko yang dapat terjadi saat proses pemotongan dan pengolahan material. Peralatan-peralatan yang digunakan dalam pengolahan material menjadi *test piece* dan penghalusan *test piece* sebagai berikut.

- a. Sarung tangan;
- b. Kacamata;
- c. Spidol;
- d. Penggaris;
- e. Gerinda;
- f. *Flap disc*.

Flap disc merupakan kertas gosok yang disusun sedemikian rupa membentuk lingkaran sehingga dapat digunakan sebagai mata mesin gerinda. Tingkat kekasaran permukaan *flap disc* ditentukan oleh angka yang tertera pada kertas di balik *flap disc*. Semakin besar angkanya maka kemampuan *flap disc* makin besar untuk membuat permukaan benda makin halus. *Flap disc* yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Flap Disc*

Pada saat dilakukan pengandaan material, permukaan material dalam keadaan kasar. Maka dari itu, perlu dilakukan penghalusan supaya permukaan *test piece* lebih mengkilap. Kondisi *test piece* sebelum dan sesudah dilakukan penghalusan ditunjukkan oleh Gambar 3.4. Pada proses penghalusan material perlu menggunakan alat pelindung diri berupa kacamata dan sarung tangan. Dokumentasi kegiatan penghalusan *test piece* ditunjukkan oleh Gambar 3.5.



Gambar 3.4 Kondisi *Test Piece* Sebelum dan Sesudah Penghalusan



Gambar 3.5 Kegiatan Penghalusan *Test Piece*

3.3.1.2.2. Peralatan Pembuatan Retak

Peralatan utama yang digunakan dalam pembuatan retak adalah seperangkat mesin *electrical discharge machining* dan elektrodanya berupa lembaran tembaga yang ukuran lebarnya disesuaikan dengan panjang retak yang akan dibuat. Elektroda digunakan untuk guna merusak material. Alat *electrical discharge machining* akan otomatis bekerja sesuai perintah dari *controller*. Beberapa indikator yang dapat diatur adalah posisi *tool electrical discharge machining* terhadap material yang akan dirusak dan kedalaman retak. Mesin akan otomatis berhenti bekerja ketika indikator berupa kedalaman retak telah tercapai. Jika akan dibuat retak pada posisi lainnya, cukup dengan menggerakkan *tool electrical discharge machining* melalui *controller* dari satu posisi ke posisi berikutnya.

3.3.1.2.3. Peralatan Pengujian *Eddy Current*

Peralatan pengujian merupakan hal yang utama untuk disiapkan sebaik mungkin pada pengerjaan Tugas Akhir ini. Pengujian *eddy current* dilakukan setelah *test piece* selesai dilakukan pembuatan retak dengan *electrical discharge machining*. Adapun peralatan yang digunakan untuk pengujian *eddy current* sebagai berikut.

- a. Blok kalibrasi;
- b. *Probe*; dan
- c. Mesin *eddy current testing*.

Blok kalibrasi dibuat dengan material yang sama dengan *test piece*, yaitu tembaga. Blok kalibrasi memiliki ukuran 125 mm x 25 mm x 10 mm. Retak pada blok kalibrasi dibuat selebar blok dengan kedalaman 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm dan 2.0 mm.

Probe yang digunakan berasal dari *manufacturer* “Ether NDE”, dengan frekuensi 30 kHz, 500 kHz dan 650 kHz. Ketiga *probe* tersebut berjenis *right angle probe* dan memiliki jenis kumparan (*coil*) yaitu *absolute coil*. Untuk *probe* dengan frekuensi 30 kHz memiliki *serial number* 500174/06. *Probe* dengan frekuensi 500 kHz memiliki *serial number* 01303/02 sedangkan *probe* dengan frekuensi 650 kHz memiliki *serial number* 504794/01. Antara *probe* dengan alat uji *eddy current* dihubungkan dengan sebuah kabel. Sedangkan alat uji *eddy current* berasal dari *manufacturer* “Olympus” dengan tipe Nortec 600. Alat uji *eddy current* memiliki *serial number* 60008196054.

Untuk lebih jelasnya, gambaran tentang peralatan pengujian *eddy current* berupa blok kalibrasi ditunjukkan oleh Gambar 3.6. *probe* dengan frekuensi 30 kHz ditunjukkan oleh Gambar 3.7, *probe* dengan frekuensi 500 kHz ditunjukkan oleh Gambar 3.8, *probe* dengan frekuensi 650 kHz ditunjukkan oleh Gambar 3.9 dan mesin *eddy current* testing ditunjukkan oleh Gambar 3.10.



Gambar 3.6 Blok Kalibrasi



Gambar 3.7 *Probe* dengan Frekuensi 30 kHz



Gambar 3.8 *Probe* dengan Frekuensi 500 kHz



Gambar 3.9 Probe dengan Frekuensi 650 kHz

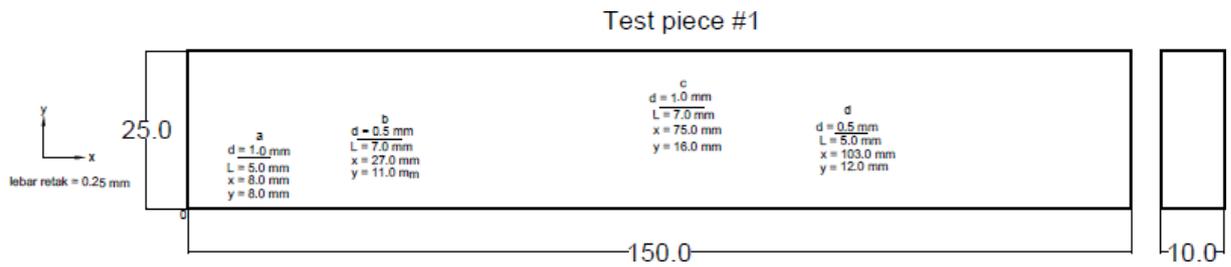


Gambar 3.10 Mesin Eddy Current Testing

3.3.2. Pembuatan Retak

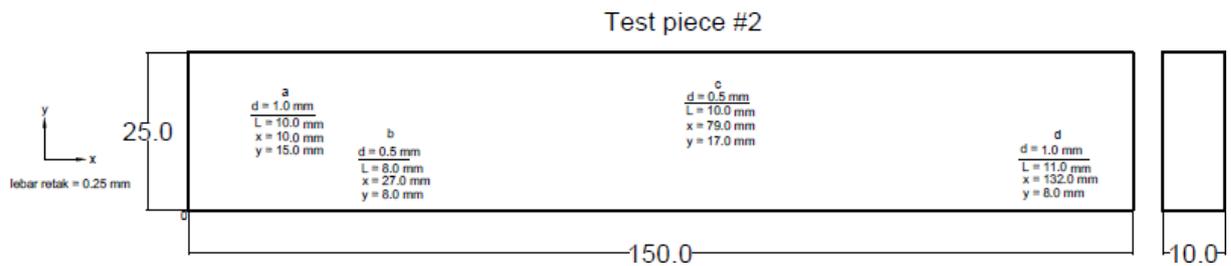
Pada setiap *test piece* akan diberikan retak buatan melalui *Electrical Discharge Machine* (EDM) dengan ukuran panjang, lebar, dan kedalaman yang bervariasi. EDM adalah sebuah proses manufaktur dimana bentuk yang diinginkan didapat dengan menggunakan *electrical discharge*. Kedalaman retak buatan diukur dari permukaan *test piece*. Untuk membuat retak tersebut, diperlukan elektroda tembaga tipis guna merusak material berupa lembaran tembaga. Ukuran panjang retaknya bervariasi antara 3 mm, 4 mm, 5 mm, 7 mm, 8 mm, 10 mm dan 11 mm. Variasi kedalaman retaknya antara 0.5 mm, 1.0 mm dan 1.5 mm. Lebar untuk semua retak buatan adalah 0.25 mm.

Terdapat delapan *test piece* yang akan diuji. Untuk memudahkan proses pengerjaan, masing-masing *test piece* diberi kode yang berbeda satu sama lainnya. Setiap *test piece* diberi kode, yaitu *test piece* #1, *test piece* #2, *test piece* #3, *test piece* #4, *test piece* #5, *test piece* #6, *test piece* #7 dan *test piece* #8. Masing-masing *test piece* memiliki empat retak yang panjangnya bervariasi dan kedalaman retak yang berbeda-beda. Ukuran dan lokasi retak ditunjukkan oleh Gambar 3.11 sampai Gambar 3.18.



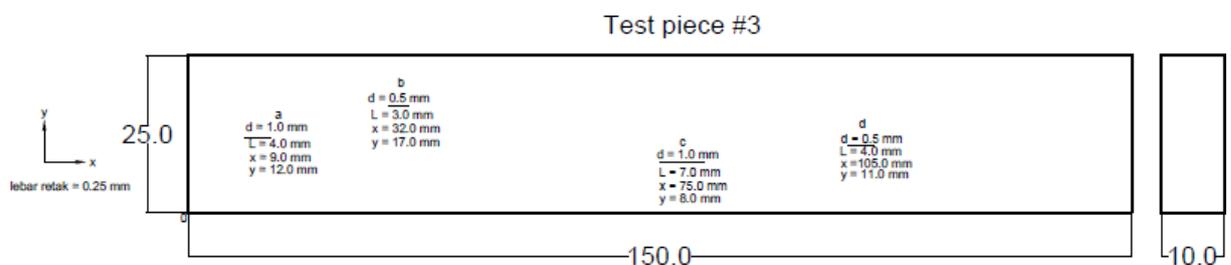
Gambar 3.11 Rancangan Lokasi Retak pada *Test Piece #1*

Pada *test piece #1*, terdapat empat buah retak buatan. Retak-retak tersebut diberi identitas a, b, c dan d. Masing-masing retak memiliki ukuran yang berbeda. Retak a memiliki panjang 5.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak b memiliki panjang 7.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm. Retak c memiliki panjang 7.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak d memiliki panjang 5.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm.



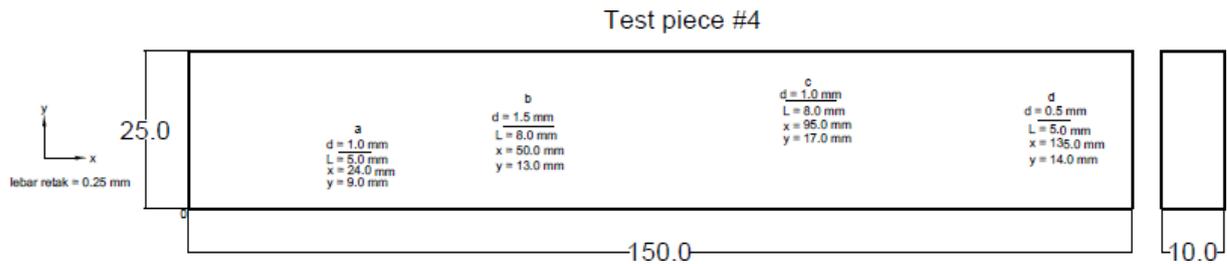
Gambar 3.12 Rancangan Lokasi Retak pada *Test Piece #2*

Pada *test piece #2*, terdapat empat buah retak buatan. Retak-retak tersebut diberi identitas a, b, c dan d. Masing-masing retak memiliki ukuran yang berbeda. Retak a memiliki panjang 10.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak b memiliki panjang 8.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm. Retak c memiliki panjang 10.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm. Retak d memiliki panjang 11.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm.



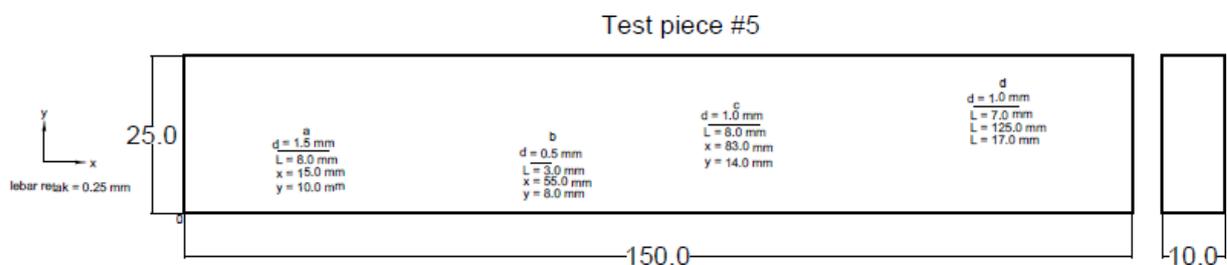
Gambar 3.13 Rancangan Lokasi Retak pada *Test Piece #3*

Pada *test piece* #3, terdapat empat buah retak buatan. Retak-retak tersebut diberi identitas a, b, c dan d. Masing-masing retak memiliki ukuran yang berbeda. Retak a memiliki panjang 4.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak b memiliki panjang 3.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm. Retak c memiliki panjang 7.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak d memiliki panjang 4.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm.



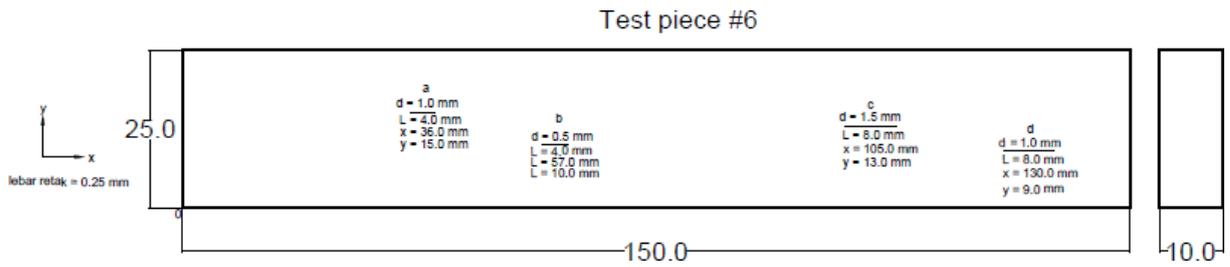
Gambar 3.14 Rancangan Lokasi Retak pada *Test Piece* #4

Pada *test piece* #4, terdapat empat buah retak buatan. Retak-retak tersebut diberi identitas a, b, c dan d. Masing-masing retak memiliki ukuran yang berbeda. Retak a memiliki panjang 5.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak b memiliki panjang 8.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.5 mm. Retak c memiliki panjang 8.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak d memiliki panjang 5.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm.



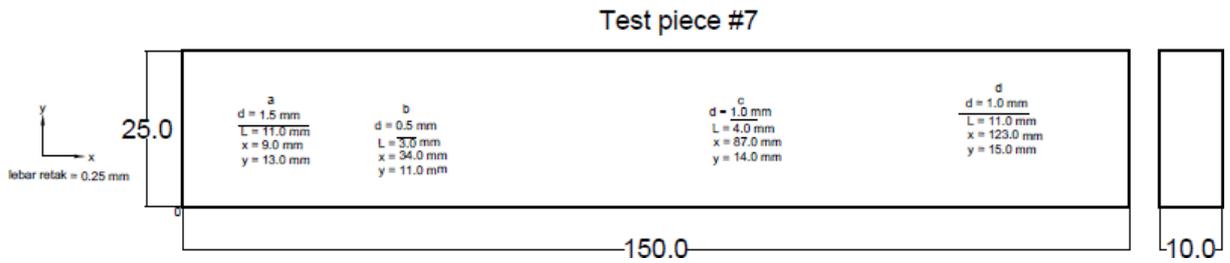
Gambar 3.15 Rancangan Lokasi Retak pada *Test Piece* #5

Pada *test piece* #5, terdapat empat buah retak buatan. Retak-retak tersebut diberi identitas a, b, c dan d. Masing-masing retak memiliki ukuran yang berbeda. Retak a memiliki panjang 8.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.5 mm. Retak b memiliki panjang 3.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm. Retak c memiliki panjang 8.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak d memiliki panjang 7.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm.



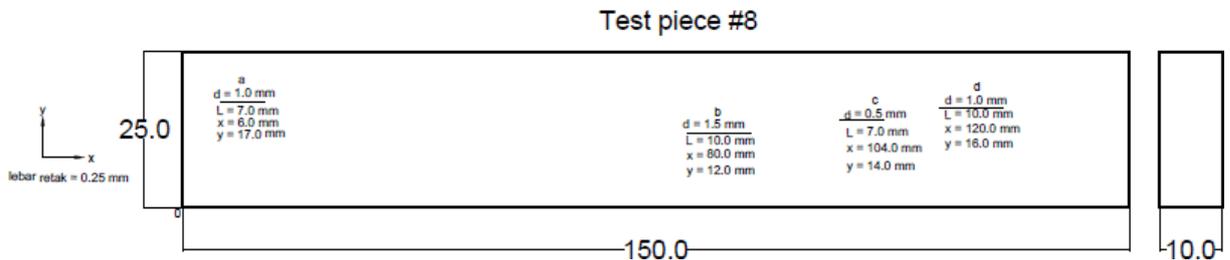
Gambar 3.16 Rancangan Lokasi Retak pada *Test Piece* #6

Pada *test piece* #6, terdapat empat buah retak buatan. Retak-retak tersebut diberi identitas a, b, c dan d. Retak a memiliki panjang 4.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak b memiliki panjang 4.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm. Retak c memiliki panjang 8.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.5 mm. Retak d memiliki panjang 8.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm.



Gambar 3.17 Rancangan Lokasi Retak pada *Test Piece* #7

Pada *test piece* #7, terdapat empat buah retak buatan. Retak-retak tersebut diberi identitas a, b, c dan d. Retak a memiliki panjang 11.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.5 mm. Retak b memiliki panjang 3.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm. Retak c memiliki panjang 4.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak d memiliki panjang 11.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm.



Gambar 3.18 Rancangan Lokasi Retak pada *Test Piece* #8

Pada *test piece* #8, terdapat empat buah retak buatan. Retak-retak tersebut diberi identitas a, b, c dan d. Retak a memiliki panjang 7.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm. Retak b memiliki panjang 10.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.5 mm. Retak c

memiliki panjang 7.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 0.5 mm. Retak d memiliki panjang 10.0 mm, lebar 0.25 mm dan kedalaman 1.0 mm.

Ringkasan ukuran-ukuran retak buatan pada *test piece* #1 hingga *test piece* #8 yang telah dijabarkan sebelumnya disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rekapitulasi Ukuran Retak Buatan

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Kedalaman Retak [mm]	Panjang Retak [mm]
1	a	1.0	5.0
	b	0.5	7.0
	c	1.0	7.0
	d	0.5	5.0
2	a	1.0	10.0
	b	0.5	8.0
	c	0.5	10.0
	d	1.0	11.0
3	a	1.0	4.0
	b	0.5	3.0
	c	1.0	7.0
	d	0.5	4.0
4	a	1.0	5.0
	b	1.5	8.0
	c	1.0	8.0
	d	0.5	5.0
5	a	1.5	8.0
	b	0.5	3.0
	c	1.0	8.0
	d	1.0	7.0
6	a	1.0	4.0
	b	0.5	4.0
	c	1.5	8.0
	d	1.0	8.0
7	a	1.5	11.0
	b	0.5	3.0
	c	1.0	4.0
	d	1.0	11.0
8	a	1.0	7.0
	b	1.5	10.0
	c	0.5	7.0
	d	1.0	10.0

Kedelapan *test piece* yang telah dihaluskan selanjutnya dilakukan proses pembuatan retak dengan melalui *Electrical Discharge Machine* (EDM). Alat EDM akan otomatis bekerja sesuai perintah dari *controller* setelah data yang dimasukkan. Beberapa indikator yang dapat diatur adalah posisi *tool* EDM terhadap material yang akan dirusak, kedalaman retak, waktu pengerjaan, dan seberapa kuat *tool* merusak bagian material. Mesin akan otomatis berhenti bekerja ketika indikator berupa kedalaman retak telah tercapai. Selesaiannya pengerjaan juga ditandai oleh bunyi selama beberapa detik. Jika akan dibuat retak pada posisi lainnya, cukup dengan menggerakkan *tool* EDM melalui *controller* dari satu posisi ke posisi berikutnya.

Setelah semua retak selesai dibuat, semua permukaan *test piece* yang ada retaknya, diberi plester *drafting tape*, dengan tujuan untuk mengaburkan posisi dan dimensi retak yang ada. Hasil pembuatan retak ditunjukkan pada Lampiran J.

3.3.3. Pengujian Eddy Current

Pengujian *eddy current* dilakukan setelah retak selesai dibuat pada semua *test piece* dan telah ditutupi plester *drafting tape*. Dengan melakukan pengujian *eddy current* akan diketahui seberapa mampu retak dapat dideteksi dengan *probe* yang frekuensinya bervariasi pada material. Apabila tahapan-tahapan sebelum pengujian telah dilakukan serta semua peralatan pengujian telah disiapkan, pengujian *eddy current* dapat dilakukan.

Pengujian *eddy current* dilakukan dimulai dengan mempersiapkan material uji dan blok kalibrasi di meja kerja. Meja kerja yang digunakan sebaiknya terbuat dari bahan yang tidak dapat menghantarkan listrik maupun magnet (non-konduktif) karena dapat memengaruhi arus *eddy* pada pengujian. Setelah itu adalah melakukan kalibrasi alat uji menggunakan blok kalibrasi yang ada. Hal yang harus diperhatikan adalah pengaturan frekuensi, *gain*, dan sudut fase pada alat uji. Kalibrasi dilakukan setiap akan memulai pengujian sesuai dengan frekuensi *probe* yang akan digunakan. Apabila akan menguji *test piece* dengan frekuensi *probe* 30 kHz, maka pada alat uji juga harus diatur frekuensinya dengan besaran yang sama. Selanjutnya adalah pengujian terhadap *test piece*. Pengujian dilakukan sepanjang daerah permukaan *test piece*. Sebelum melakukan pemindaian atau *scanning*, harus dilakukan *balancing/nulling* yaitu proses penyamaan impedansi antara *probe* dan impedansi internal dari alat uji dengan posisi *probe* menempel pada *test piece*. Selanjutnya, bersamaan dengan dijalankan *probe* pada permukaan *test piece*, dilihat sinyal yang dihasilkan pada monitor. Jika terdapat indikasi maka diberikan tanda pada material. Setelah semua indikasi retak ditemukan dan grafik yang dihasilkan didokumentasikan, maka

pengujian *eddy current* telah selesai. Langkah selanjutnya adalah menganalisis data yang didapatkan dari hasil pengujian.

Pengaturan konfigurasi utama alat uji *eddy current* berbeda untuk masing-masing frekuensi *probe* yang digunakan. Untuk *probe* dengan frekuensi 30 kHz, sudut fasenya 340.8° , nilai *horizontal gain* 61.3 dB, nilai *vertical gain* 69.5 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%. Untuk *probe* dengan frekuensi 500 kHz, sudut fasenya 295.6° , nilai *horizontal gain* 57.7 dB, nilai *vertical gain* 70.8 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%. Sedangkan untuk *probe* dengan frekuensi 650 kHz, sudut fasenya 22.8° , nilai *horizontal gain* 58.2 dB, nilai *vertical gain* 72.3 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%.

Konfigurasi ini merupakan nilai tetap yang tidak boleh diganti selama pengujian dilakukan, menyesuaikan frekuensi yang digunakan. Semua *test piece* diuji menggunakan pengaturan konfigurasi yang sama. Apabila dilakukan perubahan pada salah satu komponen pengaturan saat pengujian, maka dapat memengaruhi hasil uji yang hasilnya dapat berbeda dengan pengujian sebelumnya.

3.4. Lokasi Pengerjaan

Tugas Akhir ini dikerjakan di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan ITS. Namun, karena keterbatasan peralatan yang dimiliki, ada pekerjaan yang tidak dapat dilakukan di lingkungan Departemen Teknik Perkapalan ITS. Pembuatan retak dilakukan di CV. Rahayu Sentosa yang beralamatkan di Jln. Kolonel Sugiono 46 RT 08 RW 02 Desa Ngingas Kecamatan Waru Kabupaten Sidoarjo.

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengantar

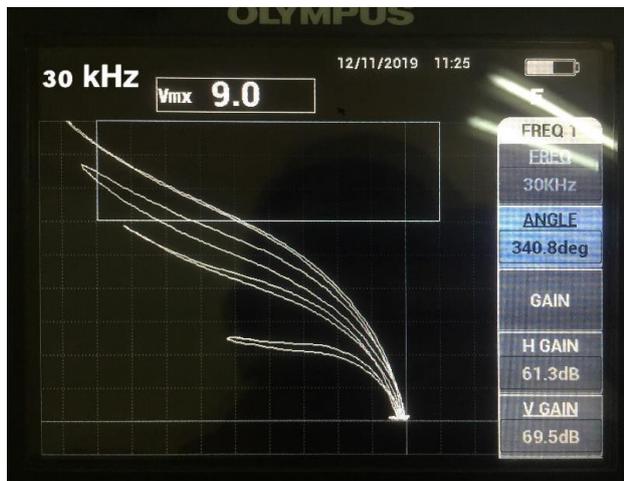
Dalam bab ini akan disajikan analisis data dari pengujian *eddy current* untuk mendeteksi retak yang telah dilakukan sebelumnya. Seluruh rangkaian pengujian dilakukan dengan mengacu pada metodologi eksperimen yang dijelaskan pada Bab III. Kondisi yang terjadi pada saat pengujian yaitu terdapat delapan *test piece* dengan empat buah retak buatan pada masing-masing *test piece*; dimana retak-retak tersebut memiliki panjang dan kedalaman retak yang berbeda-beda. Pada pengujian *eddy current* menggunakan *right angle surface probe* dengan frekuensi 30 kHz, 500 kHz dan 650 kHz.

4.2. Hasil-hasil Kalibrasi

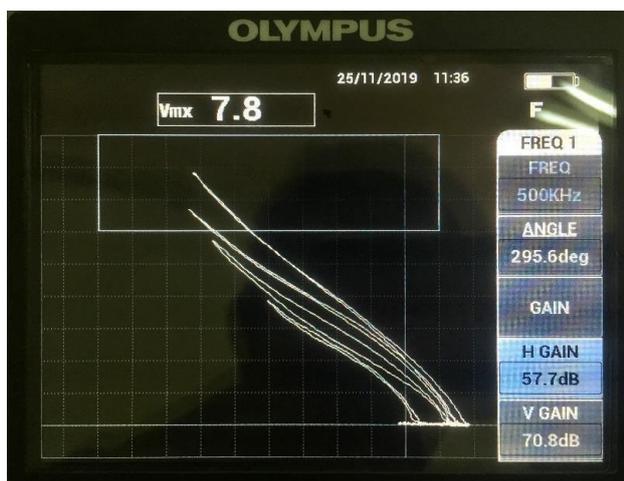
Sebelum melakukan pengujian, dilakukan proses kalibrasi alat uji menggunakan blok kalibrasi yang ada. Kalibrasi dilakukan setiap akan memulai pengujian sesuai dengan kondisi *test piece* uji. Pengujian pada blok kalibrasi berfungsi untuk mengetahui arah dan bentuk sinyal ketika terindikasi adanya retak pada *test piece* sehingga bentuk dan arah sinyal saat pengujian pada *test piece* harus sama dengan bentuk dan arah sinyal yang dihasilkan pada pengujian blok kalibrasi. Untuk membentuk sinyal yang bagus maka diperlukan konfigurasi yang tepat juga. Konfigurasi tersebut tidak boleh diganti atau nilai paten selama pengujian berlangsung. Hal yang harus diperhatikan adalah pengaturan frekuensi, *gain* secara horizontal dan vertikal, serta sudut fase pada alat uji. Proses kalibrasi dilakukan setiap akan memulai pengujian sesuai dengan frekuensi *probe* yang akan digunakan. Apabila akan menguji *test piece* dengan menggunakan *probe* yang berbeda maka pengaturan frekuensi dan *gain* pada alat *eddy current* juga harus disesuaikan dengan frekuensi pada *probe* tersebut. Proses kalibrasi dan pengujian dilakukan pada sebuah meja kerja yang tidak dapat menghantarkan listrik maupun magnet karena dapat memengaruhi arus *eddy* pada pengujian..

Mengingat terdapat tiga jenis *probe* dengan frekuensi yang berbeda, maka perlu dilakukan tiga kali proses kalibrasi, yaitu pada *probe* dengan frekuensi 30 kHz, 500 kHz dan 650 kHz. Masing-masing frekuensi memiliki pengaturan *gain* secara horizontal dan vertikal serta sudut fase yang berbeda. Berikut adalah tampilan grafik pada saat kalibrasi dengan

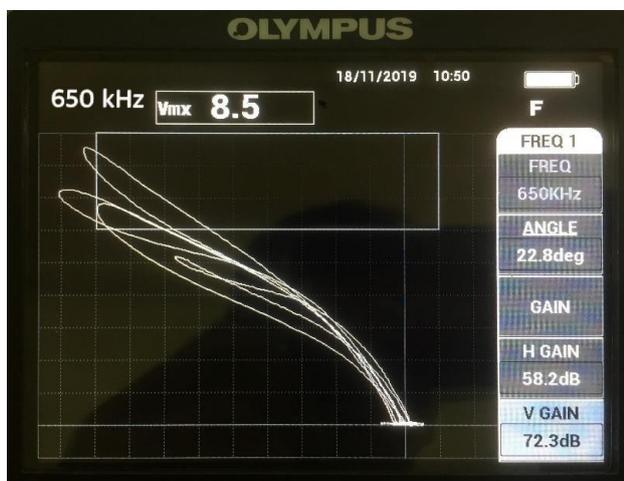
probe 30 kHz, 500 kHz dan 650 kHz yang disajikan berturut-turut pada Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



Gambar 4.1 Hasil Kalibrasi dengan *Probe* Frekuensi 30 kHz



Gambar 4.2 Hasil Kalibrasi dengan *Probe* Frekuensi 500 kHz



Gambar 4.3 Hasil Kalibrasi dengan *Probe* Frekuensi 650 kHz

Grafik-grafik hasil kalibrasi kemudian dicetak atau ditampilkan dengan ukuran tertentu yang sama dan mudah dibaca. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis dasar titik nol mulainya pergerakan grafik. Kemudian didapatkan tinggi grafik untuk kedalaman retak 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm dan 2.0 mm. Rekapitulasi tinggi grafik untuk kedalaman retak 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm dan 2.0 mm dengan menggunakan *probe* 30 kHz, 500 kHz dan 650 kHz ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rekapitulasi Ketinggian Grafik terhadap Pengujian Blok Kalibrasi

Frekuensi [kHz]	Ketinggian Grafik untuk Kedalaman Retak [mm]			
	0,5	1,0	1,5	2,0
30	30,0	70,0	92,0	107,0
500	44,0	65,5	77,0	90,0
650	60,0	79,0	84,0	99,0

4.3. Hasil-hasil Pengujian

Pada sub-bab ini akan ditampilkan hasil-hasil pengujian pada *test piece* #1 hingga *test piece* #8 untuk semua frekuensi *probe* meliputi hasil tampilan grafik pada monitor peralatan pengujian *eddy current* dan pengukuran ketinggian grafik. Pengujian dilakukan setelah menjalani proses kalibrasi. Setelah proses kalibrasi akan didapat pengaturan frekuensi, *gain* secara horizontal dan vertikal, serta sudut fase pada alat uji. Pada saat melakukan pengujian, nilai frekuensi, *gain* secara horizontal dan vertikal, serta sudut fase tidak boleh diubah.

4.3.1. Frekuensi 30 kHz

Pada sub-bab ini akan ditampilkan hasil-hasil pengujian pada semua *test piece* untuk *probe* 30 kHz menurut kedalaman retak yang bervariasi yaitu 0,5 mm, 1,0 mm dan 1,5 mm. Kondisi yang terjadi untuk *probe* dengan frekuensi 30 kHz adalah sudut fasenya 340.8° , nilai *horizontal gain* 61.3 dB, nilai *vertical gain* 69.5 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%.

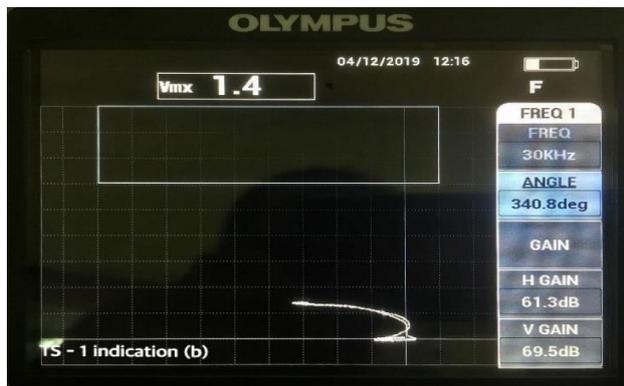
4.3.1.1. Kedalaman Retak 0.5 mm

Kedalaman retak 0,5 mm terjadi pada seluruh *test piece* sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 3.3.2. Untuk *test piece* #1, #2 dan #3 terdapat dua lokasi indikasi retak. Untuk *test piece* #4, #5, #6, #7 dan #8 masing-masing terdapat satu lokasi indikasi retak. Masing-masing retak memiliki panjang yang berbeda. Lokasi-lokasi retak disajikan pada Tabel 4.2.

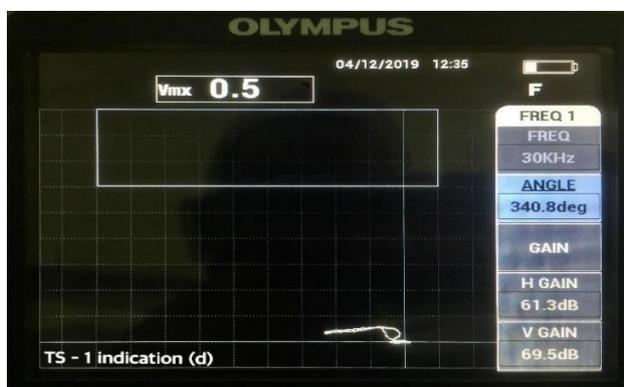
Tabel 4.2 Lokasi-lokasi Indikasi Retak untuk Kedalaman 0,5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak
1	b
1	d
2	b
2	c
3	b
3	d
4	d
5	b
6	b
7	b
8	c

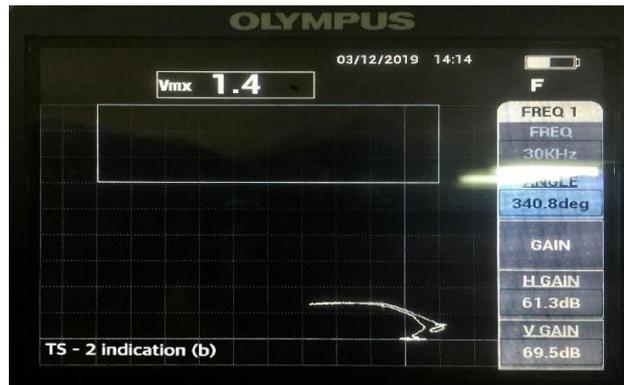
Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 0,5 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.2, maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian dengan menggunakan *probe* 30 kHz pada lokasi-lokasi di atas, yaitu pada *test piece* #1 dengan kode retak b dan d serta *test piece* #2 dengan kode retak b, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran A.



Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak b



Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak d



Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #2 dengan Kode Retak b

Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.1. Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 0,5 mm ditunjukkan pada Tabel 4.3. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

Tabel 4.3 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 0.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	b	15,50	0,26
1	d	6,00	0,10
2	b	16,00	0,27
2	c	15,00	0,25
3	b	8,50	0,14
3	d	7,00	0,12
4	d	12,00	0,20
5	b	10,50	0,18
6	b	10,00	0,17
7	b	8,00	0,13
8	c	15,00	0,25
Rata-rata		11,23	0,19

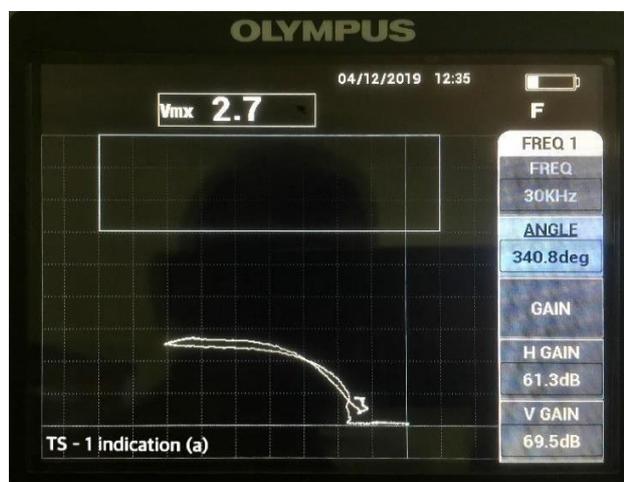
4.3.1.2. Kedalaman Retak 1.0 mm

Kedalaman retak 1.0 mm terjadi pada seluruh *test piece* sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 3.3.2. Untuk *test piece* #1, #2 dan #3, #4, #5, #6, #7 dan #8 masing-masing terdapat dua lokasi indikasi retak. Masing-masing retak memiliki panjang yang berbeda. Lokasi-lokasi retak disajikan pada Tabel 4.4.

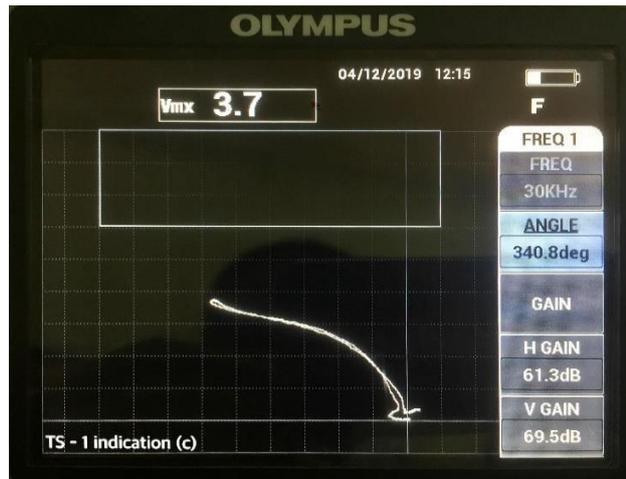
Tabel 4.4 Lokasi-lokasi Indikasi Retak untuk Kedalaman 1.0 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak
1	a
1	c
2	a
2	d
3	a
3	c
4	a
4	c
5	c
5	d
6	a
6	d
7	c
7	d
8	a
8	d

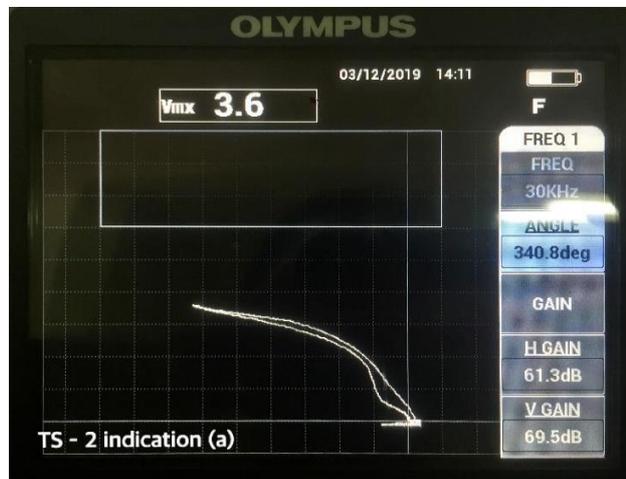
Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 1.0 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4, maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian dengan menggunakan *probe* 30 kHz pada lokasi-lokasi di atas yaitu pada *test piece* #1 dengan kode retak a dan c serta *test piece* #2 dengan kode retak a, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. Pengaturan pada alat pengujian *eddy current* tidak dilakukan perubahan dan menggunakan kondisi pengaturan frekuensi, *gain* baik horizontal maupun vertikal dan sudut fase yang sama, yaitu sudut fasenya 340.8° , nilai *horizontal gain* 61.3 dB, nilai *vertical gain* 69.5 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran B.



Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak a



Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak c



Gambar 4.9 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #2 dengan Kode Retak a

Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.1. Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 1.0 mm ditunjukkan pada Tabel 4.5. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

Tabel 4.5 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.0 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	a	30,50	0,44
1	c	43,00	0,61
2	a	41,00	0,59
2	d	42,00	0,60

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
3	a	20,50	0,29
3	c	39,00	0,56
4	a	25,50	0,36
4	c	41,50	0,59
5	c	39,50	0,56
5	d	37,50	0,54
6	a	20,00	0,29
6	d	40,00	0,57
7	c	19,00	0,27
7	d	39,00	0,56
8	a	33,50	0,48
8	d	32,00	0,46
Rata-rata		33,97	0,49

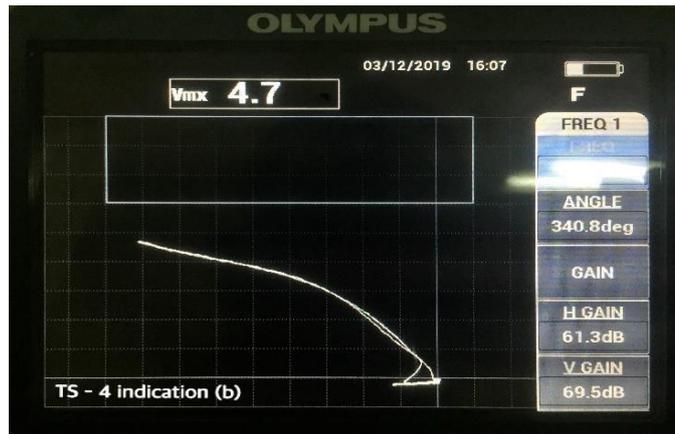
4.3.1.3. Kedalaman Retak 1.5 mm

Kedalaman retak 1.5 mm terjadi pada *test piece* #4, #5, #6, #7 dan #8 sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 3.3.2. Masing-masing *test piece* memiliki satu retak dengan kedalaman 1.5 mm. Masing-masing retak memiliki panjang yang berbeda. Lokasi-lokasi retak disajikan pada Tabel 4.6.

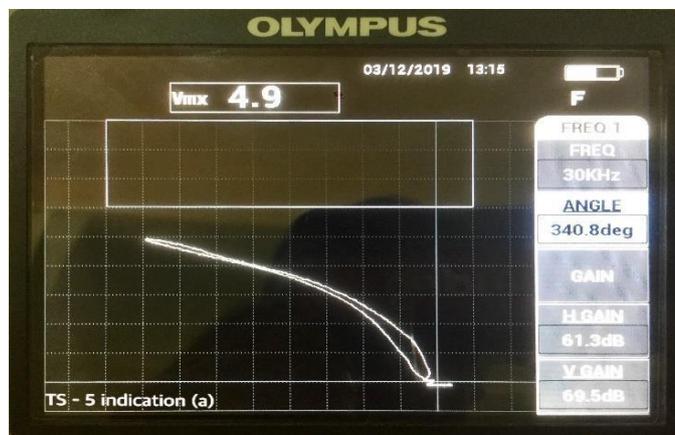
Tabel 4.6 Lokasi-lokasi Indikasi Retak untuk Kedalaman 1.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak
4	b
5	a
6	c
7	a
8	b

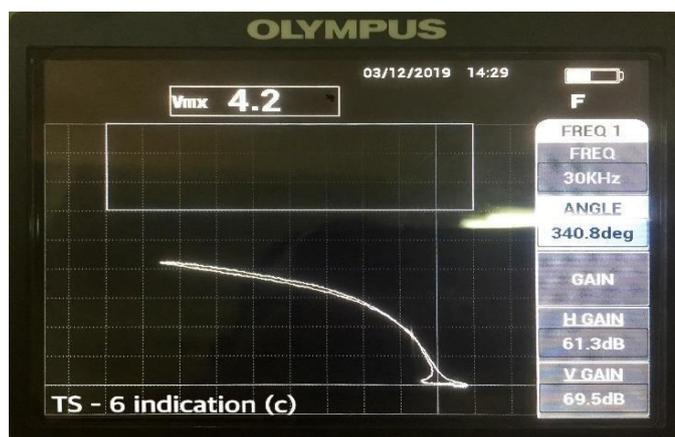
Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 1.5 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.6, maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian dengan menggunakan *probe* 30 kHz pada lokasi-lokasi di atas yaitu pada *test piece* #4 dengan kode retak b, *test piece* #5 dengan kode retak a dan *test piece* #6 dengan kode retak c, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.10, Gambar 4.11 dan Gambar 4.12. Pengaturan pada alat pengujian *eddy current* tidak dilakukan perubahan dan menggunakan kondisi pengaturan frekuensi, *gain* baik horizontal maupun vertikal dan sudut fase yang sama, yaitu sudut fasenya 340.8° , nilai *horizontal gain* 61.3 dB, nilai *vertical gain* 69.5 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran C.



Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #4 dengan Kode Retak b



Gambar 4.11 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #5 dengan Kode Retak a



Gambar 4.12 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #6 dengan Kode Retak c

Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.1. Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman

1,5 mm ditunjukkan pada Tabel 4.7. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

Tabel 4.7 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.5 mm

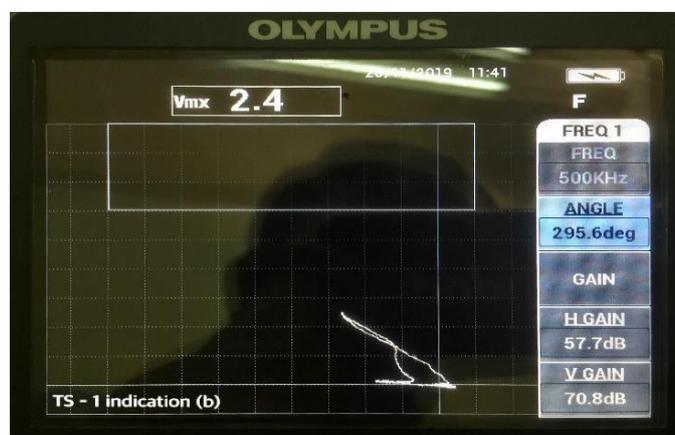
No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
4	b	54,00	0,88
5	a	57,00	0,93
6	c	48,50	0,79
7	a	59,50	0,97
8	b	55,50	0,90
Rata-rata		54,90	0,90

4.3.2. Frekuensi 500 kHz

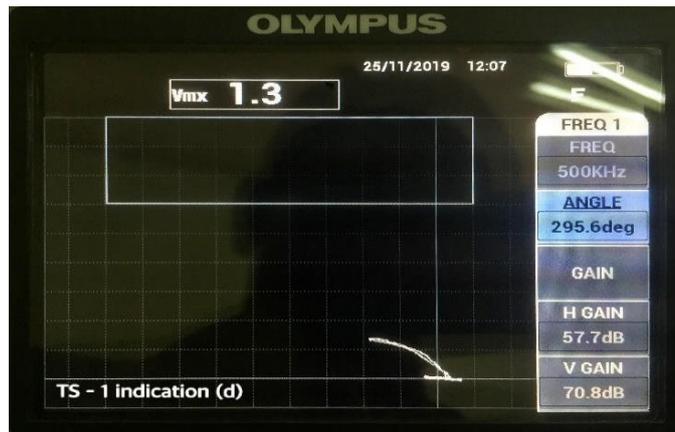
Pada sub-bab ini akan ditampilkan hasil-hasil pengujian pada semua *test piece* untuk *probe* 500 kHz menurut kedalaman retak yang bervariasi yaitu 0.5 mm, 1.0 mm dan 1.5 mm. Kondisi yang terjadi untuk *probe* dengan frekuensi 500 kHz adalah sudut fasenya 295.6° , nilai *horizontal gain* 57.7 dB, nilai *vertical gain* 70.8 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%.

4.3.2.1. Kedalaman Retak 0.5 mm

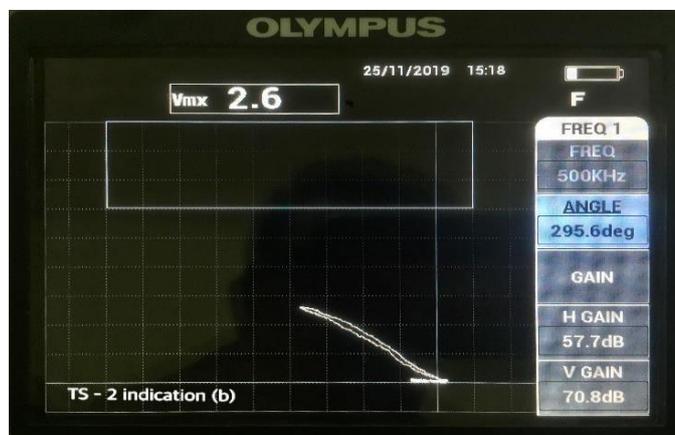
Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 0.5 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.2, maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian dengan menggunakan *probe* 500 kHz pada lokasi-lokasi tersebut, yaitu pada *test piece* #1 dengan kode retak b dan d serta *test piece* #2 dengan kode retak b, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.13, Gambar 4.14 dan Gambar 4.15. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran D.



Gambar 4.13 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak b



Gambar 4.14 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak d



Gambar 4.15 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #2 dengan Kode Retak b

Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.2. Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 0.5 mm ditunjukkan pada Tabel 4.8. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

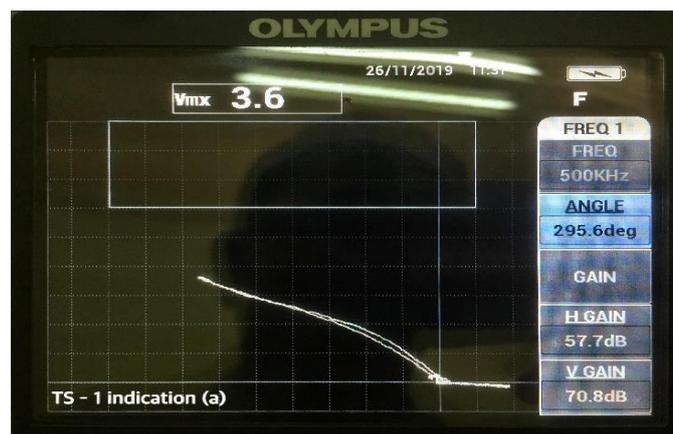
Tabel 4.8 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 0.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	b	28,00	0,32
1	d	15,50	0,18
2	b	29,00	0,33

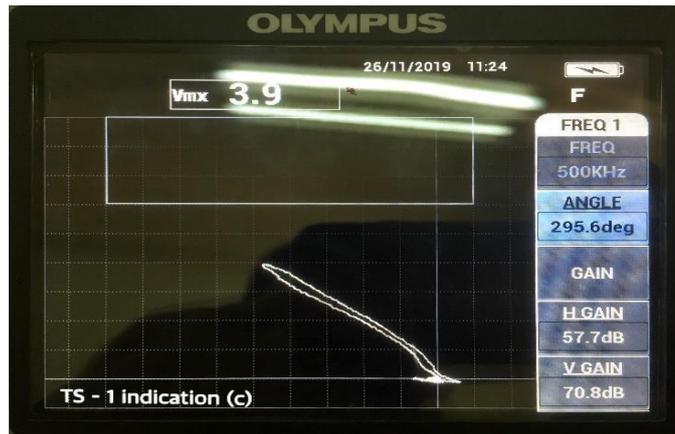
No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
2	c	26,00	0,30
3	b	13,00	0,15
3	d	18,00	0,20
4	d	25,00	0,28
5	b	19,00	0,22
6	b	17,00	0,19
7	b	14,00	0,16
8	c	27,00	0,31
Rata-rata		21.05	0,24

4.3.2.2. Kedalaman Retak 1.0 mm

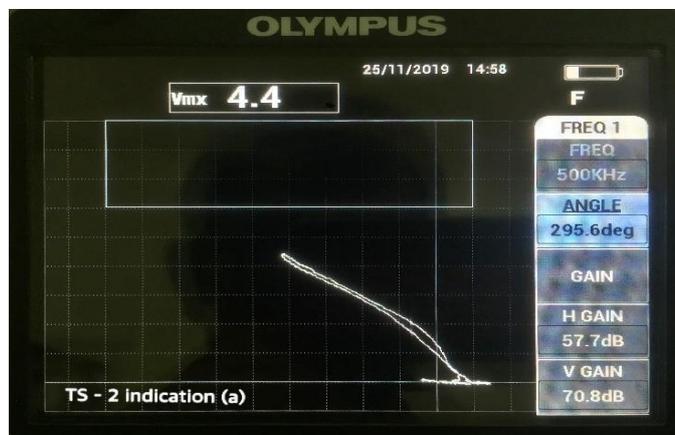
Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 1.0 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4, maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian dengan menggunakan *probe* 500 kHz pada lokasi-lokasi di atas yaitu pada *test piece* #1 dengan kode retak a dan c serta *test piece* #2 dengan kode retak a, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.16, Gambar 4.17 dan Gambar 4.18. Pengaturan pada alat pengujian *eddy current* tidak dilakukan perubahan dan menggunakan kondisi pengaturan frekuensi, *gain* baik horizontal maupun vertikal dan sudut fase yang sama, yaitu sudut fasenya 295.6° , nilai *horizontal gain* 57.7 dB, nilai *vertical gain* 70.8 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran E.



Gambar 4.16 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak a



Gambar 4.17 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak c



Gambar 4.18 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #2 dengan Kode Retak a

Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.2. Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 1.0 mm ditunjukkan pada Tabel 4.9. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

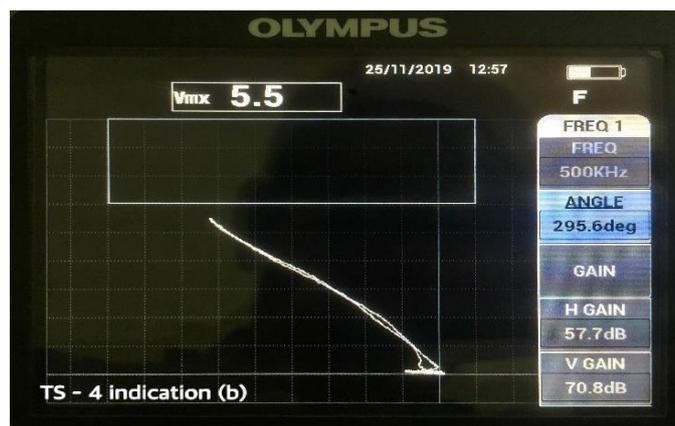
Tabel 4.9 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.0 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	a	41,00	0,63
1	c	40,00	0,61
2	a	50,50	0,77
2	d	50,00	0,76
3	a	31,00	0,47
3	c	43,50	0,66

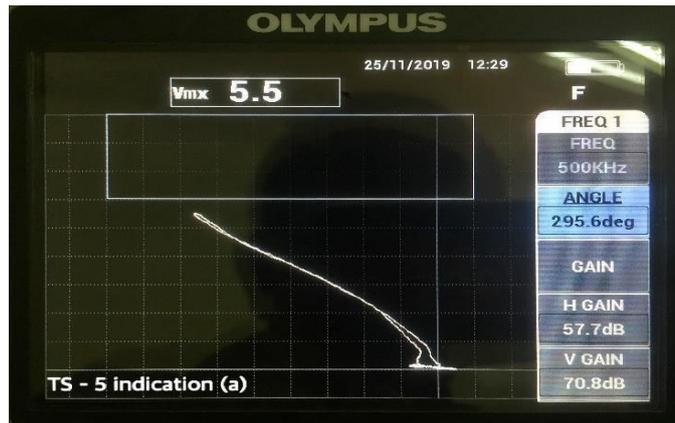
No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
4	a	44,00	0,67
4	c	51,00	0,78
5	c	50,00	0,76
5	d	49,50	0,76
6	a	25,00	0,38
6	d	48,00	0,73
7	c	32,00	0,49
7	d	54,00	0,82
8	a	48,00	0,73
8	d	47,50	0,73
Rata-rata		44,06	0,67

4.3.2.3. Kedalaman Retak 1.5 mm

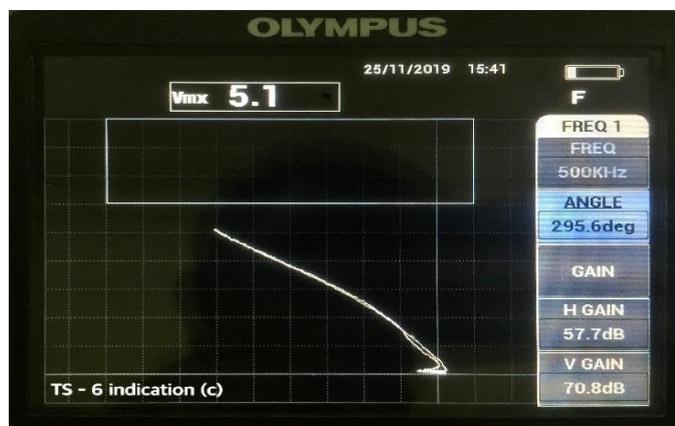
Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 1.5 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.6. maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian dengan menggunakan *probe* 500 kHz pada lokasi-lokasi di atas yaitu pada *test piece* #4 dengan kode retak b, *test piece* #5 dengan kode retak a dan *test piece* #6 dengan kode retak c, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.19, Gambar 4.20 dan Gambar 4.21. Pengaturan pada alat pengujian *eddy current* tidak dilakukan perubahan dan menggunakan kondisi pengaturan frekuensi, *gain* baik horizontal maupun vertikal dan sudut fase yang sama, yaitu sudut fasenya 295.6° , nilai *horizontal gain* 57.7 dB, nilai *vertical gain* 70.8 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran F.



Gambar 4.19 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #4 dengan Kode Retak b



Gambar 4.20 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #5 dengan Kode Retak a



Gambar 4.21 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #6 dengan Kode Retak c

Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.3. Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 1.5 mm ditunjukkan pada Tabel 4.10. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

Tabel 4.10 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.5 mm

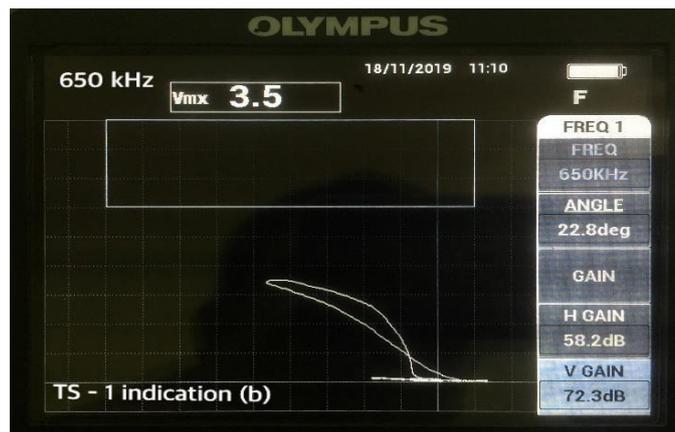
No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
4	b	63,00	1,23
5	a	63,00	1,23
6	c	58,00	1,13
7	a	65,00	1,27
8	b	63,00	1,23
Rata-rata		62,40	1,22

4.3.3. Frekuensi 650 kHz

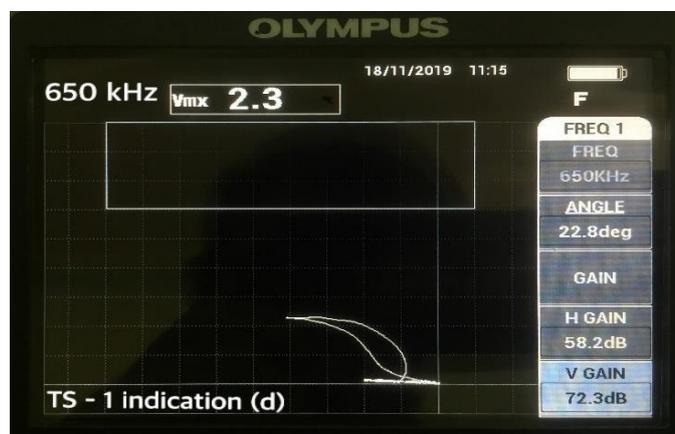
Pada sub-bab ini akan ditampilkan hasil-hasil pengujian pada semua *test piece* untuk *probe* 650 kHz menurut kedalaman retak yang bervariasi yaitu 0.5 mm, 1.0 mm dan 1.5 mm. Kondisi yang terjadi untuk *probe* dengan frekuensi 650 kHz adalah sudut fasenya 22.8° , nilai *horizontal gain* 58.2 dB, nilai *vertical gain* 72.3 dB, *display mode impedance*, *horizontal position* 90% dan *vertical position* 10%.

4.3.3.1. Kedalaman Retak 0.5 mm

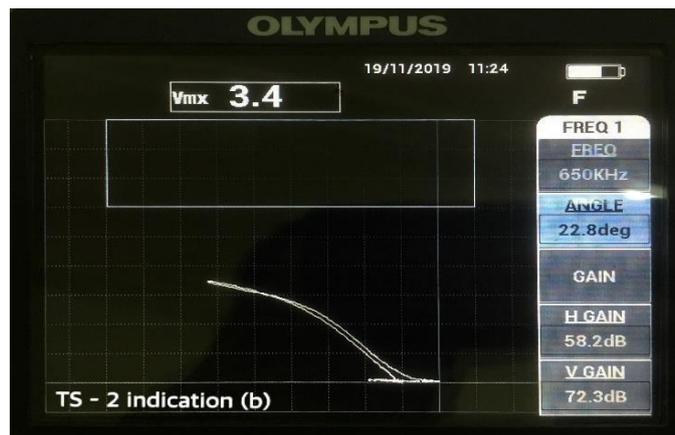
Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 0.5 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.2, maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian dengan menggunakan *probe* 650 kHz pada lokasi-lokasi tersebut, yaitu pada *test piece* #1 dengan kode retak b dan d serta *test piece* #2 dengan kode retak b, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.22, Gambar 4.23 dan Gambar 4.24. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran G.



Gambar 4.22 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak b



Gambar 4.23 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak d



Gambar 4.24 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #2 dengan Kode Retak b

Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.3. Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 0.5 mm ditunjukkan pada Tabel 4.11. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

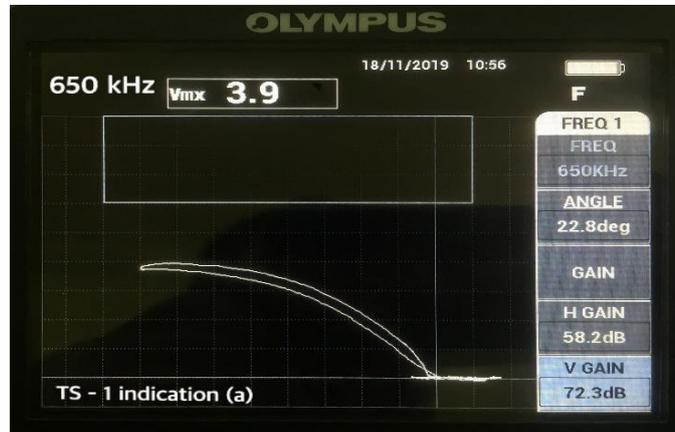
Tabel 4.11 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 0.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	b	40,00	0,33
1	d	26,00	0,22
2	b	40,00	0,33
2	c	39,00	0,33
3	b	27,00	0,23
3	d	32,00	0,27
4	d	36,50	0,30
5	b	32,00	0,27
6	b	30,00	0,25
7	b	24,00	0,20
8	c	40,00	0,33
Rata-rata		33,32	0,28

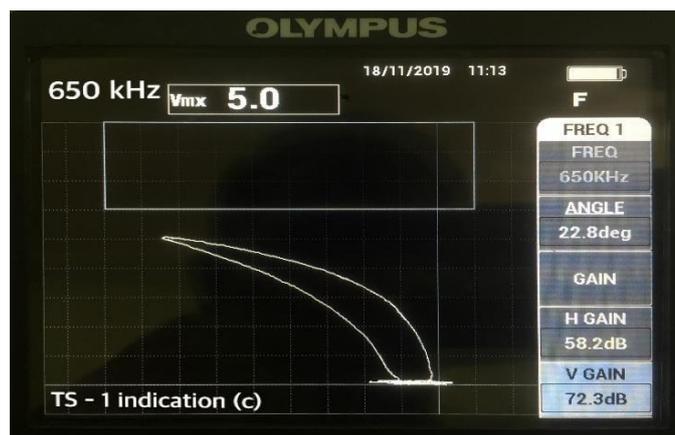
4.3.3.2. Kedalaman Retak 1.0 mm

Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 1.0 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4, maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian

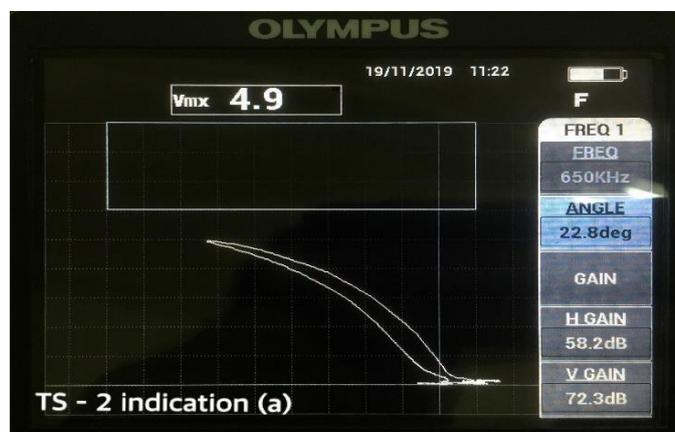
dengan menggunakan *probe* 650 kHz pada lokasi-lokasi di atas yaitu pada *test piece* #1 dengan kode retak a dan c serta *test piece* #2 dengan kode retak a, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.25, Gambar 4.26 dan Gambar 4.27. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran H.



Gambar 4.25 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak a



Gambar 4.26 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #1 dengan Kode Retak c



Gambar 4.27 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #2 dengan Kode Retak a

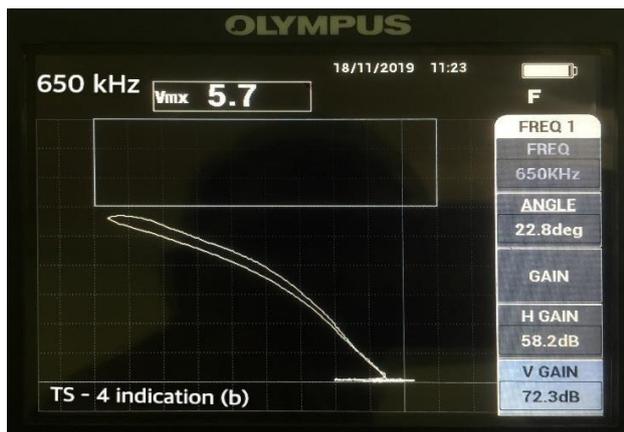
Pengaturan pada alat pengujian *eddy current* tidak dilakukan perubahan dan menggunakan kondisi pengaturan frekuensi, *gain* baik horizontal maupun vertikal dan sudut fase yang sama. Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.3. Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 1.0 mm ditunjukkan pada Tabel 4.12. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

Tabel 4.12 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.0 mm

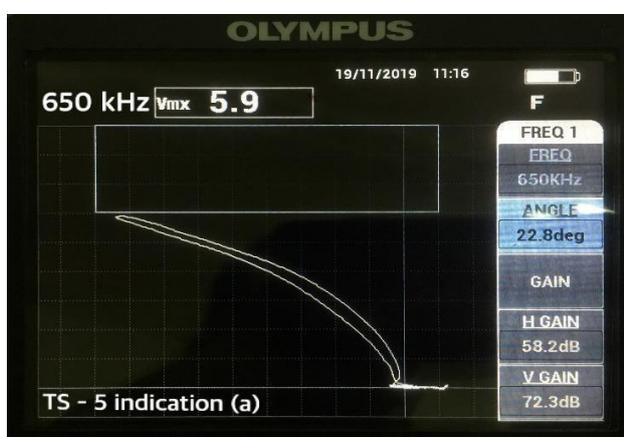
No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	a	45,00	0,57
1	c	59,00	0,75
2	a	57,00	0,72
2	d	55,00	0,70
3	a	40,00	0,51
3	c	57,00	0,72
4	a	53,00	0,67
4	c	59,00	0,75
5	c	60,00	0,76
5	d	57,00	0,72
6	a	45,00	0,57
6	d	57,00	0,72
7	c	45,00	0,57
7	d	57,00	0,72
8	a	55,00	0,70
8	d	59,00	0,75
Rata-rata		53,75	0,68

4.3.3.3. Kedalaman Retak 1.5 mm

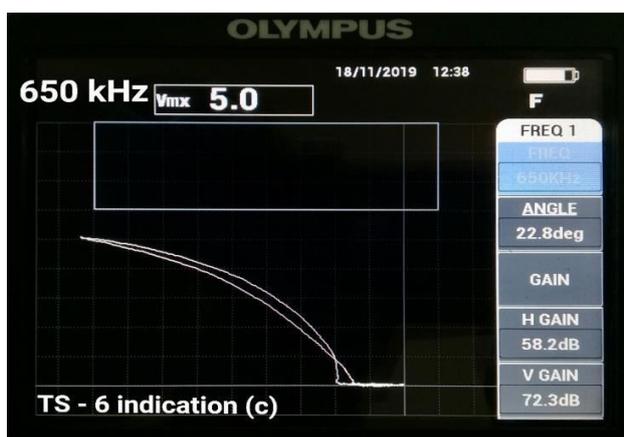
Merujuk pada lokasi-lokasi retak dengan kedalaman 1,5 mm sebagaimana disajikan pada Tabel 4.6, maka berikut ini akan disajikan tiga contoh dokumentasi hasil pengujian dengan menggunakan *probe* 650 kHz pada lokasi-lokasi di atas yaitu pada *test piece* #4 dengan kode retak b, *test piece* #5 dengan kode retak a dan *test piece* #6 dengan kode retak c, secara berturut-turut disajikan pada Gambar 4.28, Gambar 4.29 dan Gambar 4.30. Untuk hasil pengujian lokasi-lokasi retak yang lain ditampilkan pada Lampiran I.



Gambar 4.28 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #4 dengan Kode Retak b



Gambar 4.29 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #5 dengan Kode Retak a



Gambar 4.30 Grafik Hasil Pengujian pada *Test Piece* #6 dengan Kode Retak c

Pengaturan pada alat pengujian *eddy current* tidak dilakukan perubahan dan menggunakan kondisi pengaturan frekuensi, *gain* baik horizontal maupun vertikal dan sudut fase yang sama. Setelah grafik-grafik hasil pengujian didapatkan, maka dibandingkan dengan grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.3, Grafik-grafik hasil pengujian dan grafik kalibrasi

dicetak atau ditampilkan dengan ukuran yang sama. Setelah itu ketinggian grafik diukur dari garis titik nol grafik. Rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 1.5 mm ditunjukkan pada Tabel 4.13. Realisasi kedalaman retak didapatkan dari perbandingan antara tinggi grafik pada indikasi retak dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi lalu dikalikan dengan kedalaman retak.

Tabel 4.13 Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman 1.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
4	b	65,50	1,17
5	a	68,00	1,21
6	c	59,00	1,05
7	a	67,00	1,20
8	b	64,00	1,14
Rata-rata		64,70	1,16

4.4. Analisis Hasil Pengujian

Hasil pengujian sebelumnya disajikan berdasarkan frekuensi pada *probe* yang digunakan untuk mendeteksi adanya retak di permukaan benda uji untuk masing-masing kedalaman retak. Hasil-hasil kalibrasi yang telah dibahas pada sub-bab 4.2 dan hasil-hasil pengujian yang telah dibahas pada sub-bab 4.3 dilakukan analisis terhadap kesesuaiannya antara hasil pengujian dengan hasil kalibrasi serta analisis ketidaksesuaian (*error*) antara hasil pengujian dengan hasil kalibrasi.

4.4.1. Analisis Kesesuaian dan Kemampuan Pendeteksian

Pada sub-bab ini akan ditampilkan analisis kesesuaian tinggi grafik lokasi-lokasi indikasi retak terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi. Cakupan sub-bab ini adalah penjelasan tentang lokasi-lokasi indikasi retak yang mendekati kesesuaian dengan blok kalibrasi pada tiap-tiap frekuensi serta rasio dan persentase kesesuaian hasil pengujian terhadap hasil kalibrasi.

4.4.1.1. Lokasi-lokasi Indikasi yang Mendekati Kesesuaian

Pada sub-bab ini akan ditampilkan lokasi-lokasi indikasi yang mendekati kesesuaian pada frekuensi 30 kHz, 500 kHz dan 650 kHz. Hasil-hasil pengujian dibandingkan dengan hasil kalibrasi dan dicari mana lokasi indikasi retak yang sesuai atau mendekati hasil kalibrasi.

4.4.1.1.1. Frekuensi 30 kHz

Pada frekuensi 30 kHz, dengan membandingkan hasil pengukuran tinggi grafik pada Tabel 4.3, Tabel 4.5 dan Tabel 4.7 serta membandingkannya dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi sebagaimana tertera pada Tabel 4.1, maka didapatkan lokasi indikasi yang mendekati kesesuaian terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi, sebagaimana tertera pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Lokasi-lokasi Indikasi yang Mendekati Kesesuaian pada Frekuensi 30 kHz

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak
1	a

4.4.1.1.2. Frekuensi 500 kHz

Pada frekuensi 500 kHz, dengan membandingkan hasil pengukuran tinggi grafik pada Tabel 4.8, Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 serta membandingkannya dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi sebagaimana tertera pada Tabel 4.1, maka didapatkan lokasi-lokasi indikasi yang mendekati kesesuaian terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi sebagaimana tertera pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Lokasi-lokasi Indikasi yang Mendekati Kesesuaian pada Frekuensi 500 kHz

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak		
1	a		c
2	-		
3	c		
4	a		
5	a		
6	-		
7	a		
8	a	b	d

4.4.1.1.3. Frekuensi 650 kHz

Pada frekuensi 650 kHz, dengan membandingkan hasil pengukuran tinggi grafik pada Tabel 4.11, Tabel 4.12 dan Tabel 4.13 serta membandingkannya dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi sebagaimana tertera pada Tabel 4.1, maka didapatkan lokasi-lokasi indikasi yang mendekati kesesuaian terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi sebagaimana tertera pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Lokasi-lokasi Indikasi yang Mendekati Kesesuaian pada Frekuensi 650 kHz

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak		
1	c		
2	a		
3	c		
4	c		
5	c		d
6	c		d
7	d		
8	a	b	d

4.4.1.2. Rasio dan Persentase Kesesuaian

Pada sub-bab ini akan dicari rasio dan persentase kesesuaian antara hasil pengujian dengan hasil kalibrasi pada frekuensi 30 kHz, 500 kHz dan 650 kHz. Rasio dan persentase kesesuaian didapatkan dari jumlah indikasi yang mendekati kesesuaian sesuai Tabel 4.14, Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 dibagi dengan jumlah indikasi retak keseluruhan. Pada frekuensi 30 kHz, jumlah indikasi yang mendekati kesesuaian adalah satu lokasi. Maka, rasio kesesuaian untuk frekuensi 30 kHz adalah $1/32$ atau setara dengan 3,125%. Pada frekuensi 500 kHz, jumlah indikasi yang mendekati kesesuaian adalah sembilan lokasi. Maka, rasio kesesuaian untuk frekuensi 500 kHz adalah $9/32$ atau setara dengan 28,125%. Pada frekuensi 650 kHz, jumlah indikasi yang mendekati kesesuaian adalah dua belas lokasi. Maka, rasio kesesuaian untuk frekuensi 650 kHz adalah $12/32$ atau setara dengan 37,5%.

4.4.2. Analisis Ketidaksesuaian (*Error*)

Pada sub-bab ini akan ditampilkan analisis ketidaksesuaian (*error*) pada tinggi grafik lokasi-lokasi indikasi retak terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi. Analisis ketidaksesuaian dilakukan dengan menghitung selisih tinggi grafik pada indikasi dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi kemudian dibagi dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi dan dihasilkan persentase ketidaksesuaian (*error*). Untuk memudahkan, analisis ketidaksesuaian dilakukan menurut kedalaman retak (0,5 mm, 1,0 mm dan 1,5 mm) pada semua frekuensi.

4.4.2.1. Frekuensi 30 kHz

Pada sub-bab ini akan ditampilkan analisis ketidaksesuaian pada semua *test piece* untuk *probe* 30 kHz menurut kedalaman retak yang bervariasi yaitu 0,5 mm, 1,0 mm dan 1,5 mm. Ketidaksesuaian diukur dengan mencari selisih antara hasil-hasil pengujian dengan hasil-hasil kalibrasi. Kemudian selisih antara hasil-hasil pengujian dengan hasil-hasil kalibrasi

dicari persentase ketidaksesuaiannya dengan membagi angka selisih dengan tinggi grafik pada blok kalibrasi.

4.4.2.1.1. Kedalaman 0.5 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 0,5 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 0,5 mm sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.3. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 30 kHz dan kedalaman retak 0,5 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 0.5 mm

No. Test Piece	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	b	15,50	14,50	48,33	0,26
1	d	6,00	24,00	80,00	0,10
2	b	16,00	14,00	46,67	0,27
2	c	15,00	15,00	50,00	0,25
3	b	8,50	21,50	71,67	0,14
3	d	7,00	23,00	76,67	0,12
4	d	12,00	18,00	60,00	0,20
5	b	10,50	19,50	65,00	0,18
6	b	10,00	20,00	66,67	0,17
7	b	8,00	22,00	73,33	0,13
8	c	15,00	15,00	50,00	0,25
Rata-rata		11,23	18,77	62,58	0,19

4.4.2.1.2. Kedalaman 1.0 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 1,0 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 1,0 mm sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.5. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 30 kHz dan kedalaman retak 1,0 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1,0 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	a	30,50	39,50	56,43	0,44
1	c	43,00	27,00	38,57	0,61
2	a	41,00	29,00	41,43	0,59
2	d	42,00	28,00	40,00	0,60
3	a	20,50	49,50	70,71	0,29
3	c	39,00	31,00	44,29	0,56
4	a	25,50	44,50	63,57	0,36
4	c	41,50	28,50	40,71	0,59
5	c	39,50	30,50	43,57	0,56
5	d	37,50	32,50	46,43	0,54
6	a	20,00	50,00	71,43	0,29
6	d	40,00	30,00	42,86	0,57
7	c	19,00	51,00	72,86	0,27
7	d	39,00	31,00	44,29	0,56
8	a	33,50	36,50	52,14	0,48
8	d	32,00	38,00	54,29	0,46
Rata-rata		33,97	36,03	51,47	0,49

4.4.2.1.3. Kedalaman 1.5 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 1,5 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi- indikasi retak dengan kedalaman 1,5 mm sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.7. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 30 kHz dan kedalaman retak 1,5 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
4	b	54,00	38,00	41,30	0,88
5	a	57,00	35,00	38,04	0,93
6	c	48,50	43,50	47,28	0,79
7	a	59,50	32,50	35,33	0,97
8	b	55,50	36,50	39,67	0,90
Rata-rata		54,90	37,10	40,33	0,90

4.4.2.2. Frekuensi 500 kHz

Pada sub-bab ini akan ditampilkan analisis ketidaksesuaian pada semua *test piece* untuk *probe* 500 kHz menurut kedalaman retak yang bervariasi yaitu 0,5 mm, 1,0 mm dan 1,5 mm.

4.4.2.2.1. Kedalaman 0.5 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 0,5 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi- indikasi retak dengan kedalaman 0,5 mm sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.8. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 500 kHz dan kedalaman retak 0,5 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 0.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	b	28,00	16,00	36,36	0,32
1	d	15,50	28,50	64,77	0,18
2	b	29,00	15,00	34,09	0,33
2	c	26,00	18,00	40,91	0,30
3	b	13,00	31,00	70,45	0,15
3	d	18,00	26,00	59,09	0,20
4	d	25,00	19,00	43,18	0,28
5	b	19,00	25,00	56,82	0,22
6	b	17,00	27,00	61,36	0,19
7	b	14,00	30,00	68,18	0,16
8	c	27,00	17,00	38,64	0,31
Rata-rata		21,05	22,95	52,17	0,24

4.4.2.2.2. Kedalaman 1.0 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 1.0 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi- indikasi retak dengan kedalaman 1.0 mm sebagaimana ditunjukkan Tabel 4.9. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 500 kHz dan kedalaman retak 1.0 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.0 mm

No. Test Piece	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	a	41,00	24,50	37,40	0,63
1	c	40,00	25,50	38,93	0,61
2	a	50,50	15,00	22,90	0,77
2	d	50,00	15,50	23,66	0,76
3	a	31,00	34,50	52,67	0,47
3	c	43,50	22,00	33,59	0,66
4	a	44,00	21,50	32,82	0,67
4	c	51,00	14,50	22,14	0,78
5	c	50,00	15,50	23,66	0,76
5	d	49,50	16,00	24,43	0,76
6	a	25,00	40,50	61,83	0,38
6	d	48,00	17,50	26,72	0,73
7	c	32,00	33,50	51,15	0,49
7	d	54,00	11,50	17,56	0,82
8	a	48,00	17,50	26,72	0,73
8	d	47,50	18,00	27,48	0,73
Rata-rata		44,06	21,44	32,73	0,67

4.4.2.2.3. Kedalaman 1.5 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 1.5 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi- indikasi retak dengan kedalaman 1.5 mm sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.10. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 500 kHz dan kedalaman retak 1.5 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.5 mm

No. Test Piece	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
4	b	63,00	14,00	18,18	1,23
5	a	63,00	14,00	18,18	1,23
6	c	58,00	19,00	24,68	1,13

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
7	a	65,00	12,00	15,58	1,23
8	b	63,00	14,00	18,18	1,27
Rata-rata		62,40	14,60	18,96	1,22

4.4.2.3. Frekuensi 650 kHz

Pada sub-bab ini akan ditampilkan analisis ketidaksesuaian pada semua *test piece* untuk *probe* 650 kHz menurut kedalaman retak yang bervariasi yaitu 0.5 mm, 1.0 mm dan 1.5 mm.

4.4.2.3.1. Kedalaman 0.5 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 0.5 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi- indikasi retak dengan kedalaman 0.5 mm sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.11. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 650 kHz dan kedalaman retak 0.5 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 0.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	b	40,00	20,00	33,33	0,33
1	d	26,00	34,00	56,67	0,22
2	b	40,00	20,00	33,33	0,33
2	c	39,00	21,00	35,00	0,33
3	b	27,00	33,00	55,00	0,23
3	d	32,00	28,00	46,67	0,27
4	d	36,50	23,50	39,17	0,30
5	b	32,00	28,00	46,67	0,27
6	b	30,00	30,00	50,00	0,25

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
7	b	24,00	36,00	60,00	0,20
8	c	40,00	20,00	33,33	0,33
Rata-rata		33,32	26,68	44,47	0,28

4.4.2.3.2. Kedalaman 1.0 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 1.0 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi- indikasi retak dengan kedalaman 1.0 mm sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.12. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 650 kHz dan kedalaman retak 1.0 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.0 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
1	a	45,00	34,00	43,04	0,57
1	c	59,00	20,00	25,32	0,75
2	a	57,00	22,00	27,85	0,72
2	d	55,00	24,00	30,38	0,70
3	a	40,00	39,00	49,37	0,51
3	c	57,00	22,00	27,85	0,72
4	a	53,00	26,00	32,91	0,67
4	c	59,00	20,00	25,32	0,75
5	c	60,00	19,00	24,05	0,76
5	d	57,00	22,00	27,85	0,72
6	a	45,00	34,00	43,04	0,57
6	d	57,00	22,00	27,85	0,72

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
7	c	45,00	34,00	43,04	0,57
7	d	57,00	22,00	27,85	0,72
8	a	55,00	24,00	30,38	0,70
8	d	59,00	20,00	25,32	0,75
Rata-rata		53,75	25,25	31,96	0,68

4.4.2.3.3. Kedalaman 1.5 kHz

Analisis ketidaksesuaian untuk kedalaman retak 1.5 mm dilakukan merujuk pada rekapitulasi ketinggian grafik pada indikasi- indikasi retak dengan kedalaman 1.5 mm sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.13. Setelah itu adalah menghitung selisih antara ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan tinggi grafik kalibrasi untuk frekuensi 650 kHz dan kedalaman retak 1.5 mm. Hasil perhitungan selisih dan persentase ketidaksesuaian tertera pada Tabel 4.25.

Tabel 4.25 Rekapitulasi Persentase Ketidaksesuaian untuk Kedalaman Retak 1.5 mm

No. <i>Test Piece</i>	Kode Retak	Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak [mm]	Selisih terhadap Blok Kalibrasi [mm]	Persentase Ketidaksesuaian [%]	Realisasi Kedalaman Retak [mm]
4	b	65,50	18,50	22,02	1,17
5	a	68,00	16,00	19,05	1,21
6	c	59,00	25,00	29,76	1,05
7	a	67,00	17,00	20,24	1,20
8	b	64,00	20,00	23,81	1,14
Rata-rata		64,70	19,30	22,98	1,16

4.5. Pembahasan

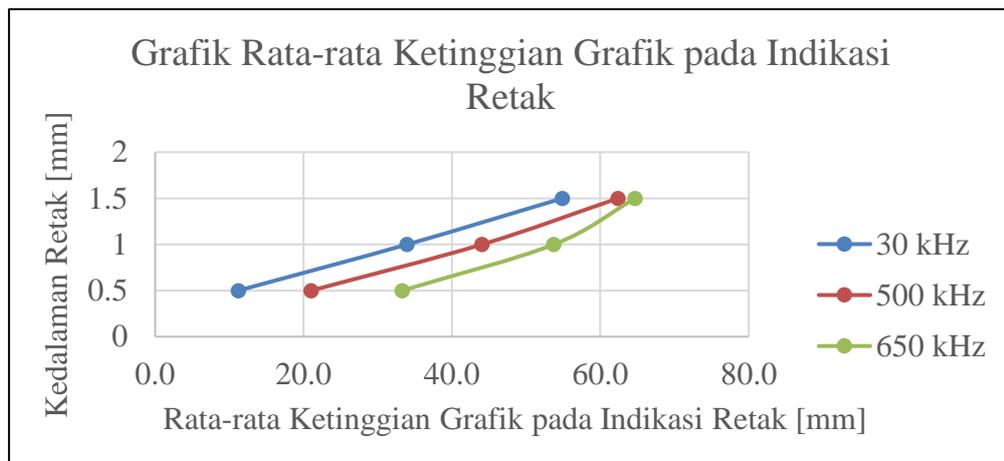
Dengan adanya hasil-hasil pengujian yang telah dilakukan, berikut rekapitulasi data ketinggian grafik indikasi retak yang tercantum pada sub-bab 4.3, menunjukkan bahwa pengujian *eddy current* mampu mendeteksi seluruh retak buatan yang ada pada semua *test piece* #1 sampai *test piece* #8 sejumlah 32 retak buatan. Dengan kata lain, pengujian *eddy* 70

current memiliki tingkat sensitivitas yang baik. Jika dipersentasekan, pada pengujian *eddy current* ini memiliki tingkat sensitivitas sebesar 100%. Berikut akan dibahas beberapa hal yang menyangkut hasil-hasil pengujian yang telah dilaksanakan.

4.5.1. Hubungan antara Rata-rata Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman Retak

Dalam hal satu frekuensi *probe* digunakan, sebagai contoh untuk frekuensi 30 kHz, didapatkan hasil-hasil pengujian sebagaimana tercantum pada Tabel 4.3, Tabel 4.5 dan Tabel 4.7, didapat data yang menunjukkan adanya kenaikan rata-rata ketinggian grafik pada indikasi retak yang teratur sesuai dengan kedalaman retaknya. Rata-rata ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 0.5 mm sebagaimana tercantum pada Tabel 4.3 adalah 11.2 mm. Rata-rata ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 1.0 mm sebagaimana tercantum pada Tabel 4.5 adalah 34.0 mm. Rata-rata ketinggian grafik pada indikasi-indikasi retak dengan kedalaman 1.5 mm sebagaimana tercantum pada Tabel 4.7 adalah 54.9 mm. Ketika *probe* melewati retak dengan kedalaman 0.5 mm akan menghasilkan tinggi indikasi retak yang terkecil. Kemudian tinggi indikasi retak akan membesar pada retak dengan kedalaman 1.0 mm dan tinggi indikasi retak yang terbesar dihasilkan pada retak dengan kedalaman 1.5 mm.

Dengan kata lain, saat kedalaman retak semakin besar akan mempengaruhi tinggi grafik pada indikasi retak yang akan semakin besar juga. Hal ini juga berlaku untuk frekuensi yang makin besar. Ilustrasi hubungan kedalaman retak dengan rata-rata ketinggian grafik pada indikasi retak ditunjukkan pada Gambar 4.31.



Gambar 4.31 Grafik Hubungan antara Rata-rata Ketinggian Grafik pada Indikasi Retak dengan Kedalaman Retak

4.5.2. Hubungan antara Frekuensi Probe dengan Jumlah Indikasi Retak yang Mendekati Kesesuaian

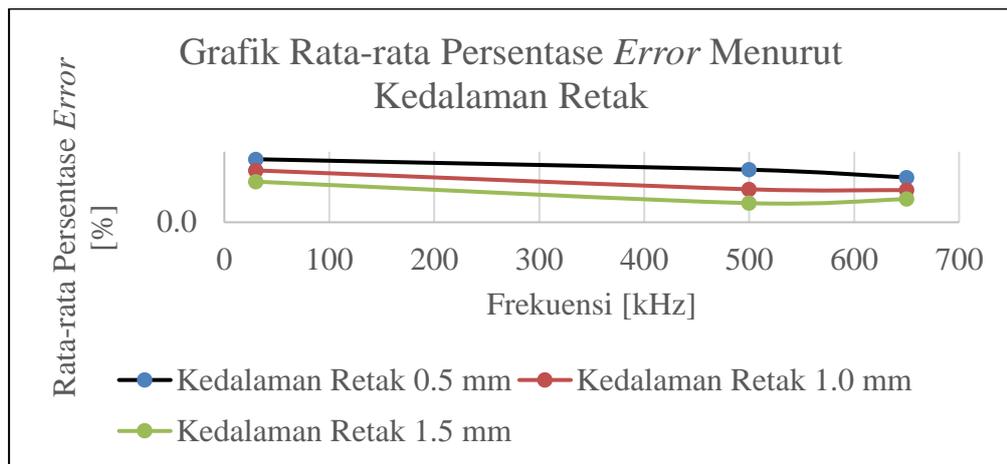
Pada pengujian *eddy current* telah didapatkan lokasi indikasi retak yang mendekati kesesuaian terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 4.4.1. Dari Tabel 4.14, Tabel 4.15 dan Tabel 4.16, didapat data yang menunjukkan adanya kenaikan jumlah lokasi-lokasi indikasi retak yang mendekati kesesuaian terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi yang teratur sesuai dengan frekuensinya. Dengan kata lain, saat frekuensi yang digunakan semakin besar akan mempengaruhi kesesuaian yang akan semakin besar juga terhadap tinggi grafik pada blok kalibrasi. Ilustrasi hubungan penggunaan frekuensi dengan jumlah lokasi indikasi retak yang mendekati kesesuaian ditunjukkan pada Gambar 4.32.



Gambar 4.32 Grafik Hubungan antara Penggunaan Frekuensi dengan Jumlah Indikasi yang Mendekati Kesesuaian

4.5.3. Hubungan antara Rata-rata Persentase Ketidaksesuaian (*Error*) dengan Variasi Penggunaan Frekuensi

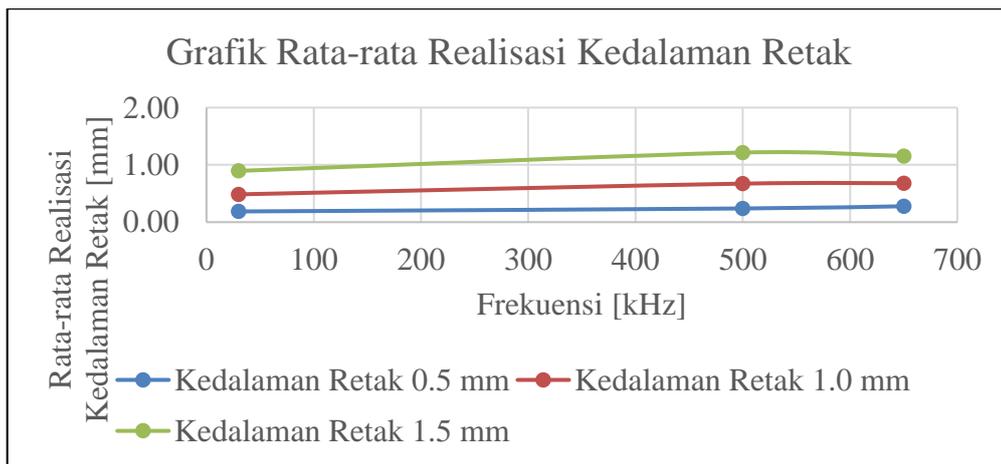
Pada pengujian *eddy current* telah didapatkan rata-rata persentase ketidaksesuaian untuk tiap kedalaman retak dan untuk tiap frekuensi yang digunakan sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 4.4.2. Dari Tabel 4.17 hingga Tabel 4.25, didapatkan data yang menunjukkan adanya penurunan rata-rata persentase ketidaksesuaian pada semua kedalaman retak yang tidak linier dengan penggunaan frekuensi yang meningkat. Dengan kata lain, saat frekuensi yang digunakan semakin besar akan mempengaruhi rata-rata persentase ketidaksesuaian yang akan semakin mengecil. Ilustrasi hubungan penggunaan frekuensi dengan rata-rata persentase ketidaksesuaian ditunjukkan pada Gambar 4.33. Seiring rata-rata persentase ketidaksesuaian yang semakin mengecil maka akurasi pengujian akan semakin meningkat.



Gambar 4.33 Grafik Hubungan antara Rata-rata Persentase *Error* dengan Frekuensi

4.5.4. Hubungan antara Rata-rata Realisasi Kedalaman Retak dengan Variasi Penggunaan Frekuensi

Pada pengujian *eddy current* telah didapatkan rata-rata realisasi kedalaman retak untuk tiap kedalaman retak dan untuk tiap frekuensi yang digunakan sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 4.4.2. Dari Tabel 4.17 hingga Tabel 4.25, didapatkan data yang menunjukkan adanya kenaikan rata-rata realisasi kedalaman retak pada semua kedalaman retak yang linier dengan penggunaan frekuensi yang meningkat. Dengan kata lain, saat frekuensi yang digunakan semakin besar akan mempengaruhi rata-rata realisasi kedalaman retak yang semakin besar. Ilustrasi hubungan penggunaan frekuensi dengan rata-rata persentase ketidaksesuaian ditunjukkan pada Gambar 4.34.



Gambar 4.35 Grafik Hubungan antara Rata-rata Realisasi Kedalaman Retak dengan Frekuensi

4.5.5. Hubungan antara Variasi Frekuensi dengan Kemampuan Kedalaman Penembusan Sinyal (*Depth of Penetration*)

Selain mempengaruhi ketinggian sinyal indikasi retak, perubahan frekuensi juga akan berpengaruh terhadap kedalaman penembusan standard atau *standard depth of penetration*. Kedalaman penembusan standard telah dibahas pada sub-bab 2.1.1.14. Salah satu parameter pengujian yang bisa dikendalikan oleh penguji yang dapat mempengaruhi kedalaman penembusan adalah frekuensi pengujian yang dialirkan ke dalam kumparan. Akan terjadi perbedaan atau perubahan kemampuan penembusan sinyal jika frekuensi yang digunakan berubah. Hasil perhitungan kedalaman penembusan standard tiap frekuensi yang digunakan dalam pengujian disajikan pada Tabel 4.26

Tabel 4.26 Hasil Perhitungan Kedalaman Penembusan Standard

Frekuensi [kHz]	Kedalaman Penembusan Standard [mm]
30	0,379
500	0,093
650	0,081

Dari delapan *test piece* yang diuji, kedalaman retak paling besar yaitu 1.5 mm yang terdapat pada Tabel 4.6. Jika dilihat pada Tabel 4.26, kedalaman penembusan standard pada frekuensi di atas hanya mampu menembus kedalaman standard maksimum sebesar 0,379 mm. Namun sinyal *eddy current* tidak langsung menghilang begitu saja. Sinyal *eddy current* memiliki kedalaman penembusan efektif atau *effective depth of penetration*; yaitu batasan efektif suatu sinyal mampu menembus kedalaman 3 kali kedalaman penembusan standard, setelah itu sinyal akan berangsur-angsur hilang. Hasil perhitungan kedalaman penembusan efektif untuk tiap frekuensi disajikan pada Tabel 4.27.

Tabel 4.27 Hasil Perhitungan Kedalaman Penembusan Efektif

Frekuensi [kHz]	Kedalaman Penembusan Standard [mm]	Kedalaman Penembusan Efektif [mm]
30	0,379	1,136
500	0,093	0,278
650	0,081	0,244

Dengan perhitungan di atas, maka pengujian *eddy current* ini memiliki kedalaman penembusan standar terbesar senilai 0.379 mm dan kedalaman penembusan efektif terbesar senilai 1.136 mm. Nilai tersebut terjadi pada *probe* 30 kHz dengan material tembaga.

Dengan menghilangkan faktor resistivitas dan permeabilitas relatif karena menggunakan material tembaga sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 2.1.1.6, maka kedalaman penembusan standar hanya bergantung pada faktor frekuensi. Kedalaman penembusan *eddy current* yang rendah pada frekuensi *probe* tinggi menggambarkan bahwa *eddy current* terpusat di permukaan.

Hasil perhitungan kedalaman penembusan efektif pada Tabel 4.27 akan dibandingkan dengan hasil pengujian pada blok kalibrasi. Blok kalibrasi yang digunakan dalam pembahasan sub-bab ini adalah sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.6. Berdasarkan pada Tabel 4.27 di atas, kedalaman penembusan efektif pada frekuensi di atas hanya mampu menembus kedalaman maksimum sebesar 1.136 mm dan minimum sebesar 0.244 mm. Sebagai referensi, tinggi sinyal indikasi retak buatan pada blok kalibrasi ditunjukkan oleh Tabel 4.1.

Tabel 4.28 Rekapitulasi Ketinggian Grafik terhadap Pengujian Blok Kalibrasi

Frekuensi [kHz]	Ketinggian Grafik untuk Kedalaman Retak [mm]			
	0.5	1.0	1.5	2,0
30	30,0	70,0	92,0	107,0
500	44,0	65,5	77,0	90,0
650	60,0	79,0	84,0	99,0

Pengukuran pada blok kalibrasi untuk mengetahui kemampuan maksimal ketiga frekuensi dalam mendeteksi adanya indikasi retak telah dilakukan. Kemampuan maksimal pendeteksian adanya indikasi retak ditandai dengan adanya selisih ketinggian sinyal yang relatif kecil atau tinggi sinyal sama saat mendeteksi kedalaman yang berbeda. Pada frekuensi 30 kHz, selisih tinggi sinyal yang relatif kecil terdapat pada saat mendeteksi kedalaman retak 2.0 mm. Hal tersebut dapat dikatakan kemampuan maksimal frekuensi 30 kHz dalam mendeteksi adanya retak mampu hingga kedalaman retak 2.0 mm. Pada frekuensi 500 dan 650 kHz, selisih tinggi sinyal yang relatif kecil terdapat pada saat mendeteksi kedalaman retak 1.5 mm. Hal tersebut dapat dikatakan kemampuan maksimal frekuensi 500 dan 650 kHz dalam mendeteksi adanya retak mampu hingga kedalaman retak 1.5 mm.

Dapat disimpulkan, perhitungan kedalaman penembusan efektif berguna untuk mengetahui kemampuan frekuensi terhadap efektivitas kedalaman penembusan sehingga dapat menghasilkan keakuratan yang tinggi. Namun ketika akan mendeteksi kedalaman retak yang melebihi kemampuan kedalaman penembusan efektif, arus *eddy* masih dapat mengindikasikan adanya retak hanya saja keakuratannya menurun hingga mencapai batasan arus *eddy* tidak bisa menembus lebih dalam lagi yang ditandai dengan selisih ketinggian sinyal indikasi retak yang kecil.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan percobaan dan penelitian maka kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengujian *eddy current* dapat mendeteksi kedalaman retak dengan hasil rata-rata ketinggian sinyal indikasi retak adalah sebagai berikut:
 - a. Untuk frekuensi 30 kHz, dengan kedalaman retak 0.5 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 11.2 mm; kedalaman retak 1.0 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 34.0 mm dan kedalaman retak 1.5 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 54.9 mm.
 - b. Untuk frekuensi 500 kHz, dengan kedalaman retak 0.5 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 21.0 mm; kedalaman retak 1.0 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 44.1 mm dan kedalaman retak 1.5 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 62.4 mm.
 - c. Untuk frekuensi 650 kHz, dengan kedalaman retak 0.5 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 33.3 mm; kedalaman retak 1.0 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 53.8 mm dan kedalaman retak 1.5 mm rata-rata ketinggian sinyal adalah 64.7 mm.
 - d. Semakin dalam suatu retak pada material maka tinggi sinyal retak akan semakin besar.
2. Semakin besar frekuensi pada *probe* yang digunakan untuk pengujian *eddy current* akan semakin meningkatkan sinyal indikasi retak yang muncul di alat pengujian *eddy current* yang ditunjukkan bertambah tingginya sinyal indikasi seiring bertambah besarnya frekuensi, dengan memperhatikan pengaturan *gain* agar hasil kalibrasi dan pengujian memiliki ketinggian grafik yang sama untuk setiap kedalaman retak.
3. Nilai kedalaman penembusan standard frekuensi 30 kHz, 500 kHz, dan 650 kHz secara urut sebesar 0.379 mm, 0.093 mm dan 0.081 mm. Sedangkan nilai kedalaman penembusan efektif secara urut sebesar 1.136 mm, 0.278 mm dan 0.244 mm. Semakin besar frekuensi pada *probe* yang digunakan untuk pengujian *eddy current* akan semakin menurunkan kemampuan kedalaman penembusan yang dibuktikan semakin menurunnya

nilai kedalaman penembusan standard dan kedalaman penembusan efektif seiring bertambahnya frekuensi. Mengingat kedalaman retak paling dalam adalah 1.5 mm yang lebih dari kedalaman penembusan efektifnya, arus *eddy* masih dapat mengindikasikan adanya retak hanya saja keakuratannya menurun hingga mencapai batasan arus *eddy* tidak bisa menembus lebih dalam lagi.

5.2. Saran

Penelitian ini menggunakan material tembaga tanpa pengelasan. Penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan dengan melibatkan proses pengelasan dan dilakukan pengaturan *gain* pada setiap frekuensi agar tampilan grafik sinyal sama secara visual dan tinggi grafik sinyal sama besar untuk masing-masing kedalaman retak.

DAFTAR PUSTAKA

- American Welding Society. (2008). *Welding Inspection Technology* (5th ed.). Miami: American Welding Society.
- Blitz, J. (1997). *Electrical and Magnetic Methods of Non-Destructive Testing*. London: Chapman & Hall.
- Carlton, J. S. (2007). *Marine Propellers and Propulsion*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Cox, J. (1997). *Nondestructive Testing: Eddy Current*. Mount Pleasant: PH Diversified Inc.
- Grote, K.-H., & Antonsson, E. K. (2009). *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. Heidelberg: Springer.
- Hagemaiier, D. J. (2002). *Fundamentals of Eddy Current Testing*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing.
- Himpunan Mahasiswa Teknik Pengelasan PPNS. (2015, June 1). *Electric Discharge Machining*. Diambil kembali dari Himpunan Mahasiswa Teknik Pengelasan PPNS: <http://hima-tl.ppons.ac.id/electric-discharge-machining/>
- Integrated Publishing, Inc. (n.d.). *TM-1-1500-335-23 Nondestructive Inspection Methods Manual*. Retrieved from Integrated Publishing: http://chemical-biological.tpub.com/TM-1-1500-335-23/css/TM-1-1500-335-23_367.htm
- Mix, P. E. (2005). *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Mufti, N., & Putra, W. H. (2016). *Analisis Pengaruh Ketebalan Nonconductive Coating terhadap Pendeteksian Panjang dan Kedalaman Retak pada Sambungan Las Material Baja Karbon A36 di Pondasi Mesin dengan Metode Eddy Current Testing (ECT)*. Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan FTK ITS.
- NDT Resource Center. (2014). *Impedance Plane*. Retrieved from NDT Resource Center: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Instrumentation/impedanceplane.htm>
- NDT Technologies (P) Limited. (2017). *Eddy Current Testing*. Retrieved from NDT Technologies (P) Limited: http://www.ndttechnologies.com/products/eddy_current_testing.html
- Olympus Inspection Solutions. (n.d.). *Depth of Penetration*. Retrieved from Eddy Current Array Tutorial: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/eca-tutorial/what-is-eca/depth/>
- Poco Graphite. (2003). *EDM Machines*. Retrieved from EDM Technical Manual: <http://www.edmtechman.com/about.cfm?pg=2&chap=1#a3>
- Prüftechnik. (2019). *Encircling Coils: Eddy Current Sensors*. Retrieved from Prüftechnik: <https://www.pruftechnik.com/com/Products-and-Services/Nondestructive-Testing-Systems/Eddy-Current/Sensors-and-Accessories/Encircling-coils/>
- Putra, W. H. (2015). *Training Handout Eddy Current Testing: General*. Surabaya: NDE Center - Department of Naval Architecture and Shipbuilding Engineering ITS.
- Razak, A. S. (1990). *Eddy Current: Classroom Training Handbook*. Johor Bahru: Universiti Teknologi Malaysia.
- Sadek, H. (2006). *Electromagnetic Testing: Classroom Training Book*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing.

- Singh, R. (2015). *Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- The American Society for Nondestructive Testing. (2004). *Nondestructive Testing Handbook: Electromagnetic Testing*. Columbus: The American Society for Nondestructive Testing.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2015). *ASME Boiler and Pressure Vessel Section V*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- Workman, G. L., & Moore, P. O. (2012). *Nondestructive Testing Overview*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing.
- Yolken, H. T. (2007). Selecting a Nondestructive Testing Method: Eddy Current Testing. *AMMTIAC Quarterly*, pp. 7-11.

LAMPIRAN

Lampiran A	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 0.5 mm dengan Probe 30 kHz
Lampiran B	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.0 mm dengan Probe 30 kHz
Lampiran C	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.5 mm dengan Probe 30 kHz
Lampiran D	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 0.5 mm dengan Probe 500 kHz
Lampiran E	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.0 mm dengan Probe 500 kHz
Lampiran F	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.5 mm dengan Probe 500 kHz
Lampiran G	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 0.5 mm dengan Probe 650 kHz
Lampiran H	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.0 mm dengan Probe 650 kHz
Lampiran I	Hasil Pemindaian Kedalaman Retak 1.5 mm dengan Probe 650 kHz
Lampiran J	Hasil Retak Buatan pada Material

LAMPIRAN A
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 0.5 MM
DENGAN PROBE 30 KHZ

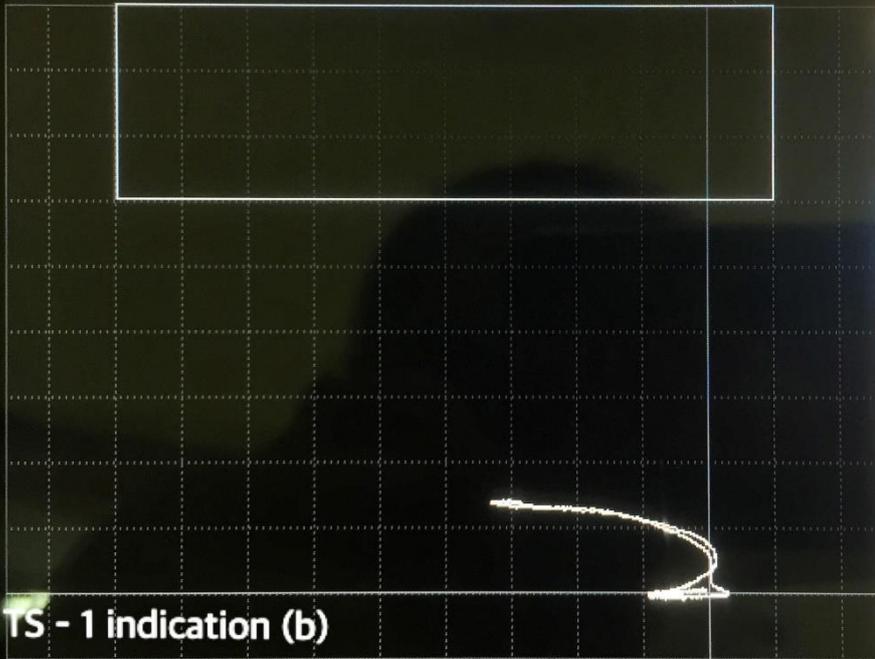
OLYMPUS

04/12/2019 12:16



Vmx 1.4

F



TS - 1 indication (b)

FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

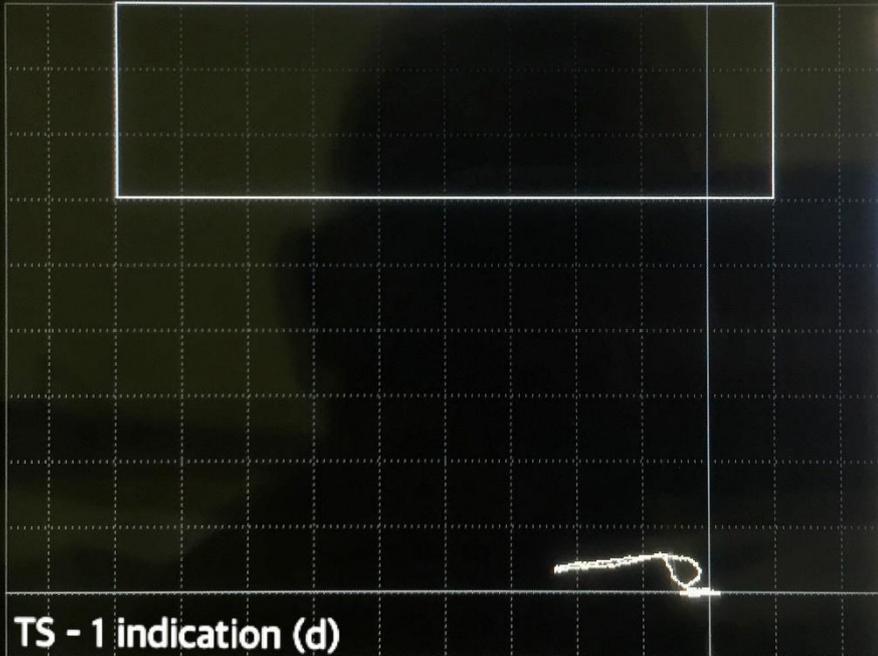
OLYMPUS

04/12/2019 12:35



Vmx 0.5

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

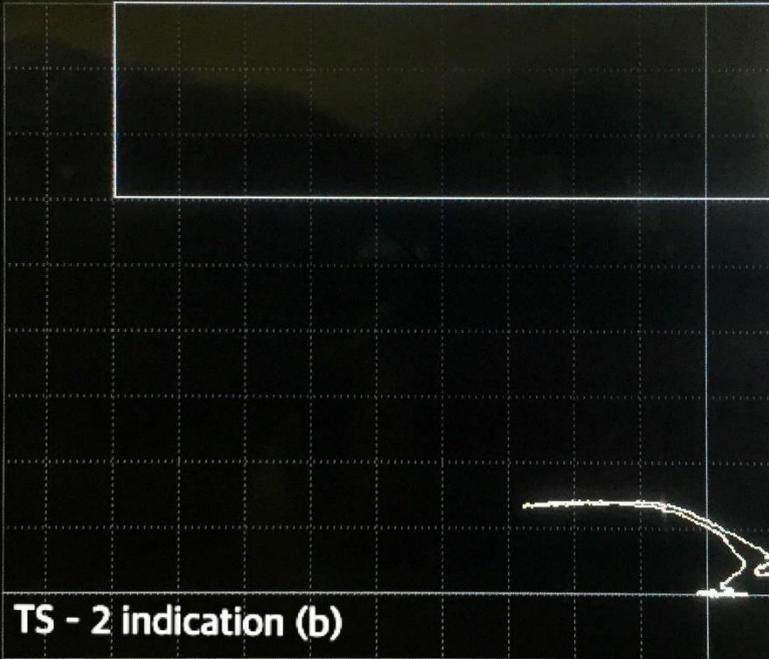
OLYMPUS

03/12/2019 14:14



Vmx 1.4

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H.GAIN

61.3dB

V.GAIN

69.5dB

TS - 2 indication (b)

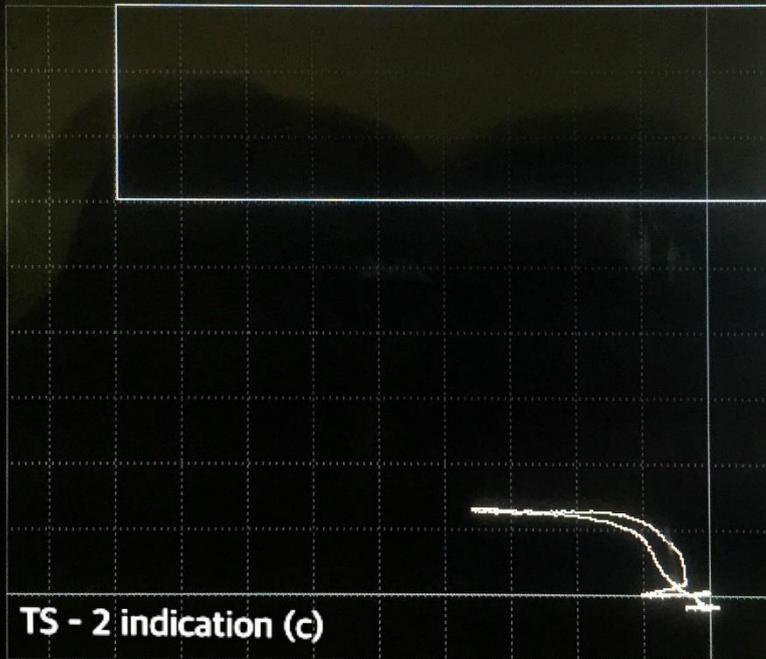
OLYMPUS

03/12/2019 14:15



Vmx 1.3

F



TS - 2 indication (c)

FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H.GAIN

61.3dB

V.GAIN

69.5dB

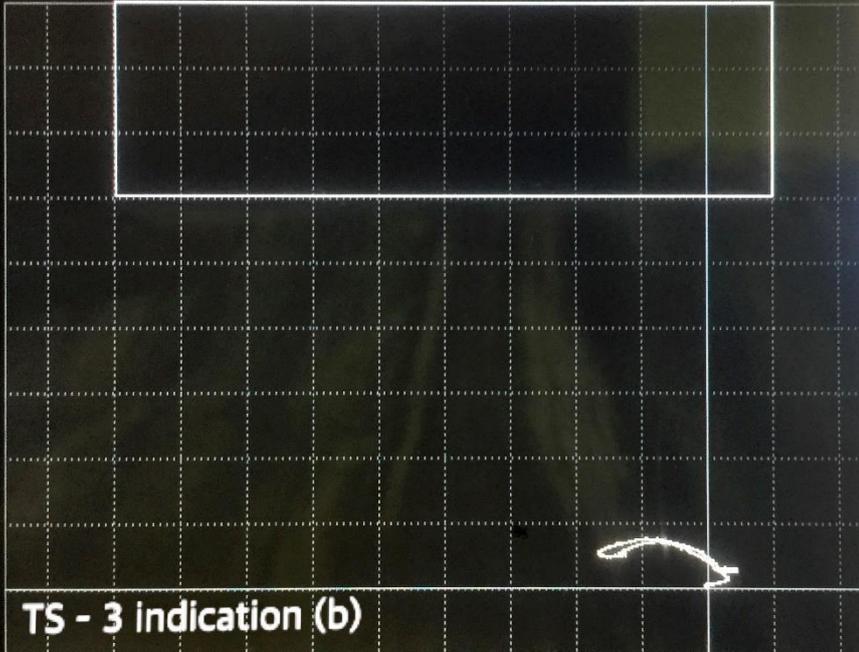
OLYMPUS

03/12/2019 13:47



Vmx 0.7

F



TS - 3 indication (b)

FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H.GAIN

61.3dB

V.GAIN

69.5dB

OLYMPUS

03/12/2019 13:56



Vmx 0.6

F

FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.0deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 3 indication (d)



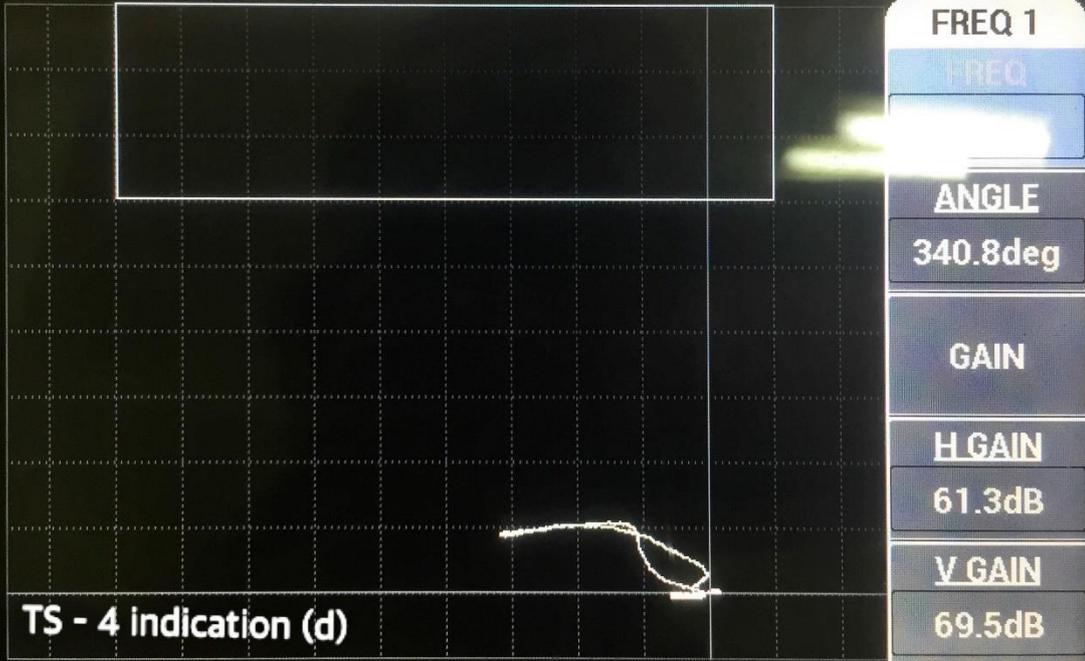
OLYMPUS

03/12/2019 16:09



Vmx 1.0

F



FREQ 1

FREQ

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 4 indication (d)

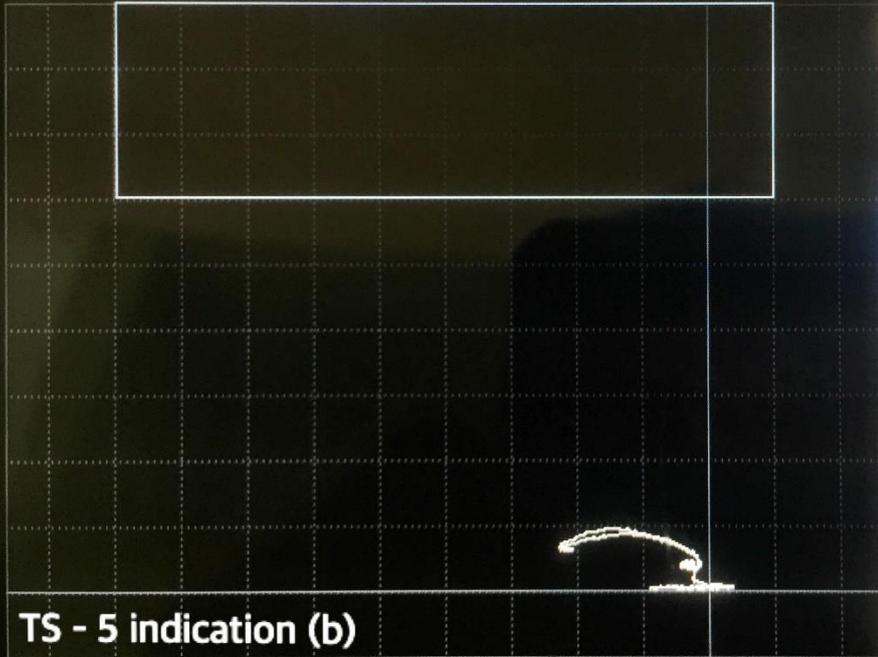
OLYMPUS

03/12/2019 13:14



Vmx 0.9

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 5 indication (b)

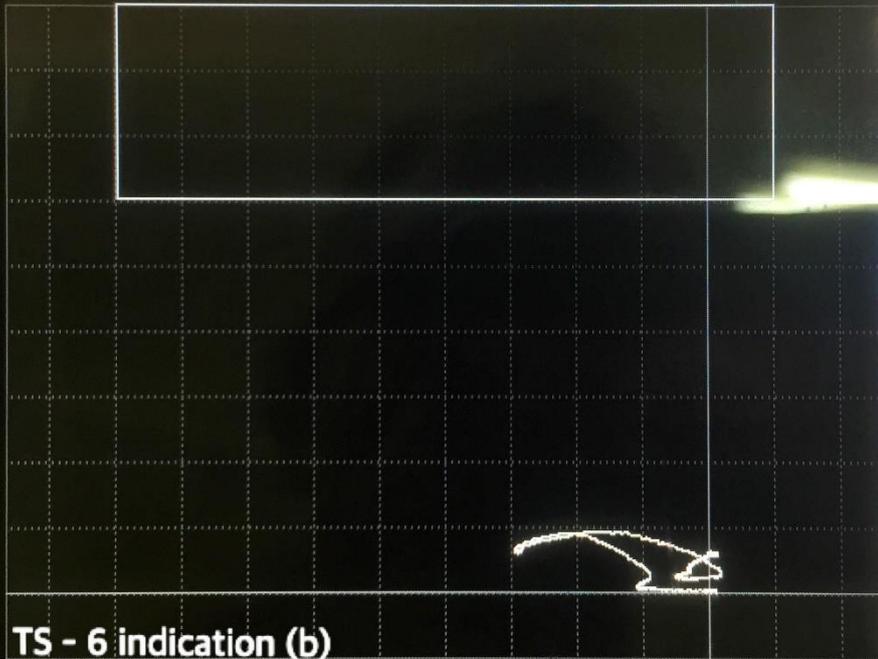
OLYMPUS

03/12/2019 14:33



Vmx 0.9

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

OLYMPUS

03/12/2019 15:58



Vmx 0.7

F

FREQ 1

FREQ

30kHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 7 indication (b)



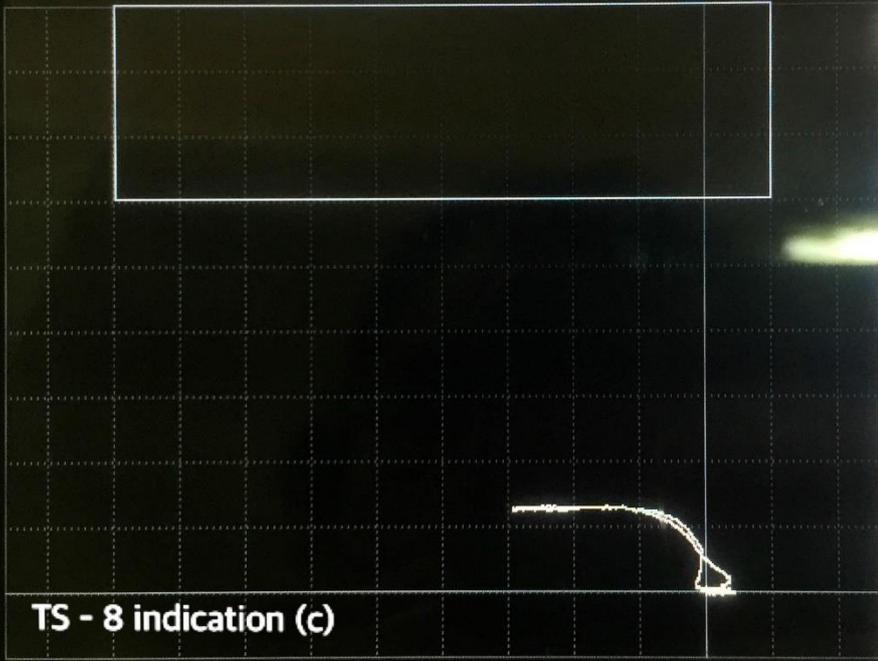
OLYMPUS

03/12/2019 14:04



Vmx 1.3

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

LAMPIRAN B
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 1.0 MM
DENGAN PROBE 30 KHZ

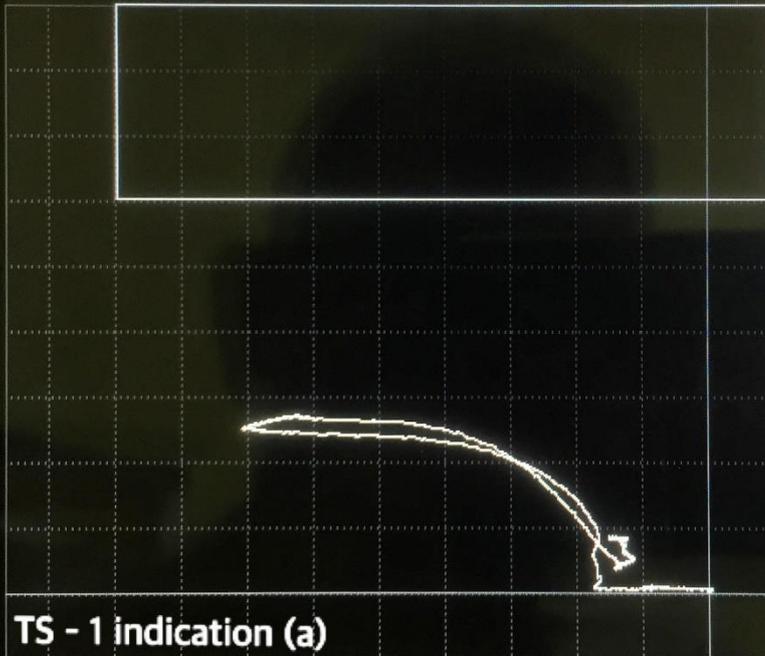
OLYMPUS

04/12/2019 12:35



Vmx 2.7

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 1 indication (a)

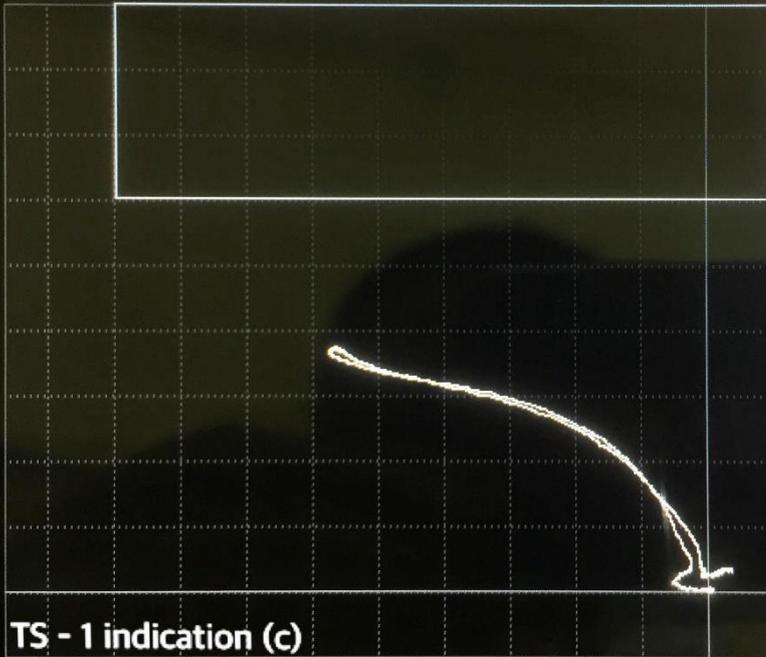
OLYMPUS

04/12/2019 12:15



Vmx 3.7

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 1 indication (c)

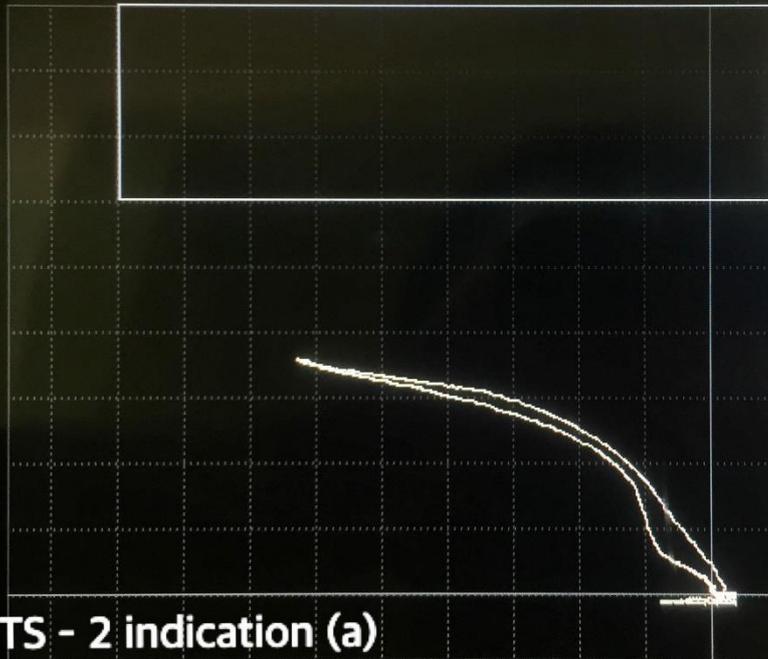
OLYMPUS

03/12/2019 14:11



Vmx 3.6

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

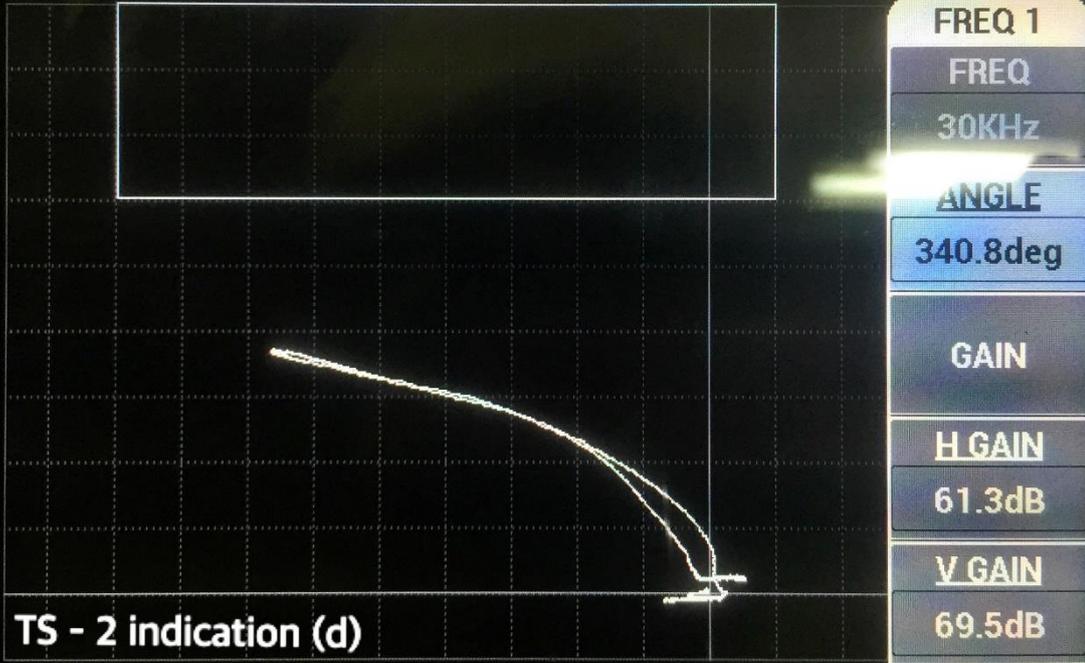
OLYMPUS

03/12/2019 14:16



Vmx 3.7

F



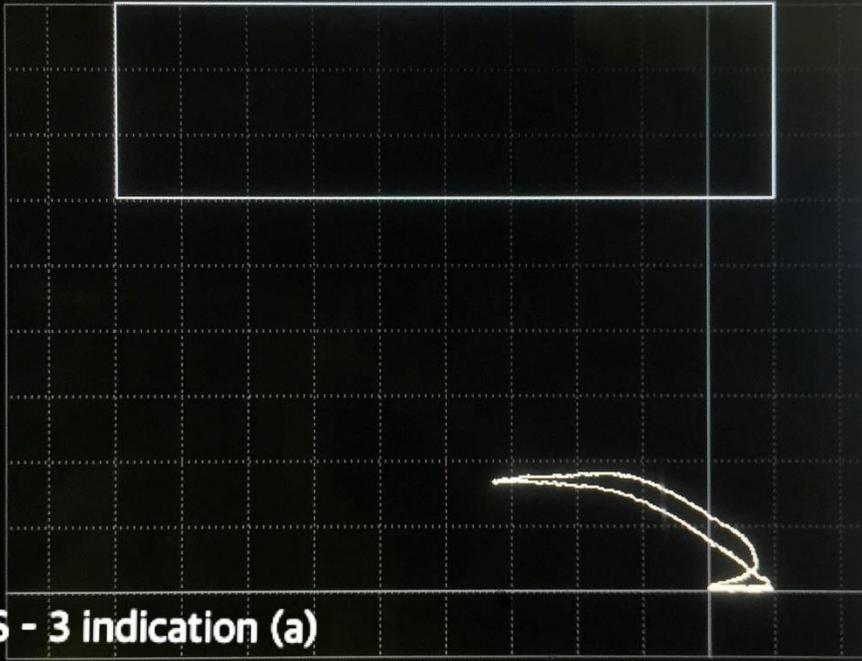
OLYMPUS

03/12/2019 13:45



Vmx 1.8

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 3 indication (a)

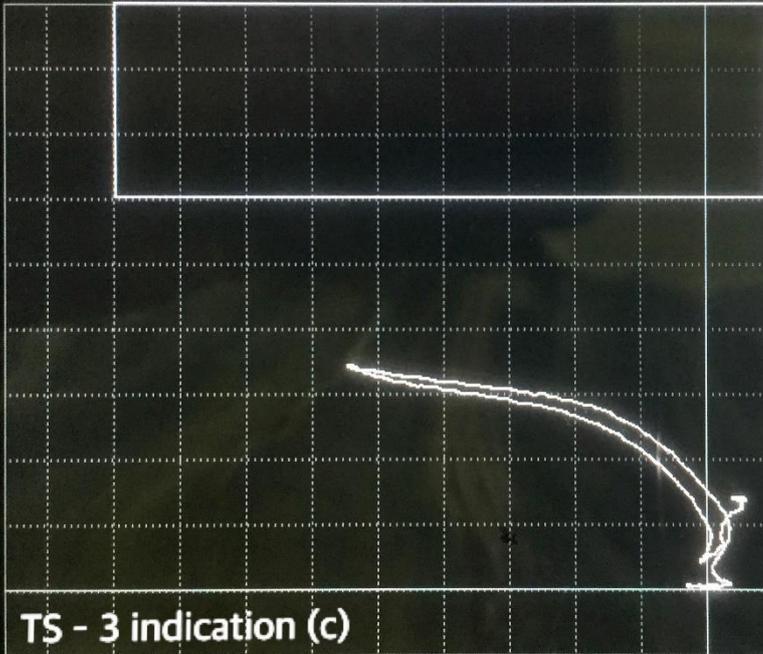
OLYMPUS

03/12/2019 13:49



Vmx 3.4

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H.GAIN

61.3dB

V.GAIN

69.5dB

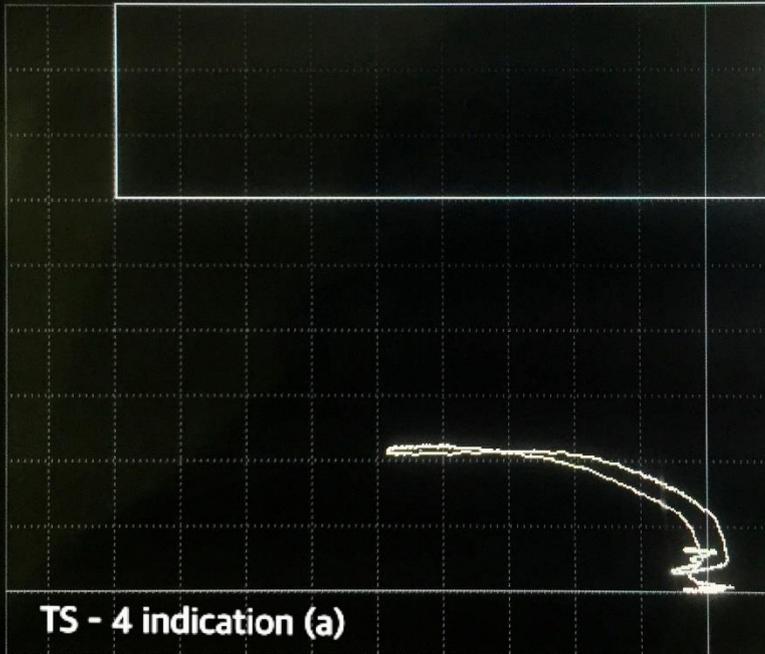
OLYMPUS

03/12/2019 16:07



Vmx 2.2

F



FREQ 1

FREQ

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

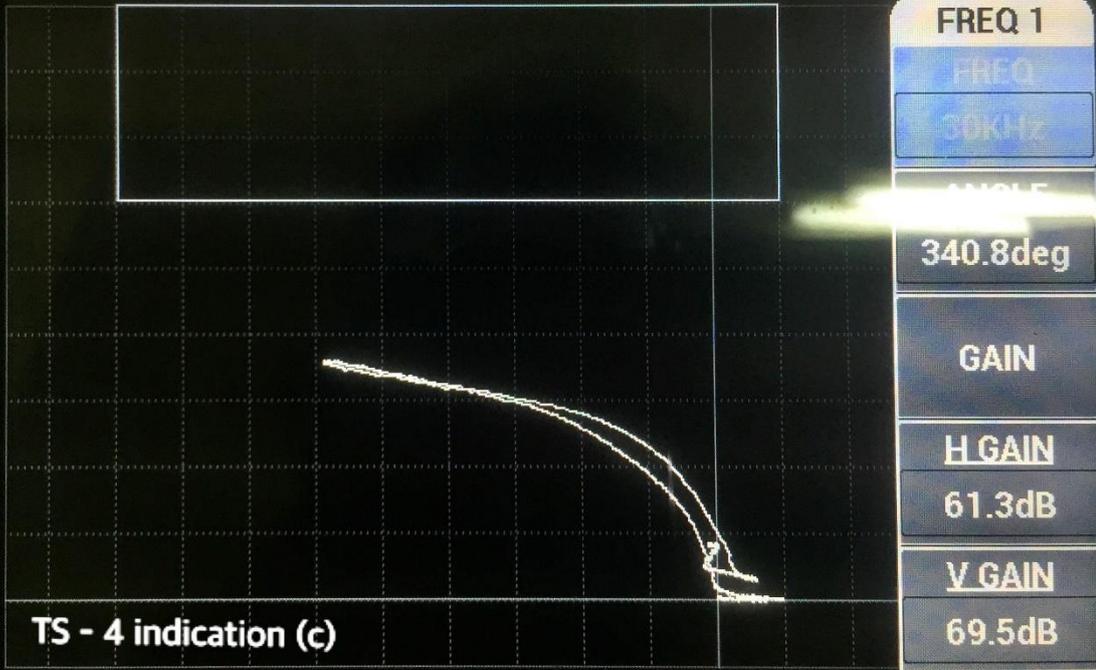
OLYMPUS

03/12/2019 16:08



Vmx 3.6

F



FREQ 1

FREQ

30kHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

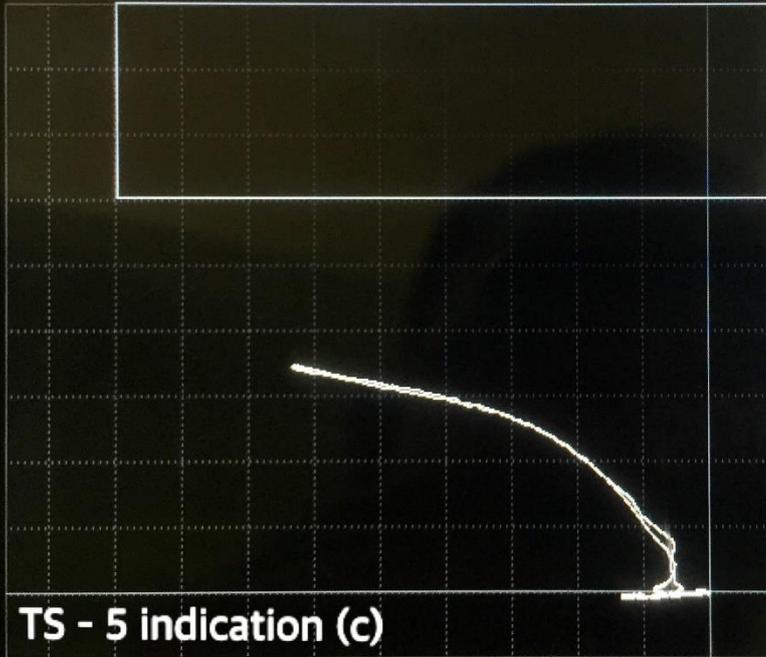
OLYMPUS

03/12/2019 13:11



Vmx 3.4

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

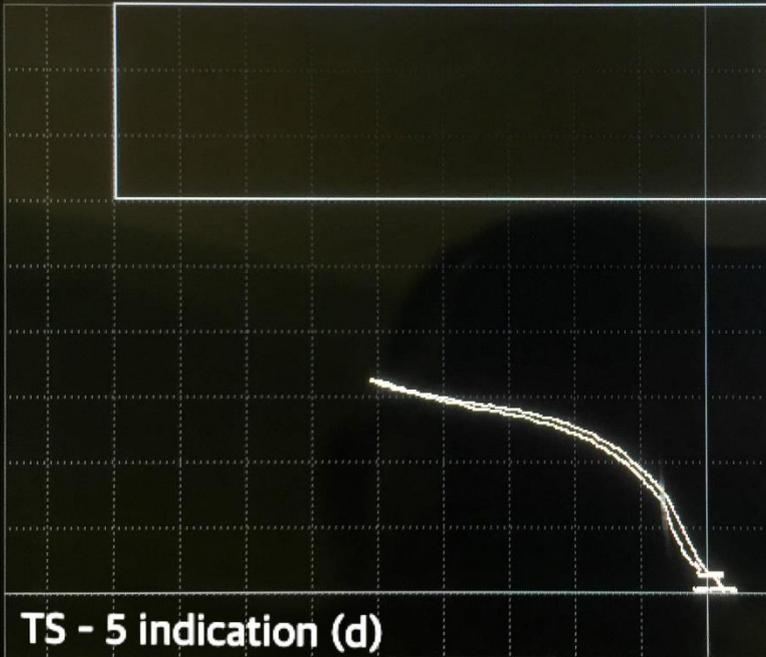
OLYMPUS

03/12/2019 13:10



Vmx 3.2

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 5 indication (d)

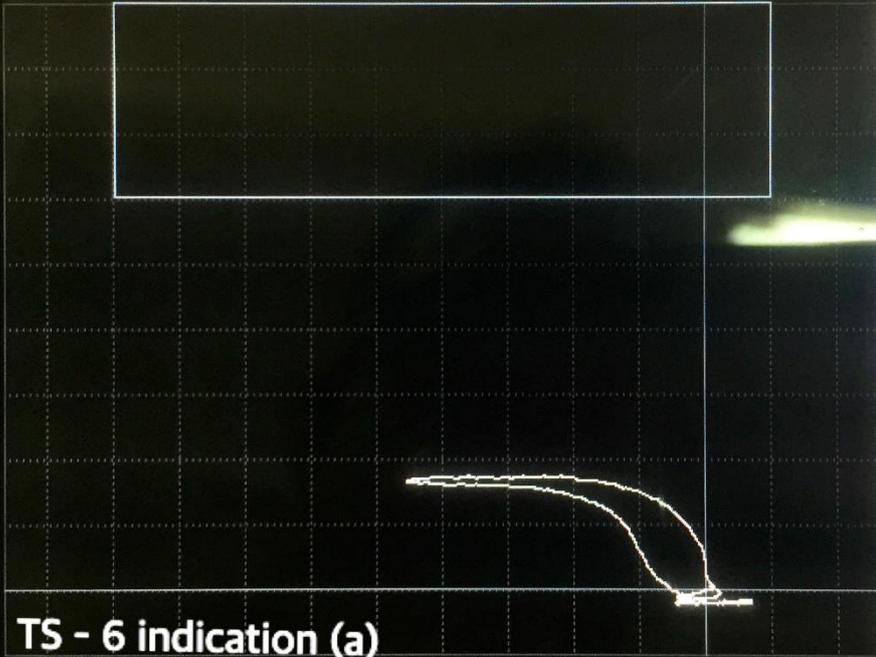
OLYMPUS

03/12/2019 14:34



Vmx 1.7

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

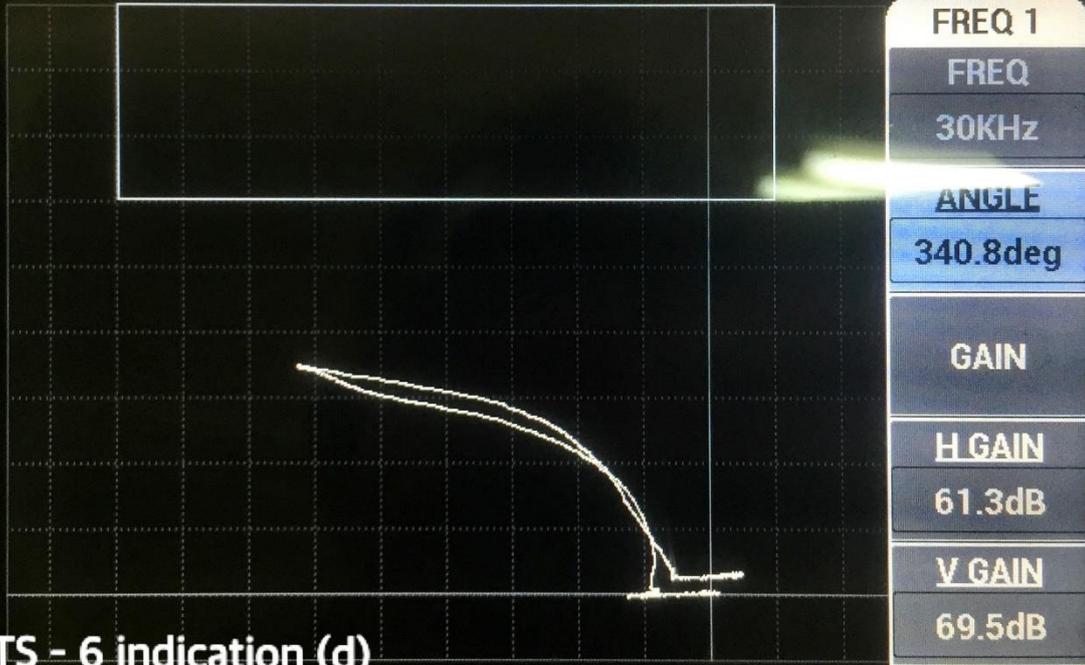
OLYMPUS

03/12/2019 14:28



Vmx 3.5

F



TS - 6 indication (d)

OLYMPUS

03/12/2019 15:59



Vmx 1.7

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

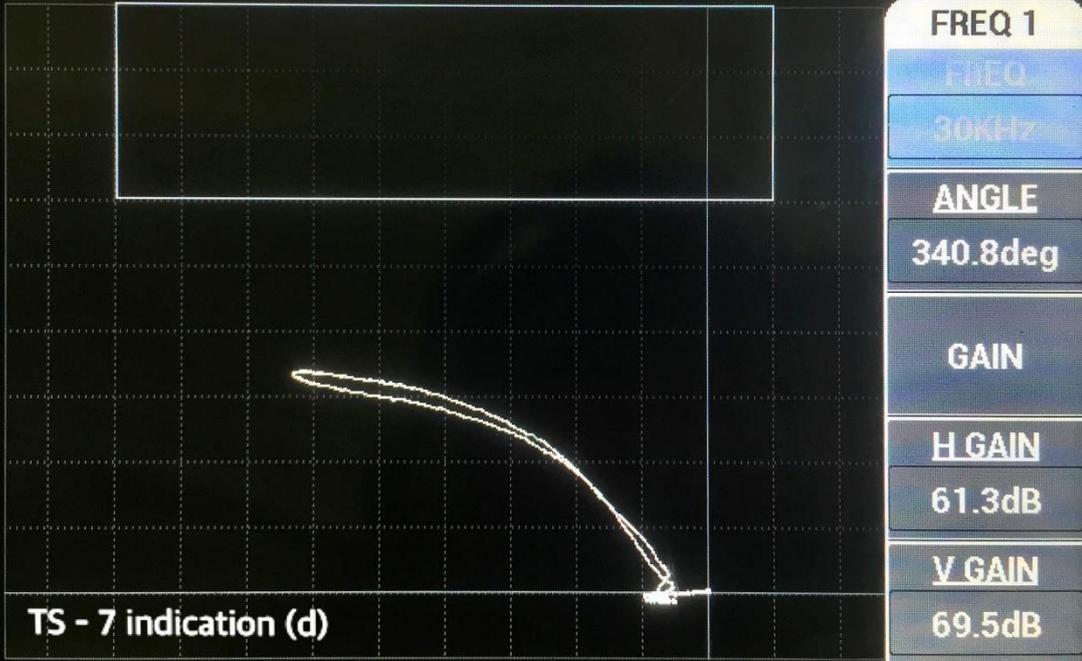
OLYMPUS

03/12/2019 16:00



Vmx 3.4

F



FREQ 1

FREQ

30kHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

OLYMPUS

03/12/2019 14:02



Vmx 2.9

F

FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

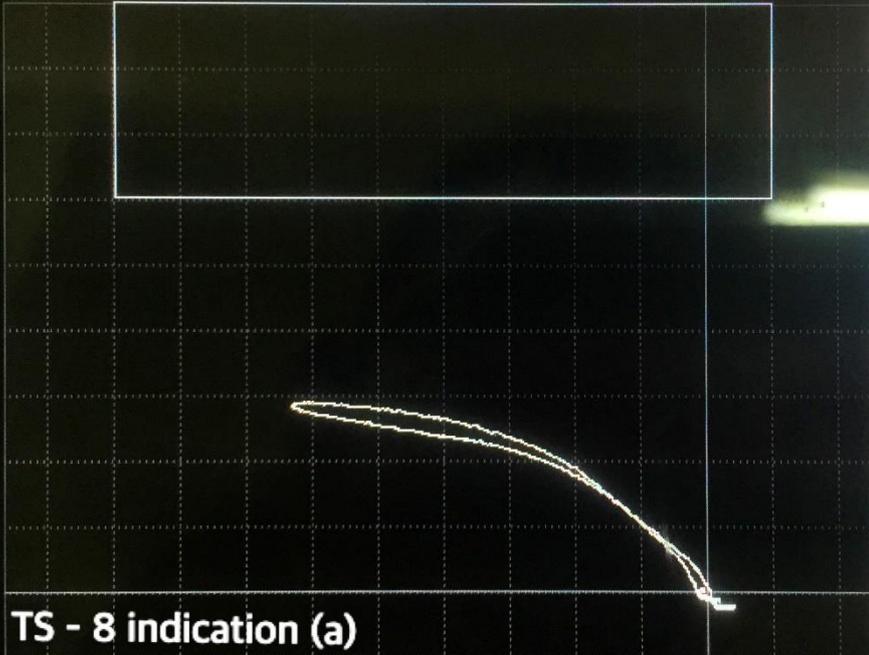
H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 8 indication (a)



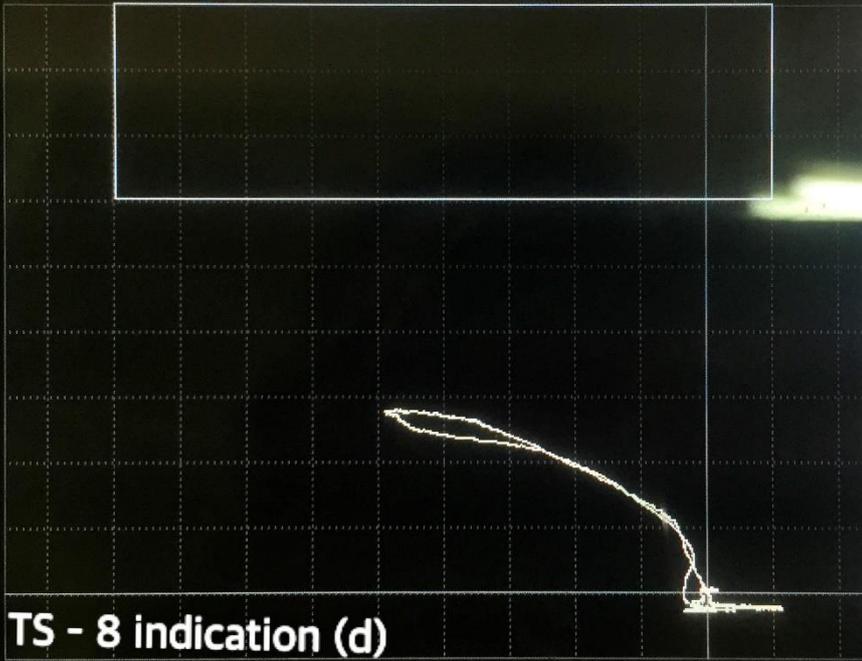
OLYMPUS

03/12/2019 14:05



Vmx 2.8

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

LAMPIRAN C
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 1.5 MM
DENGAN PROBE 30 KHZ

OLYMPUS

03/12/2019 16:07



Vmx 4.7

F

FREQ 1

FREQ

ANGLE

340.8deg

GAIN

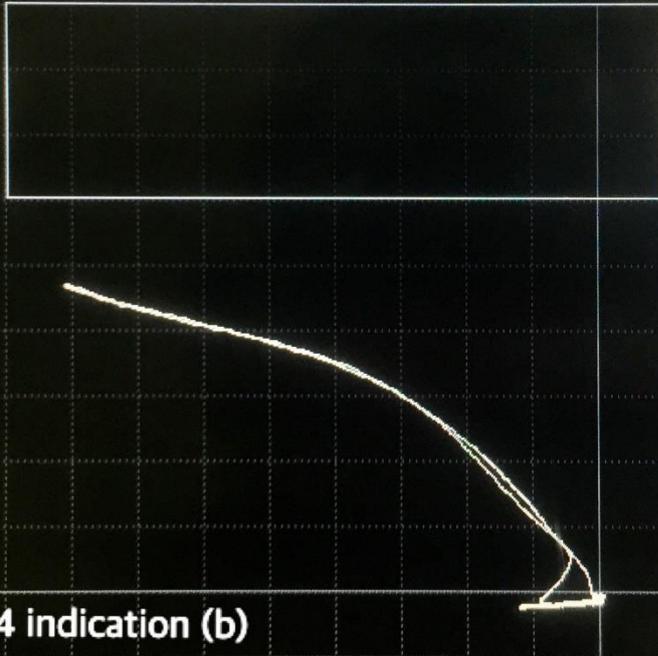
H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 4 indication (b)



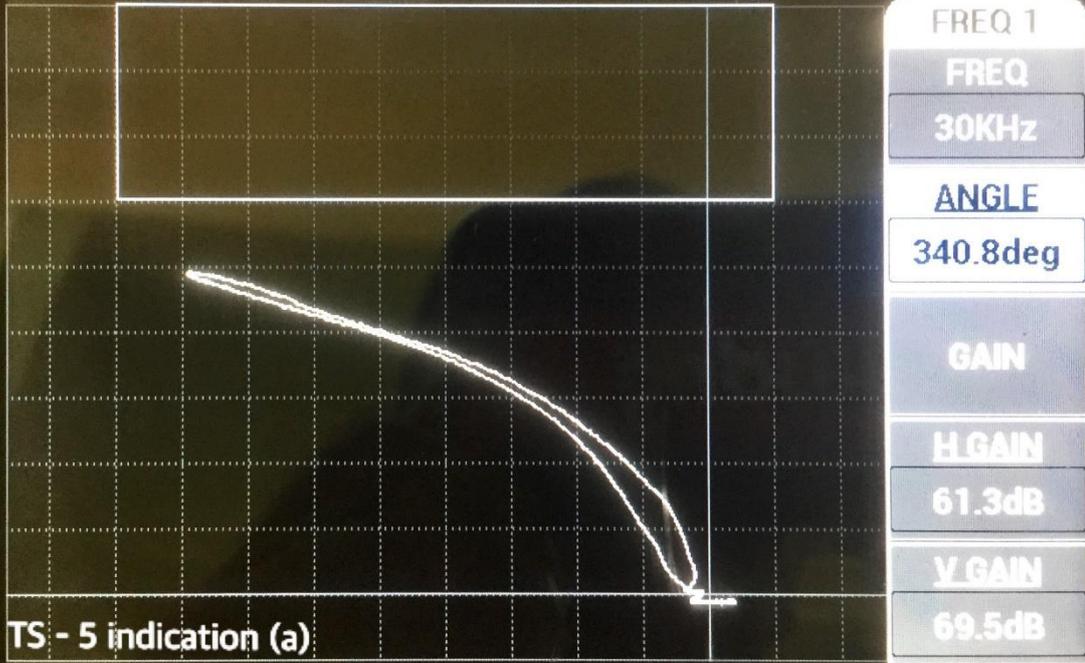
OLYMPUS

03/12/2019 13:15



Vmx 4.9

F



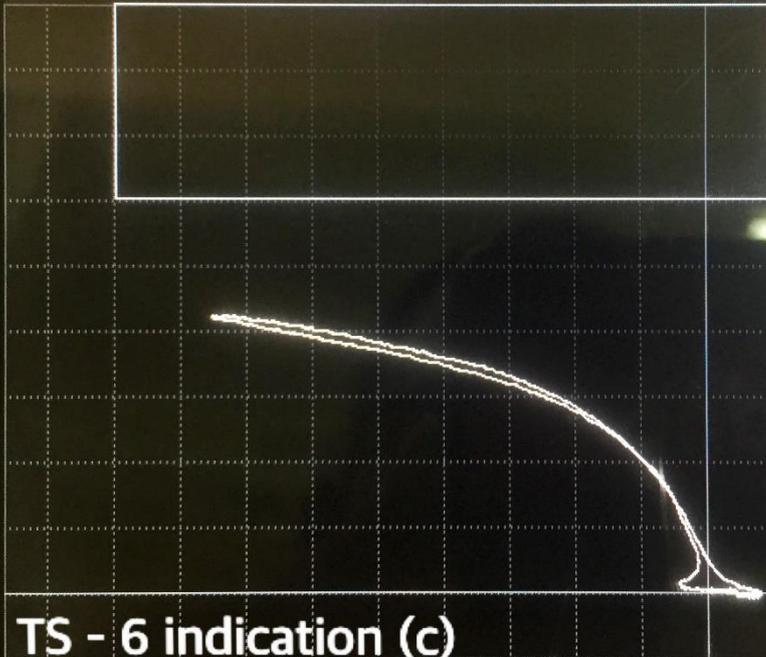
OLYMPUS

03/12/2019 14:29



Vmx 4.2

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

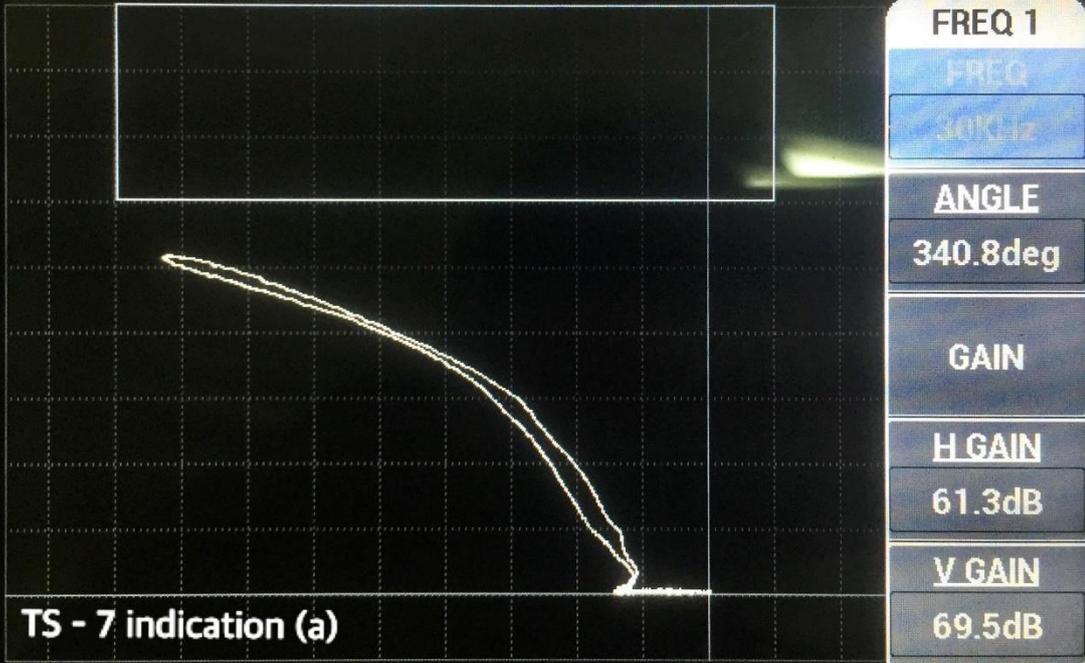
OLYMPUS

03/12/2019 15:56



Vmx 5.2

F



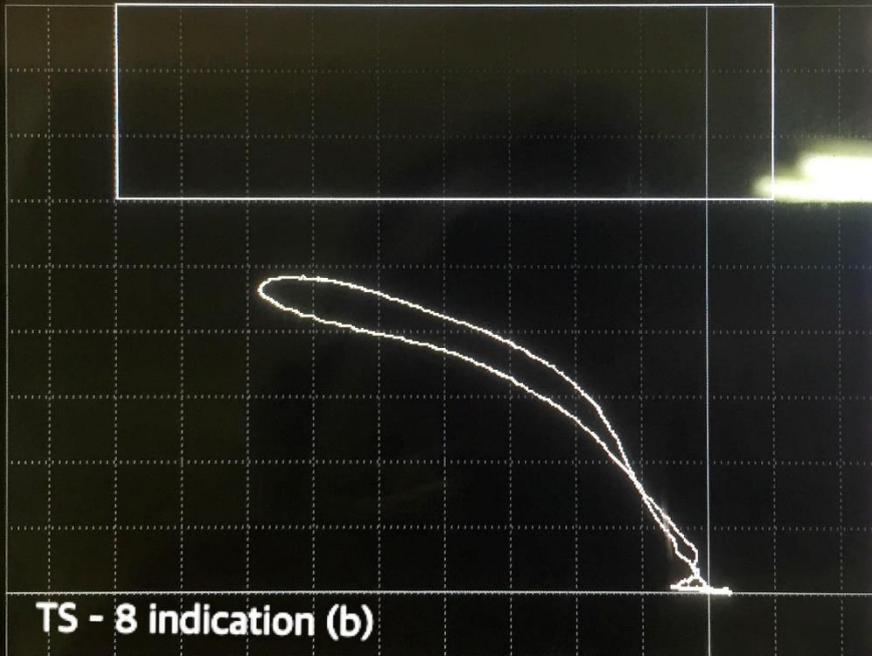
OLYMPUS

03/12/2019 14:03



Vmx 4.8

F



FREQ 1

FREQ

30KHz

ANGLE

340.8deg

GAIN

H GAIN

61.3dB

V GAIN

69.5dB

TS - 8 indication (b)

LAMPIRAN D
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 0.5 MM
DENGAN PROBE 500 KHZ

OLYMPUS

20/11/2019 11:41



Vmx 2.4

F

FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

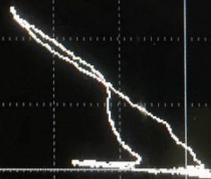
H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 1 indication (b)



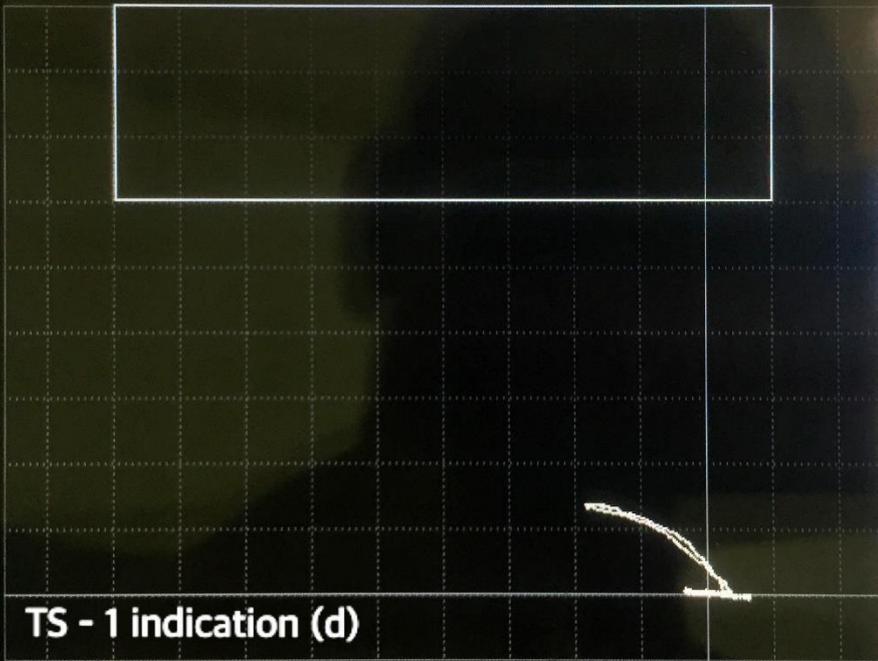
OLYMPUS

25/11/2019 12:07



Vmx 1.3

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

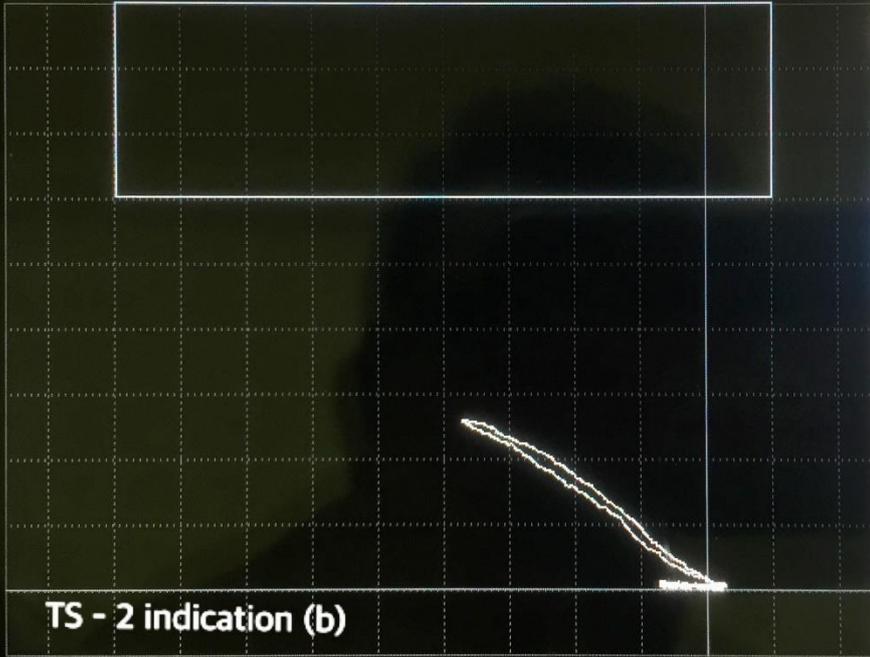
OLYMPUS

25/11/2019 15:18



Vmx 2.6

F



TS - 2 indication (b)

FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

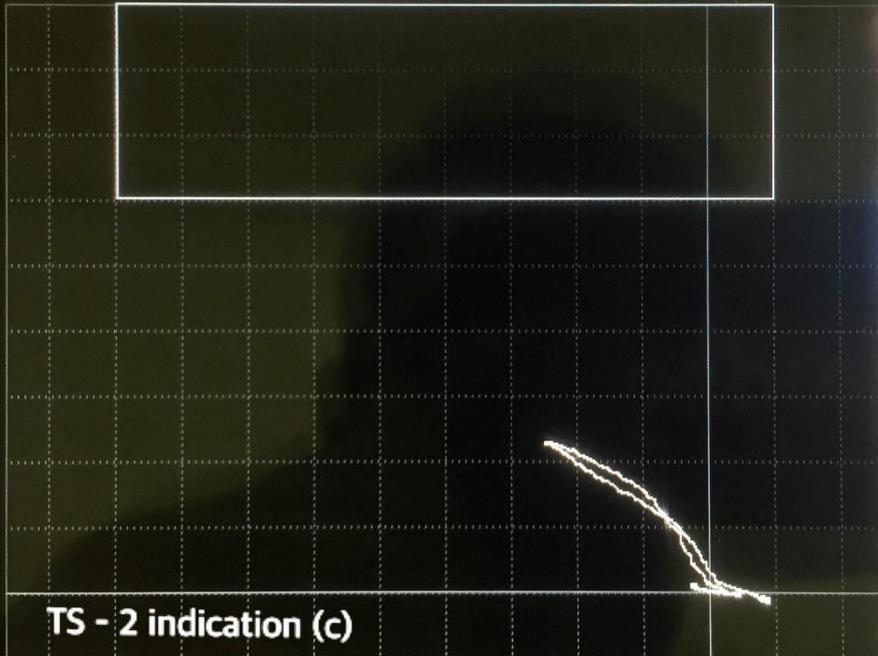
OLYMPUS

25/11/2019 15:16



Vmx 2.3

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

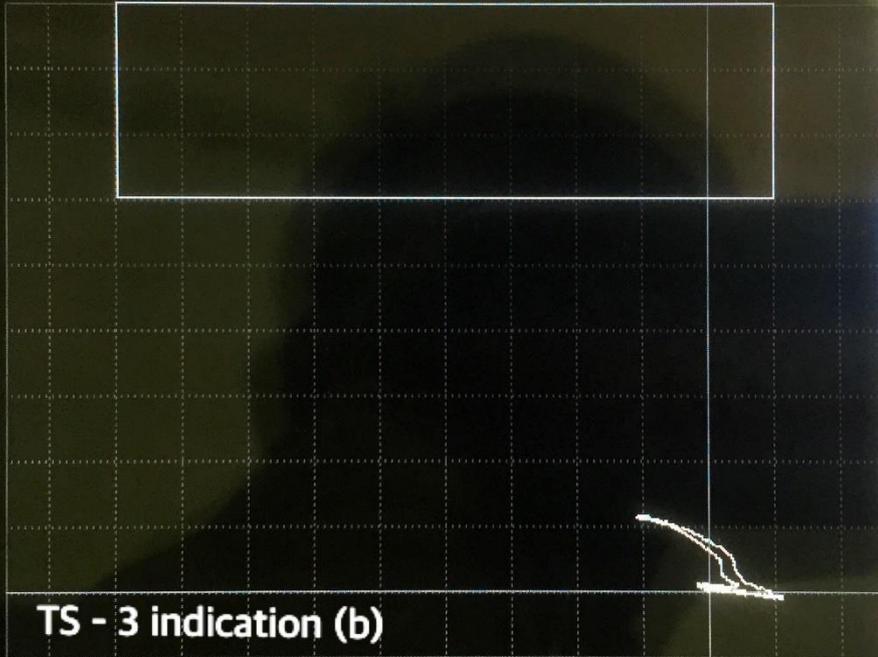
OLYMPUS

25/11/2019 11:58



Vmx 1.1

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 3 indication (b)

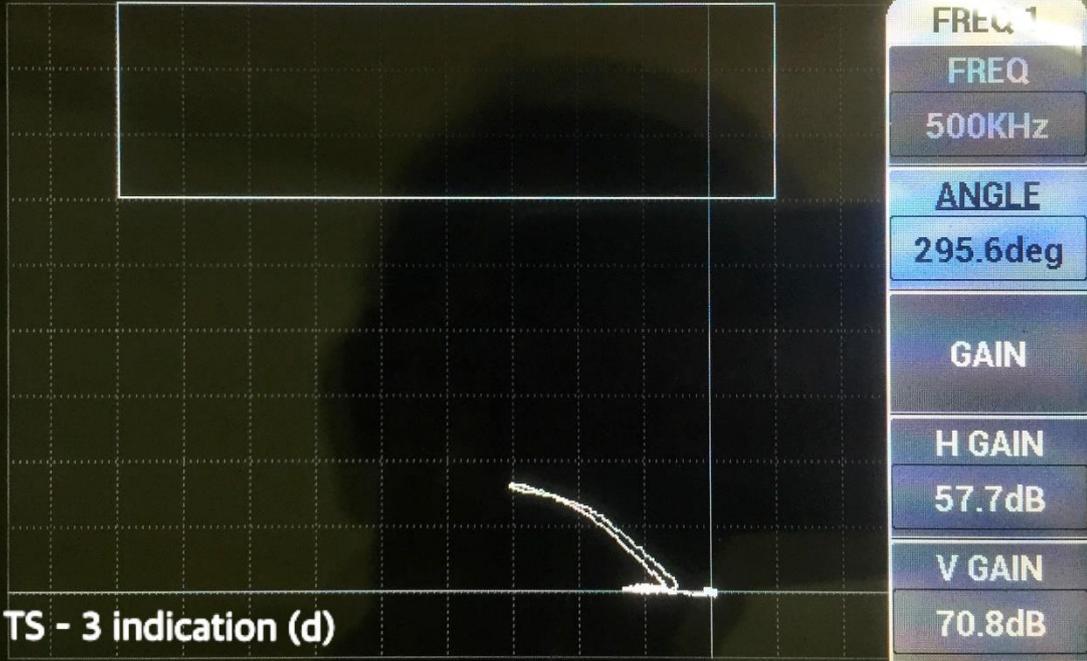
OLYMPUS

25/11/2019 11:49



Vmx 1.6

F



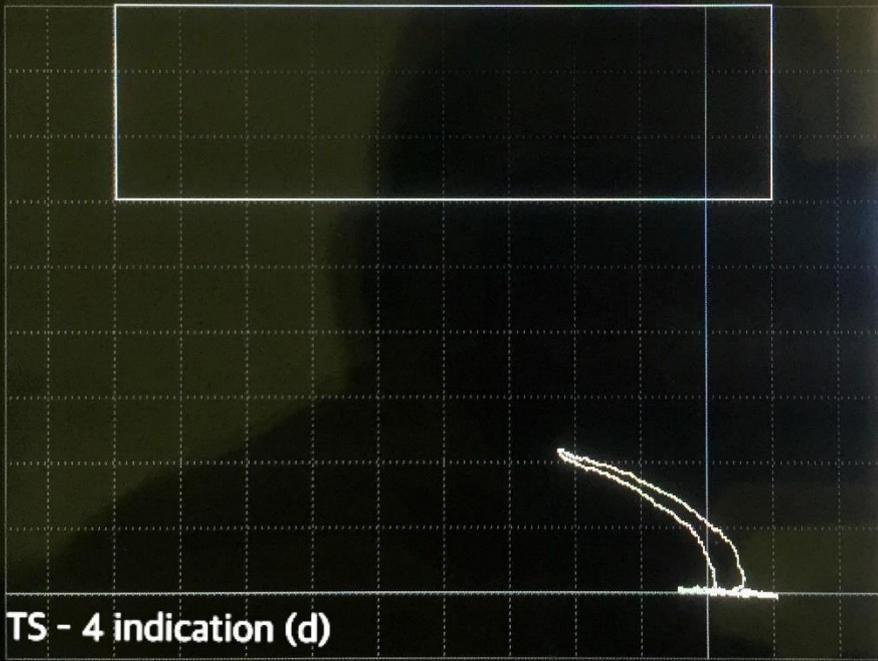
OLYMPUS

25/11/2019 12:49



Vmx 2.2

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

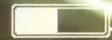
V GAIN

70.8dB

TS - 4 indication (d)

OLYMPUS

25/11/2019 12:34



Vmx 1.6

F

FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 5 indication (b)



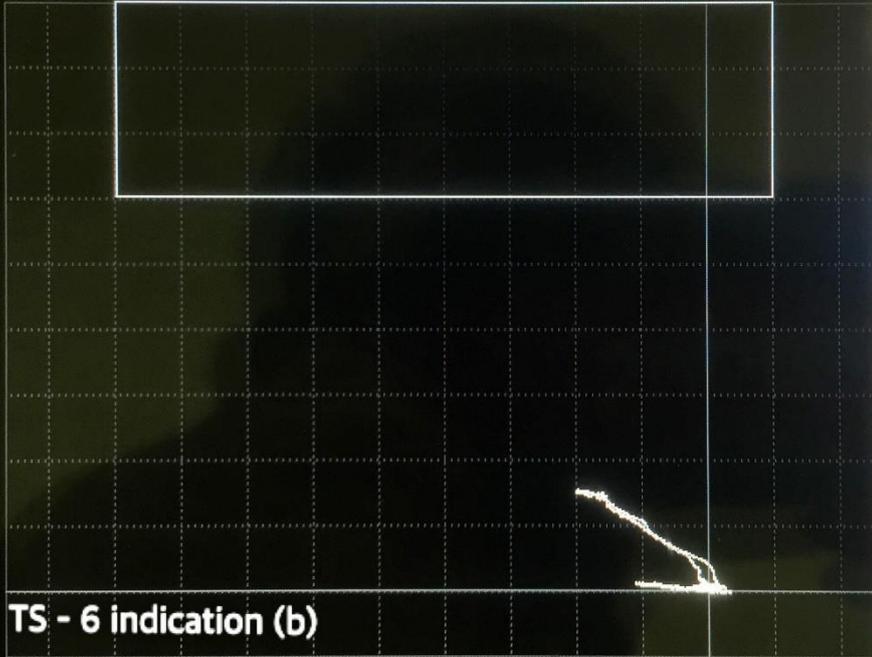
OLYMPUS

25/11/2019 15:46



Vmx 1.5

F



TS - 6 indication (b)

FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

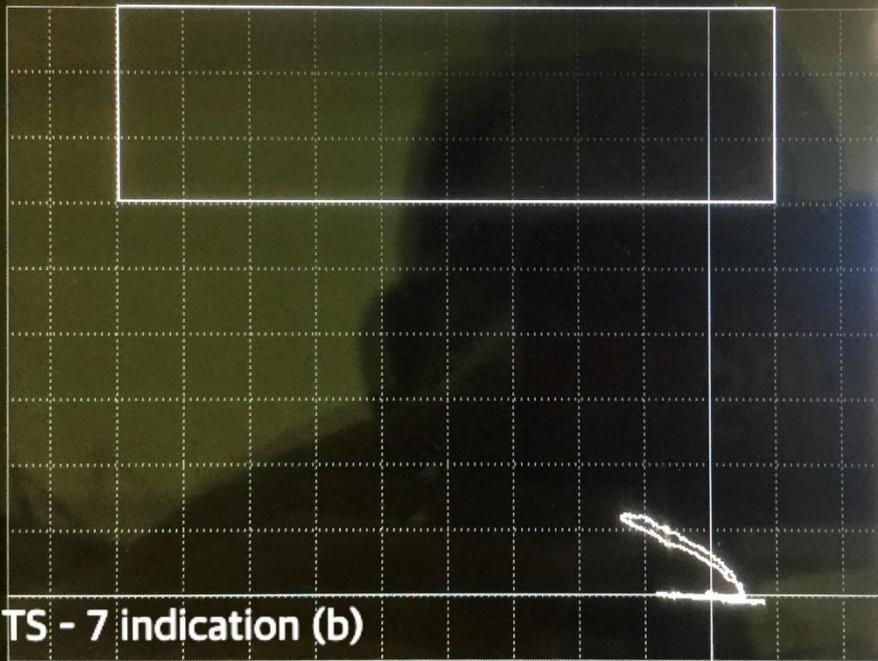
OLYMPUS

25/11/2019 14:04



Vmx 1.2

F



TS - 7 indication (b)

FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

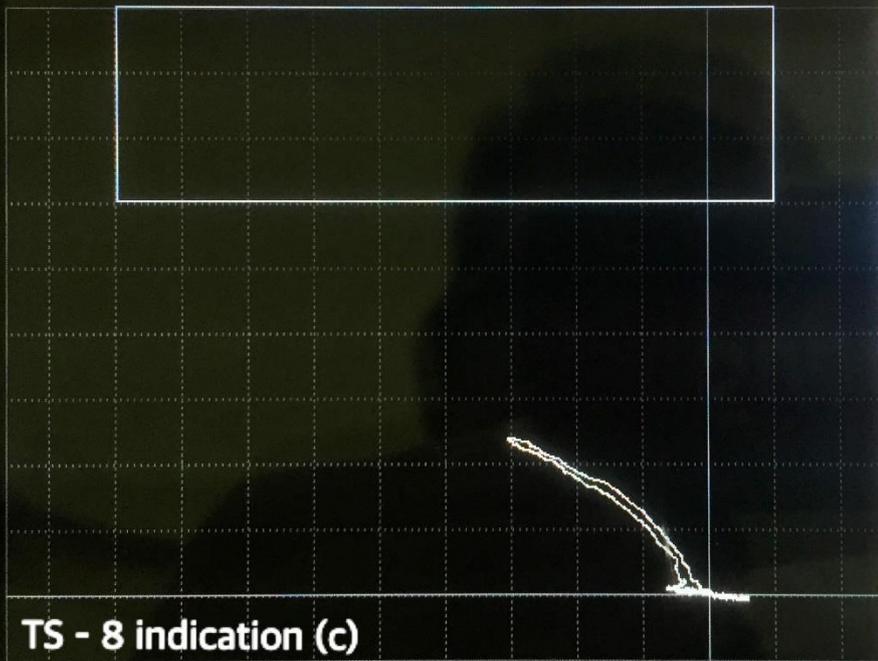
OLYMPUS

25/11/2019 14:31



Vmx 2.4

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 8 indication (c)

LAMPIRAN E
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 1.0 MM
DENGAN PROBE 500 KHZ

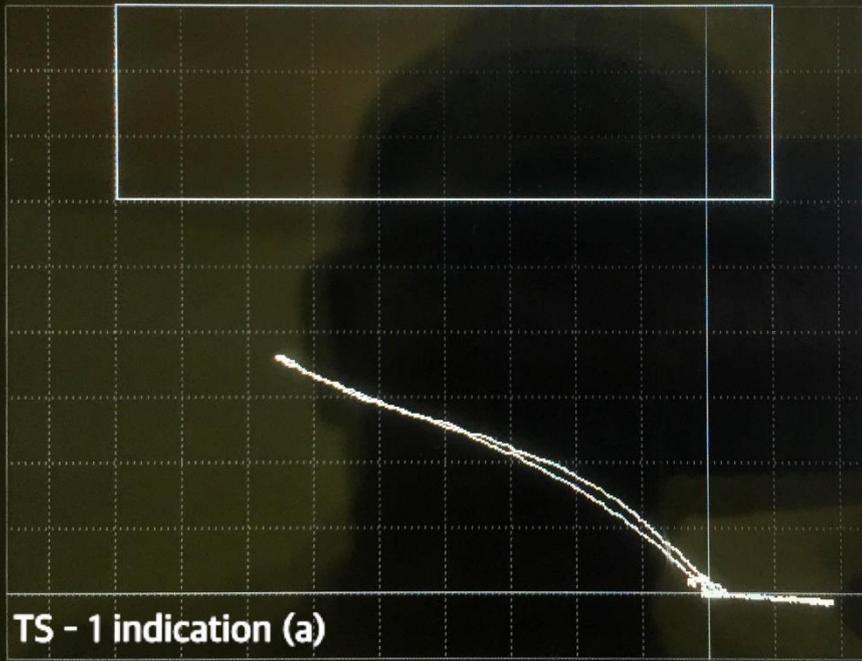
OLYMPUS

26/11/2019 11:51



Vmx 3.6

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

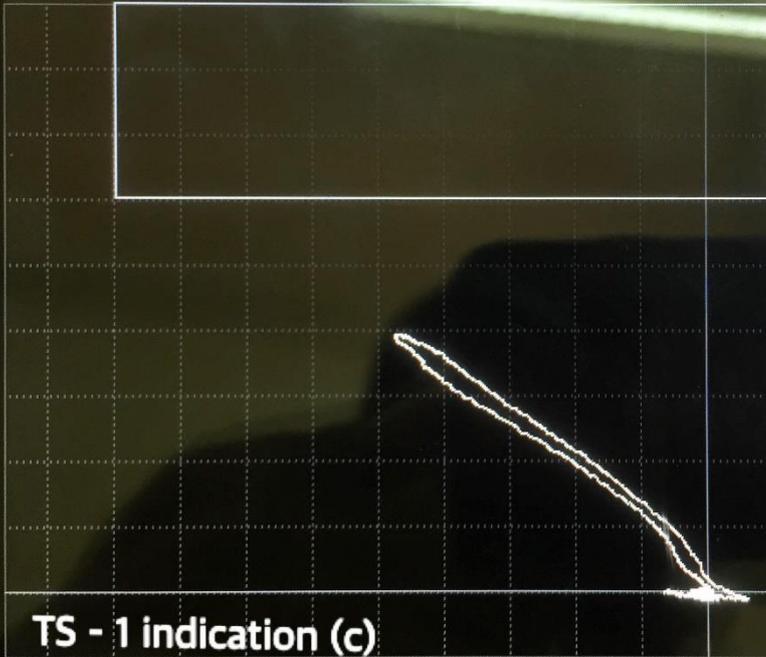
OLYMPUS

26/11/2019 11:24



Vmx 3.9

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 1 indication (c)

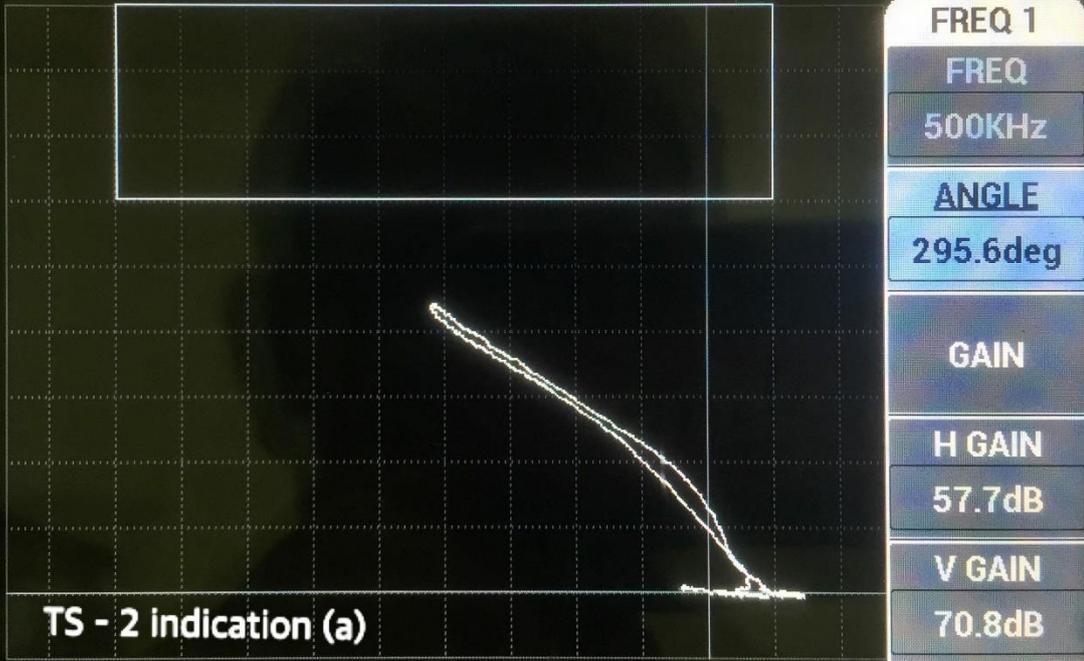
OLYMPUS

25/11/2019 14:58



Vmx 4.4

F



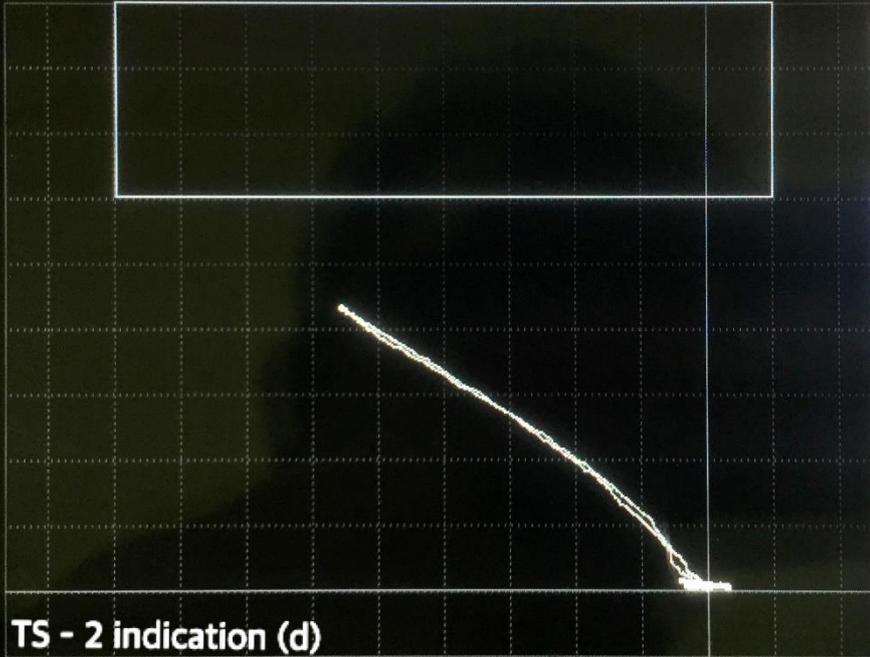
OLYMPUS

25/11/2019 15:07



Vmx 4.3

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

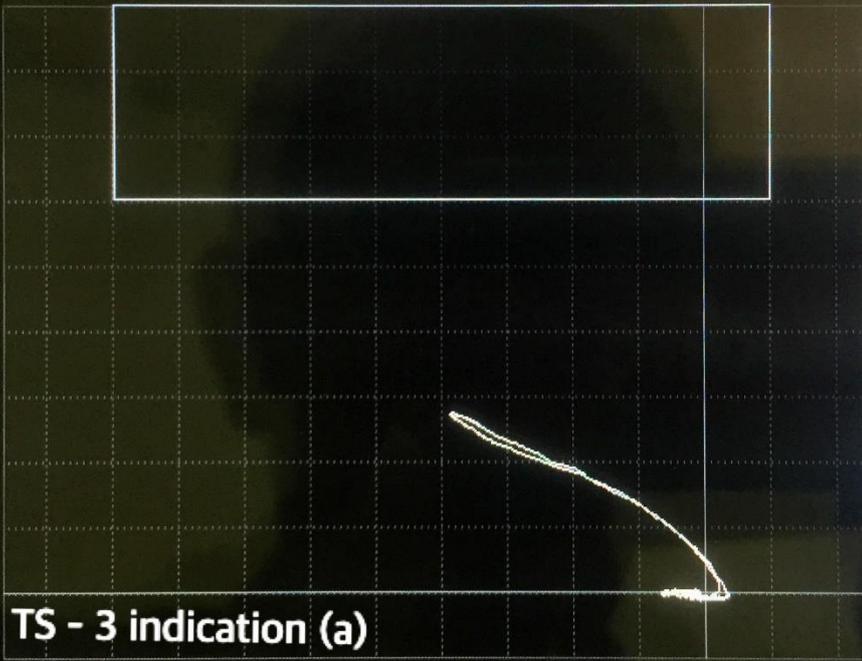
OLYMPUS

25/11/2019 11:38



Vmx 2.7

T



- FREQ 1
- FREQ
500KHz
- ANGLE
295.6deg
- GAIN
- H GAIN
57.7dB
- V GAIN
70.8dB

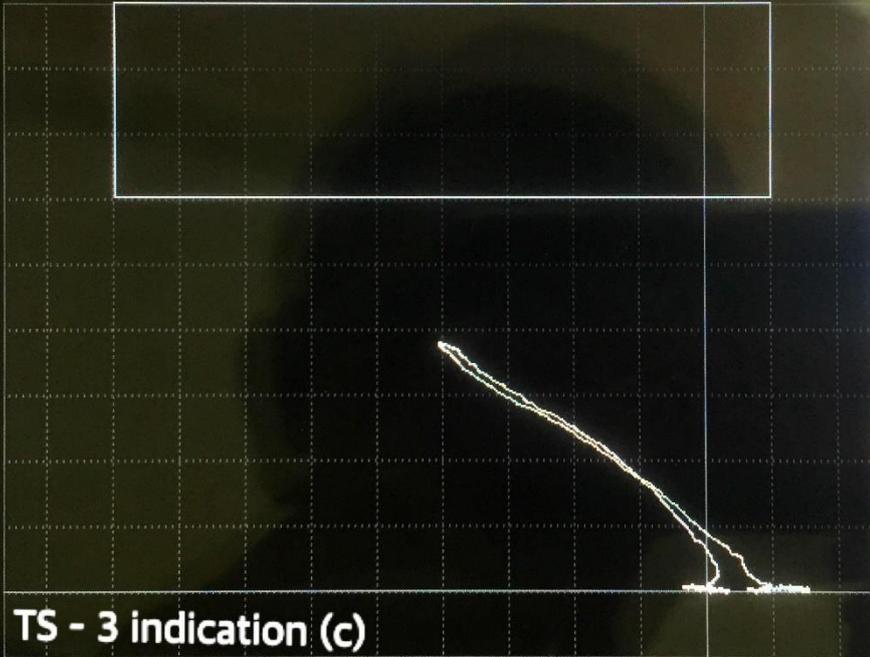
OLYMPUS

25/11/2019 11:54



Vmx 3.8

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 3 indication (c)

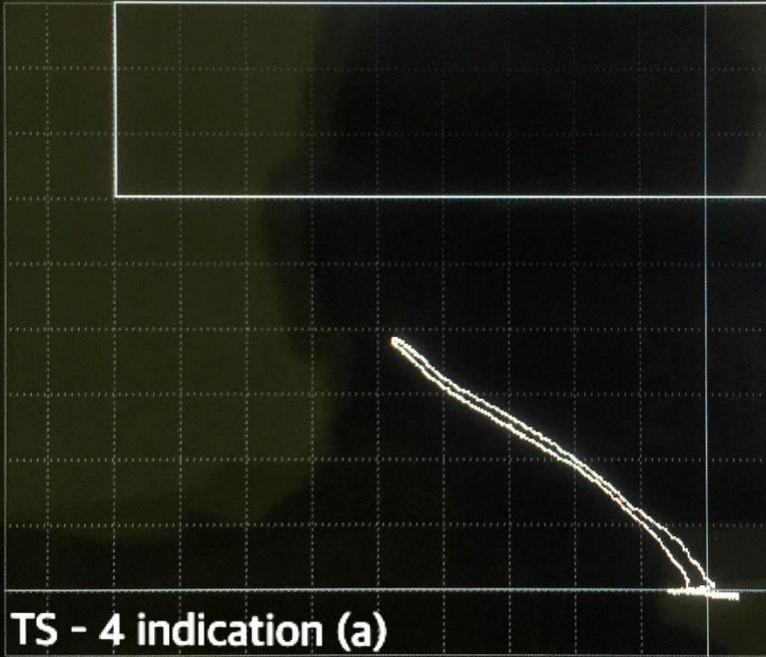
OLYMPUS

25/11/2019 13:12



Vmx 3.8

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

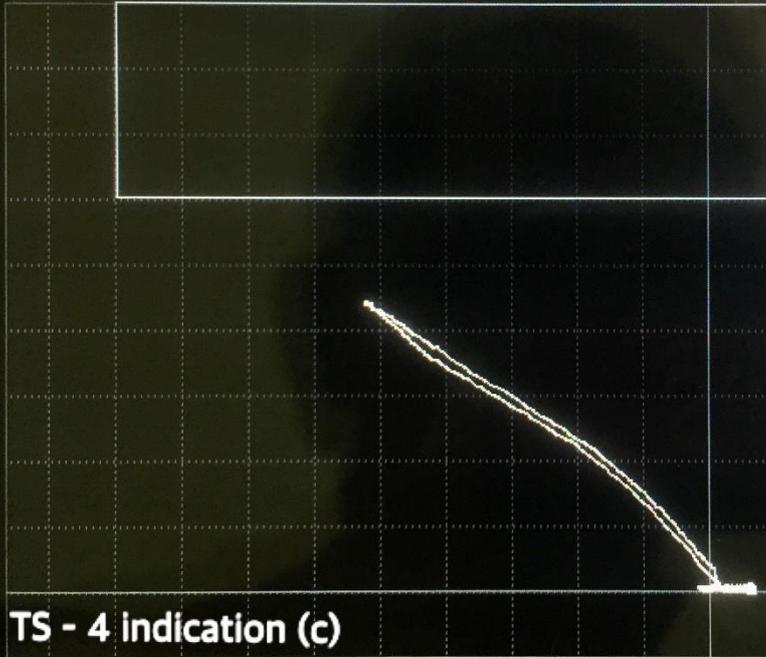
OLYMPUS

25/11/2019 12:51



Vmx 4.4

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 4 indication (c)

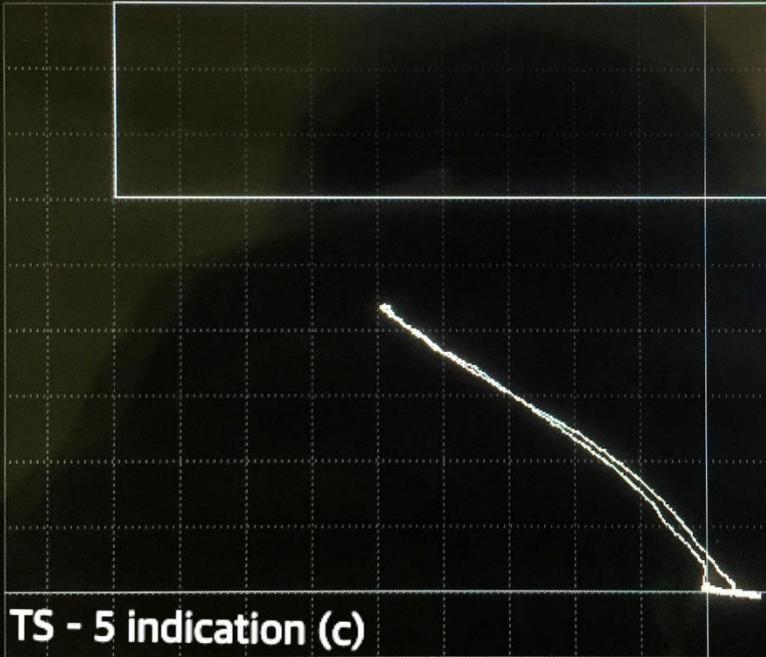
OLYMPUS

25/11/2019 12:11



Vmx 4.4

F



FREQ |

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 5 indication (c)

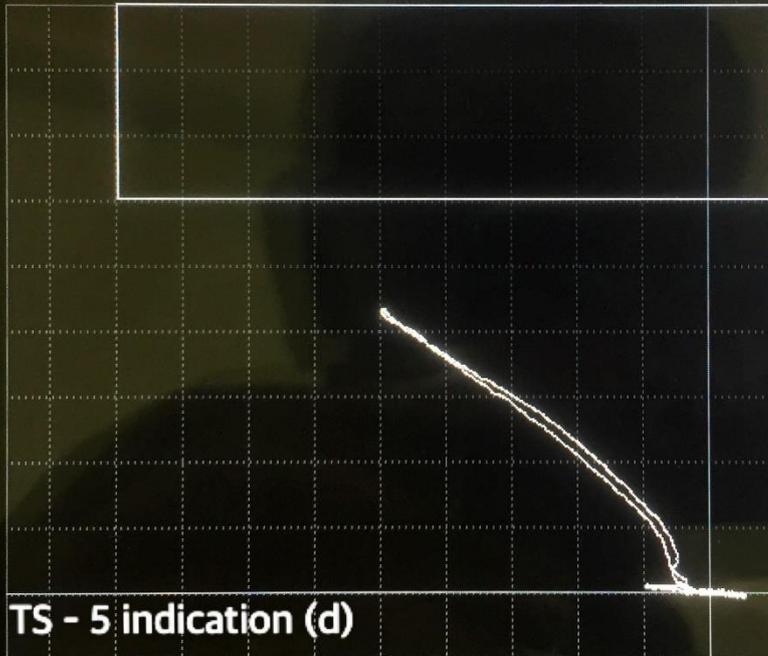
OLYMPUS

25/11/2019 12:16



Vmx 4.3

F



FREQ

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

OLYMPUS

25/11/2019 15:46

Vmx 2.2

F

FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

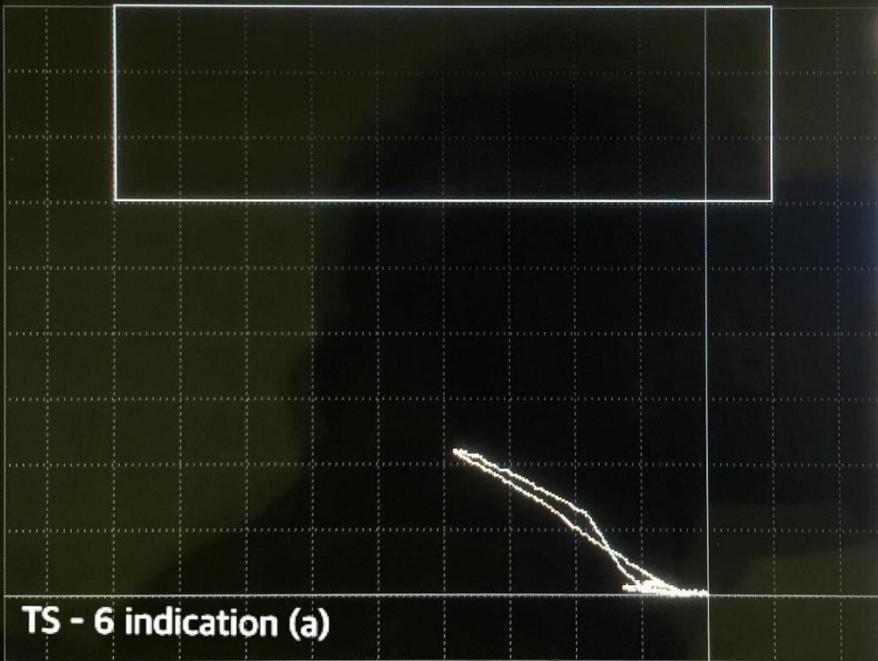
H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 6 indication (a)



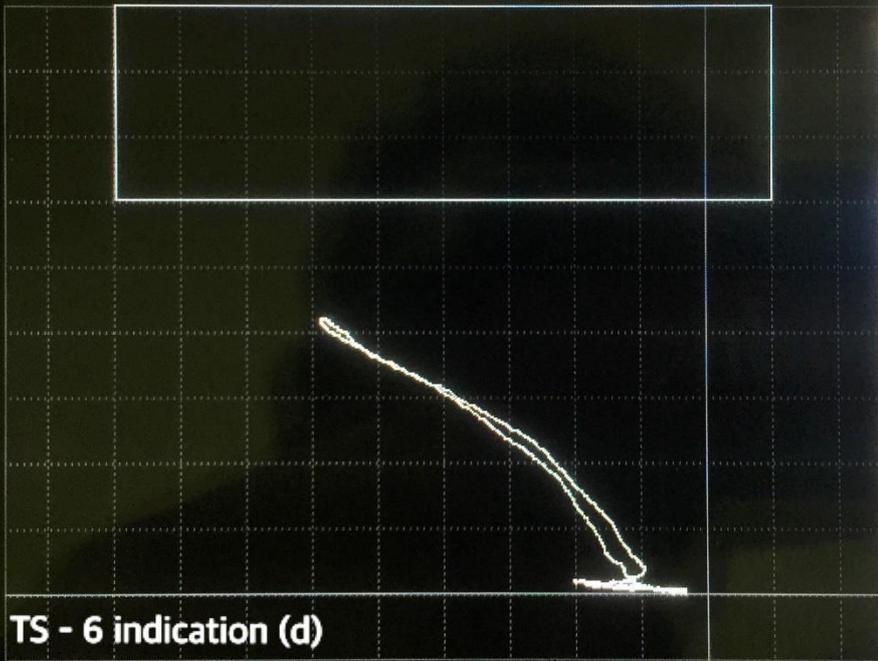
OLYMPUS

25/11/2019 15:39



Vmx 4.2

F



TS - 6 indication (d)

FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

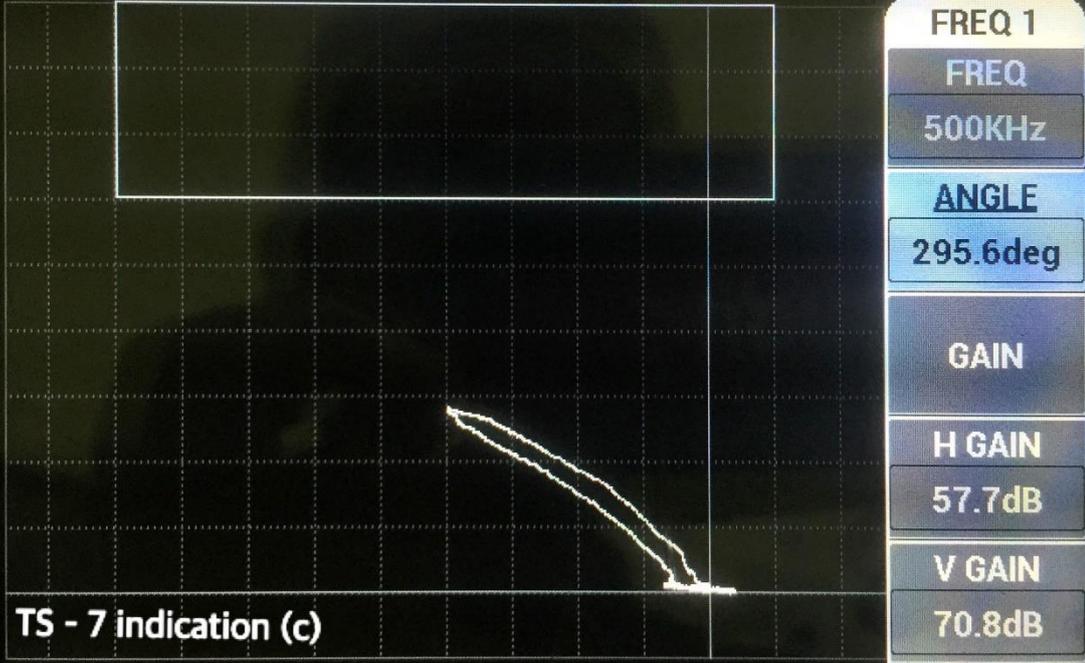
OLYMPUS

25/11/2019 13:37



Vmx 2.8

F



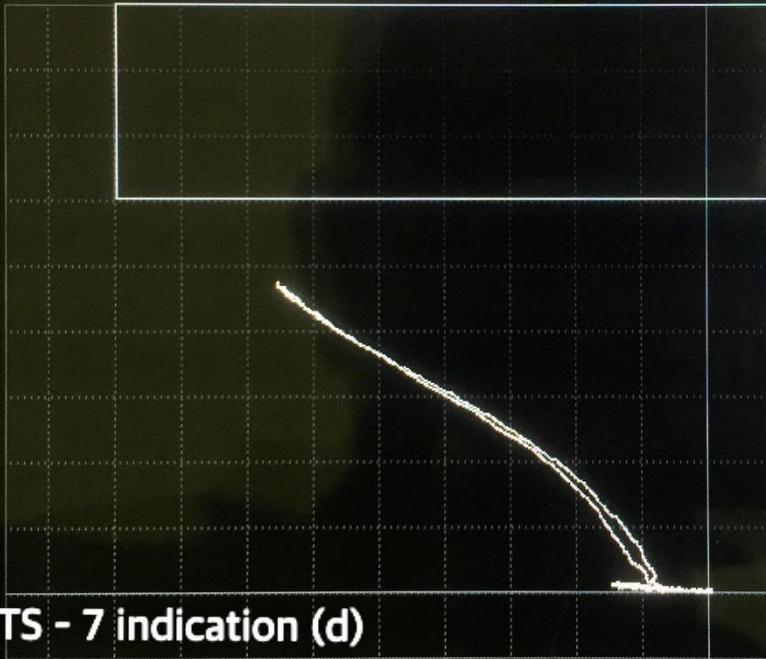
OLYMPUS

25/11/2019 13:17



Vmx 4.7

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 7 indication (d)

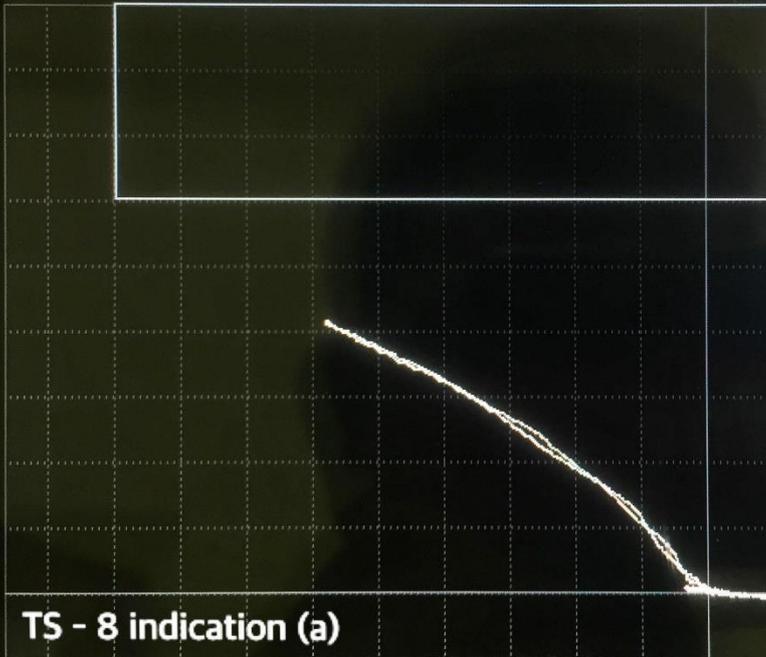
OLYMPUS

25/11/2019 14:38



Vmx 4.1

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

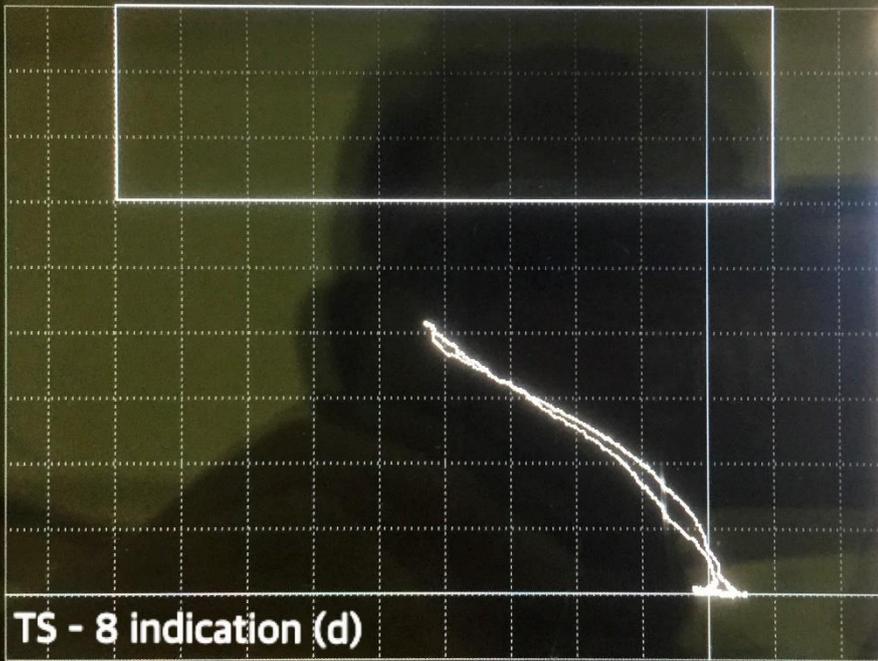
OLYMPUS

25/11/2019 14:15



Vmx 4.1

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

LAMPIRAN F
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 1.5 MM
DENGAN PROBE 500 KHZ

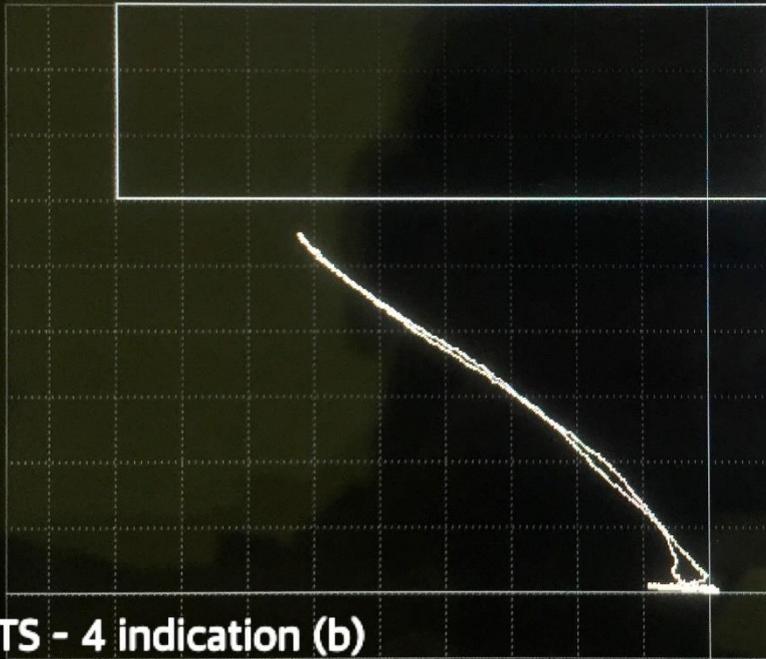
OLYMPUS

25/11/2019 12:57



Vmx 5.5

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 4 indication (b)

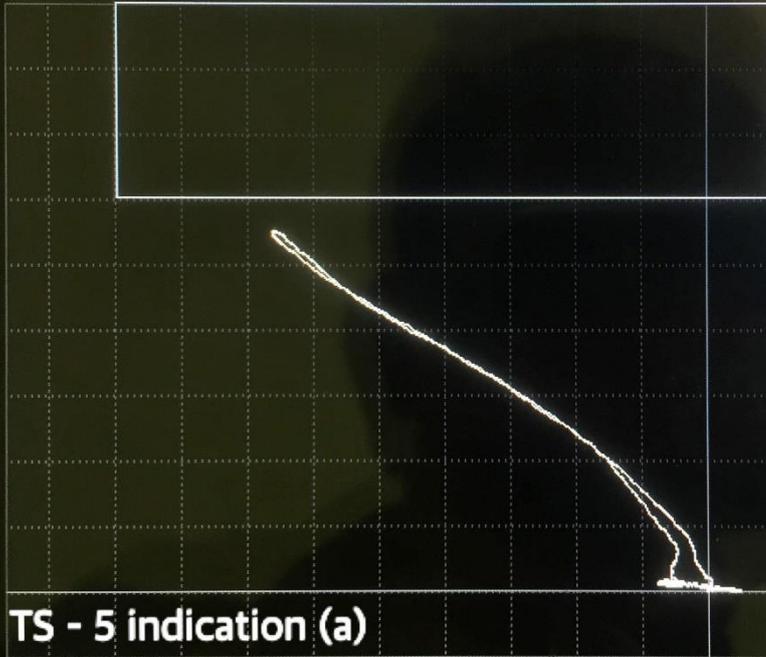
OLYMPUS

25/11/2019 12:29



Vmx 5.5

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

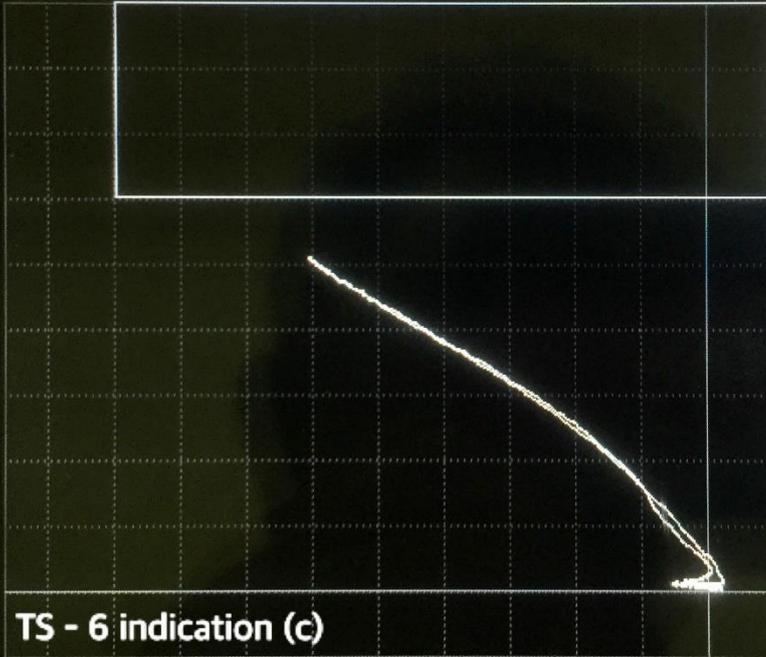
OLYMPUS

25/11/2019 15:41



Vmx 5.1

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

TS - 6 indication (c)

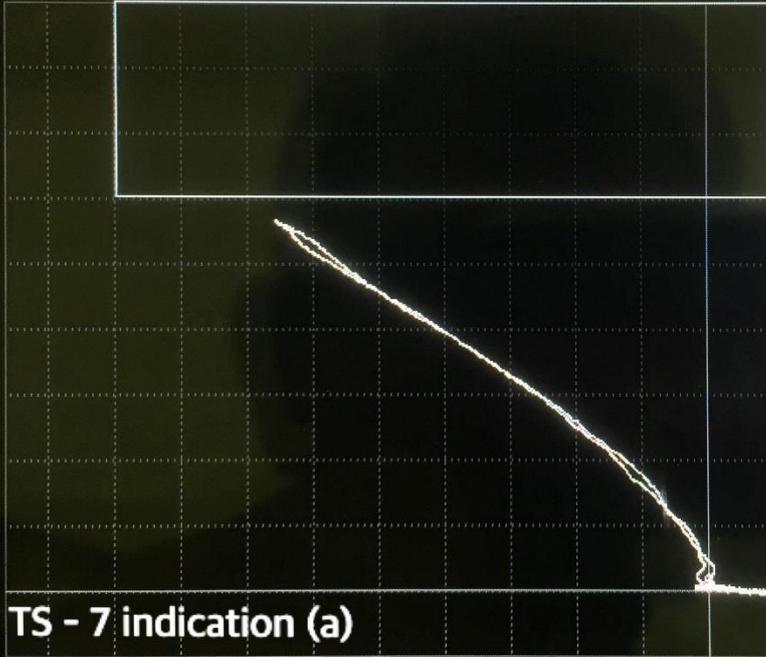
OLYMPUS

25/11/2019 14:08



Vmx 5.6

F



TS - 7 indication (a)

FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

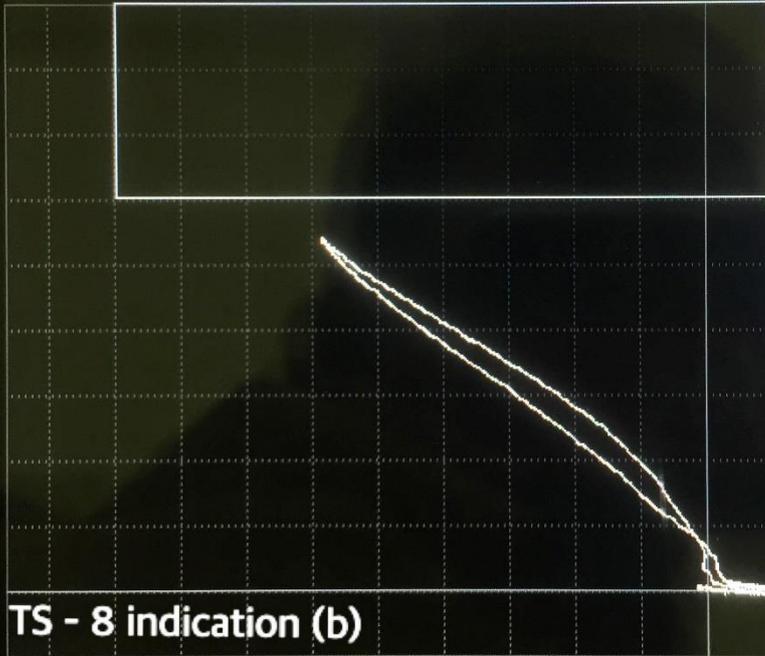
OLYMPUS

25/11/2019 14:36



Vmx **5.4**

F



FREQ 1

FREQ

500KHz

ANGLE

295.6deg

GAIN

H GAIN

57.7dB

V GAIN

70.8dB

LAMPIRAN G
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 0.5 MM
DENGAN PROBE 650 KHZ

OLYMPUS

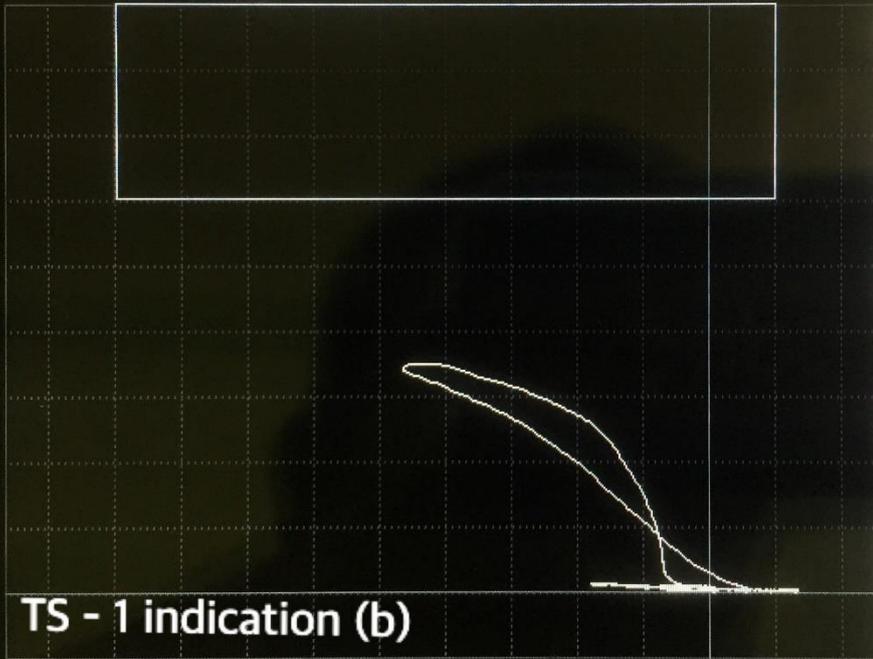
650 kHz

18/11/2019 11:10



Vmx 3.5

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

OLYMPUS

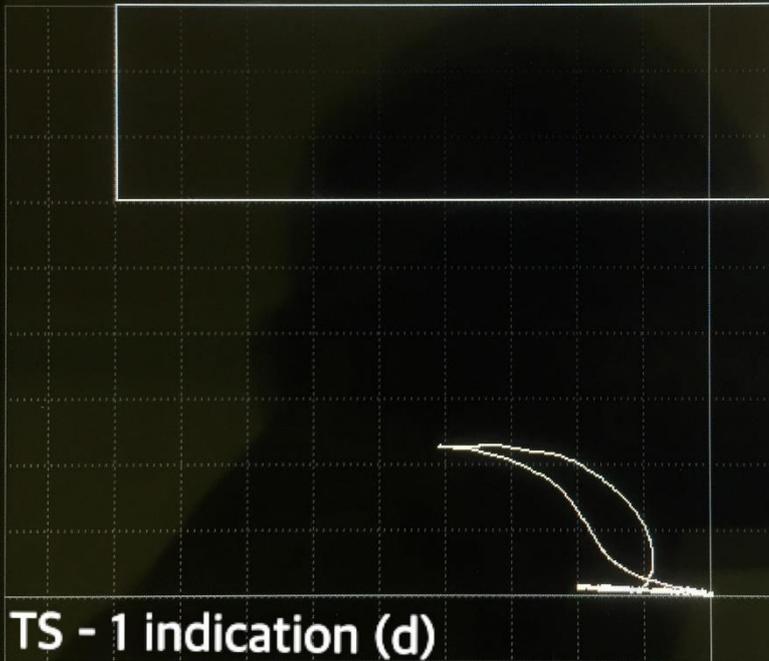
18/11/2019 11:15



650 kHz

V_{mx} 2.3

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 1 indication (d)

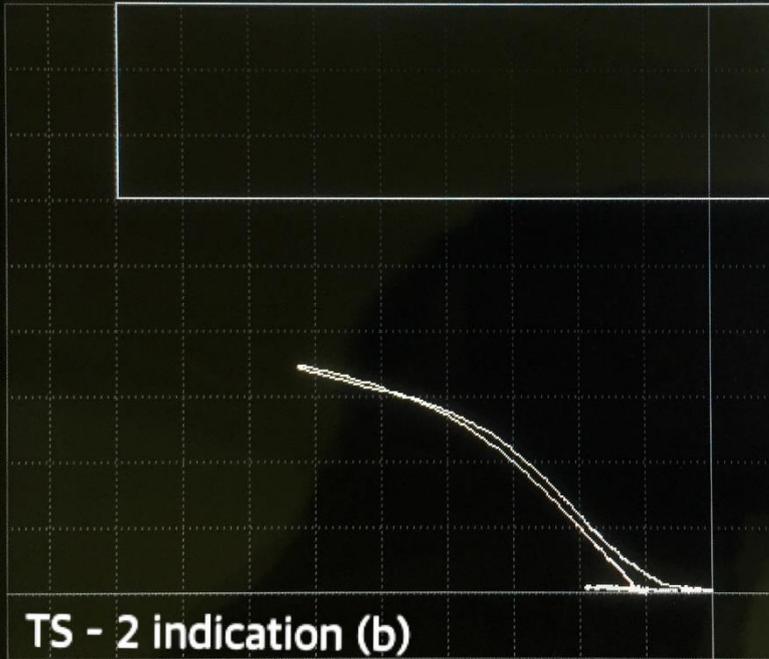
OLYMPUS

19/11/2019 11:24



Vmx **3.4**

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

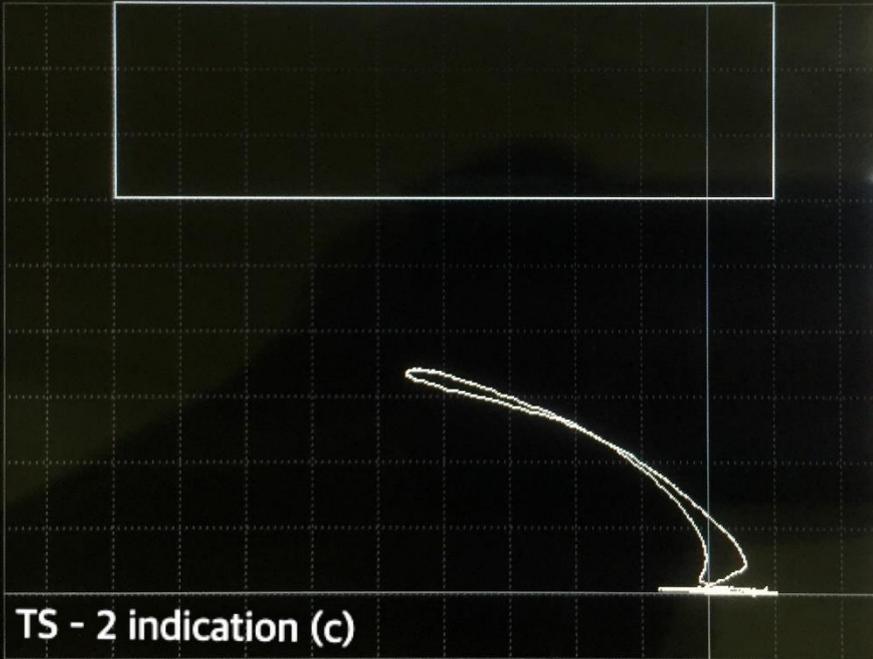
OLYMPUS

19/11/2019 11:27



Vmx 3.4

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 2 indication (c)

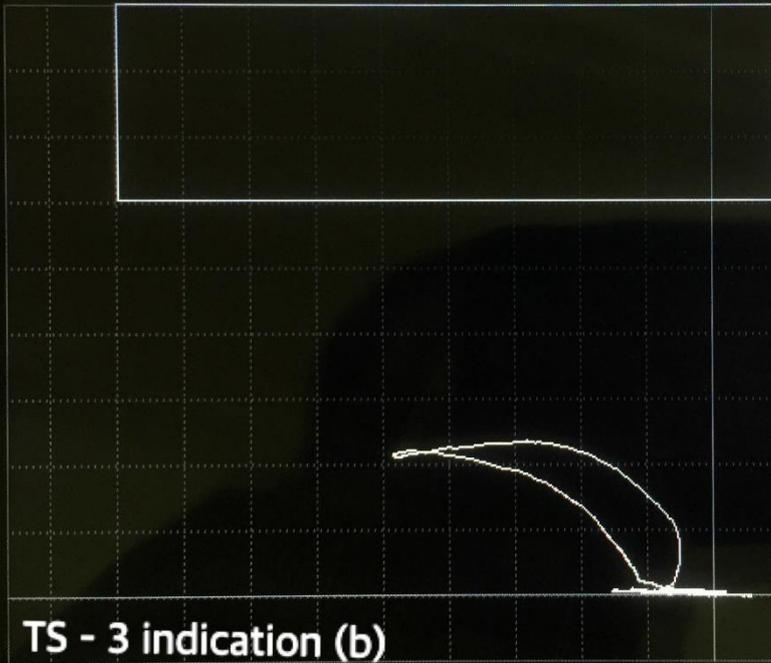
OLYMPUS

19/11/2019 11:09



Vmx 2.3

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

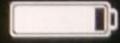
58.2dB

V GAIN

72.3dB

OLYMPUS

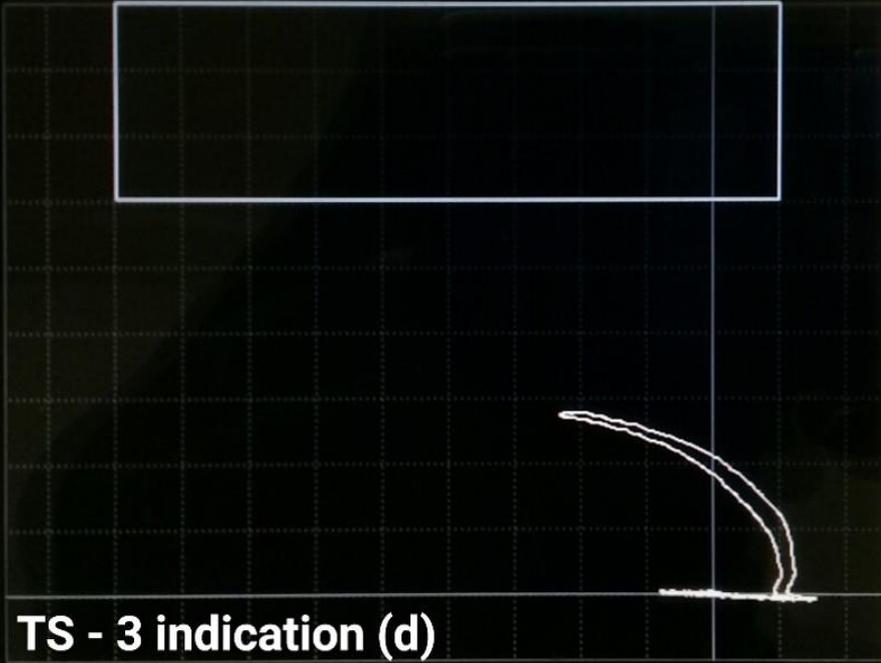
18/11/2019 12:01



650 kHz

Vmx 2.7

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 3 indication (d)

OLYMPUS

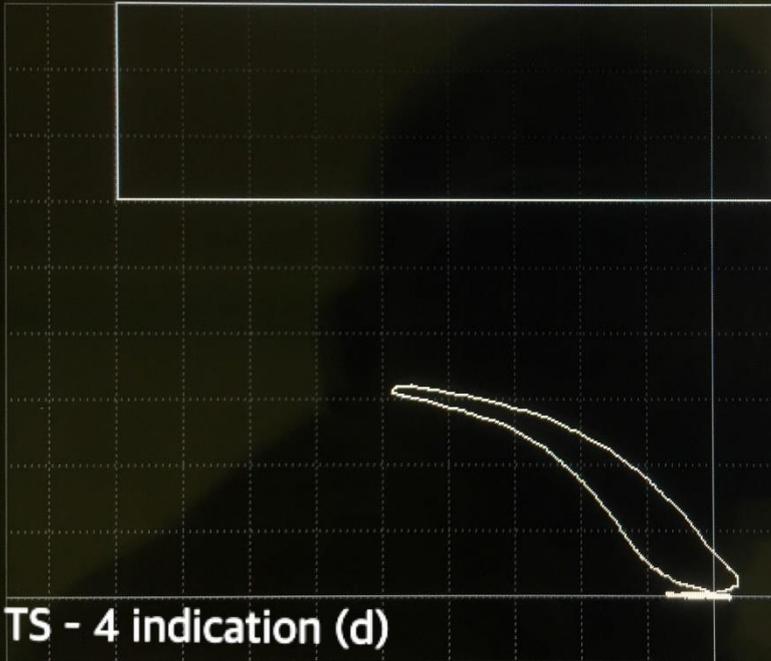
650 kHz

18/11/2019 11:32



Vmx 3.2

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

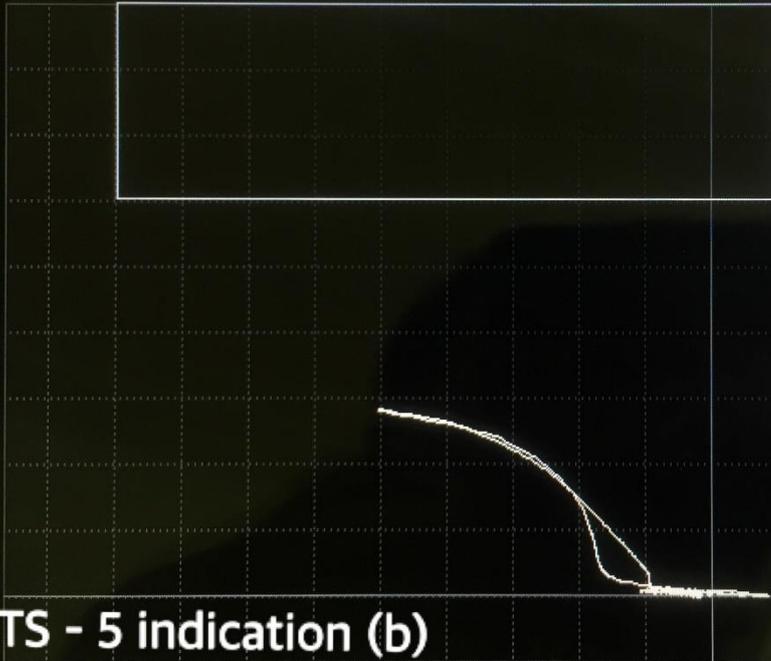
OLYMPUS

19/11/2019 11:16



650 kHz V_{mx} 2.8

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 5 indication (b)

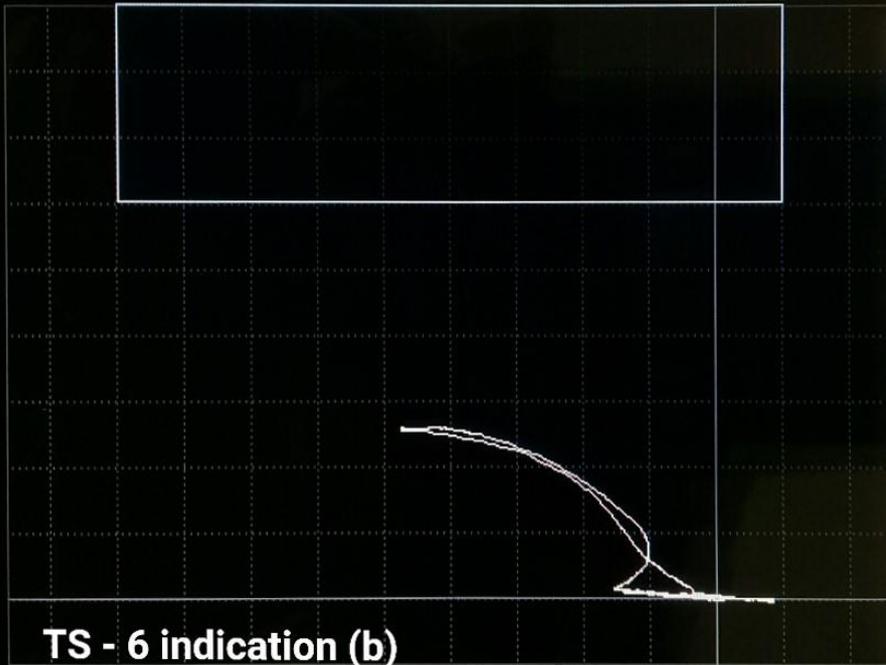
OLYMPUS

18/11/2019 12:35



Vmx 2.6

F



FREQ 1

FREQ

650kHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

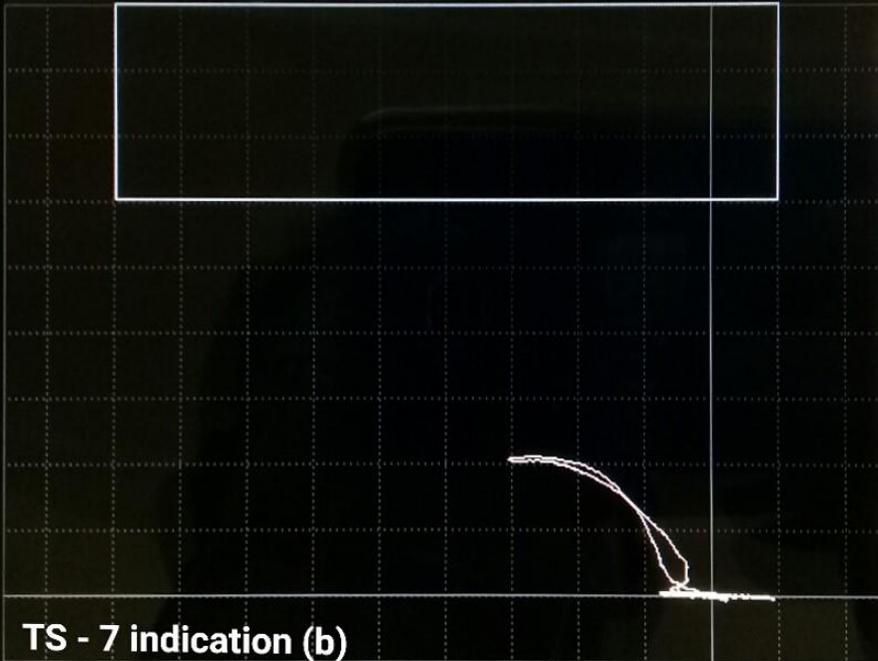
OLYMPUS

18/11/2019 13:50



Vmx 2.1

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 7 indication (b)

OLYMPUS

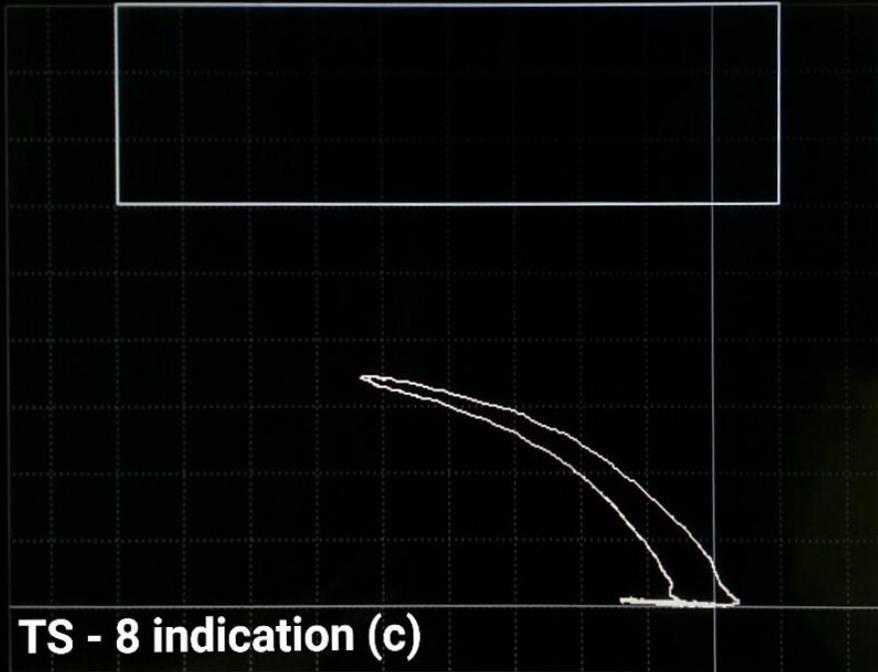
650 kHz

18/11/2019 12:14



Vmx 3.4

F



FREQ 1

FREQ

650kHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 8 indication (c)

LAMPIRAN H
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 1.0 MM
DENGAN PROBE 650 KHZ

OLYMPUS

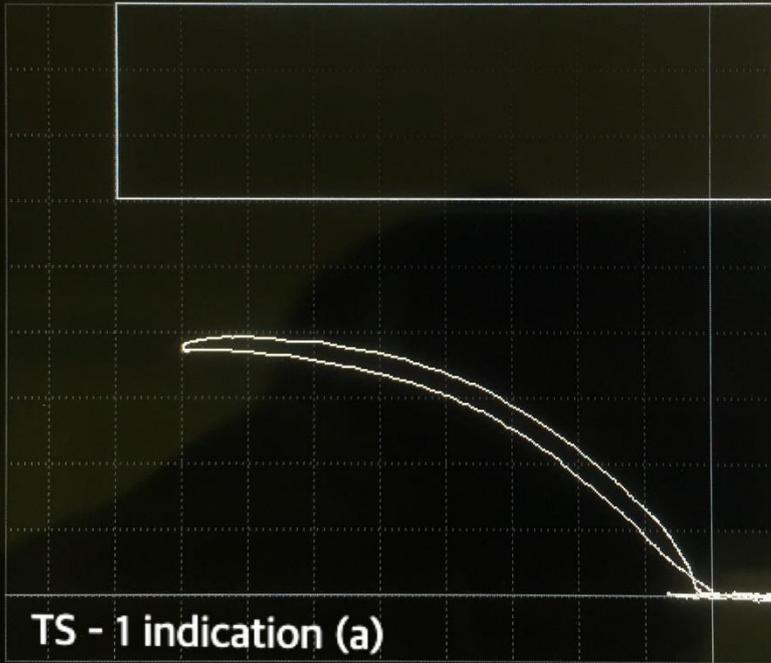
18/11/2019 10:56



650 kHz

V_{mx} 3.9

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

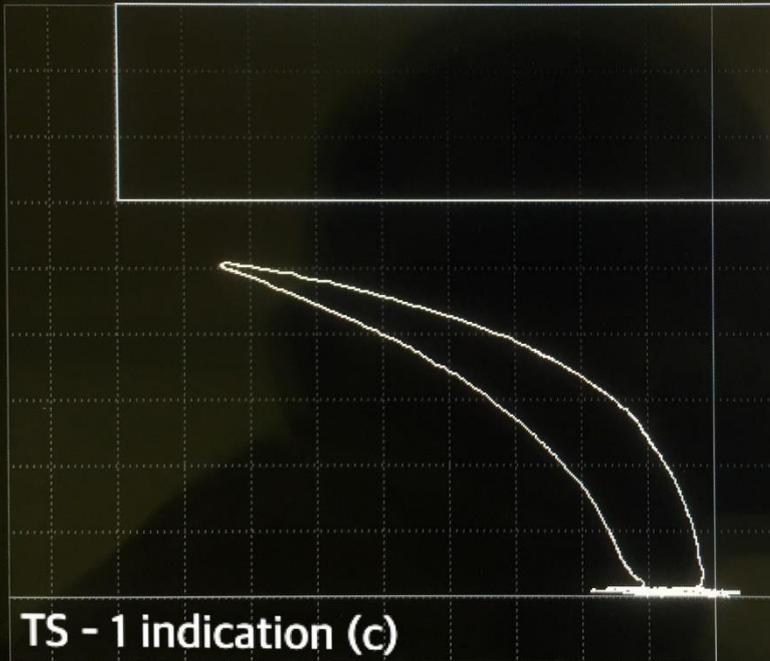
OLYMPUS

18/11/2019 11:13



650 kHz V_{max} 5.0

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 1 indication (c)

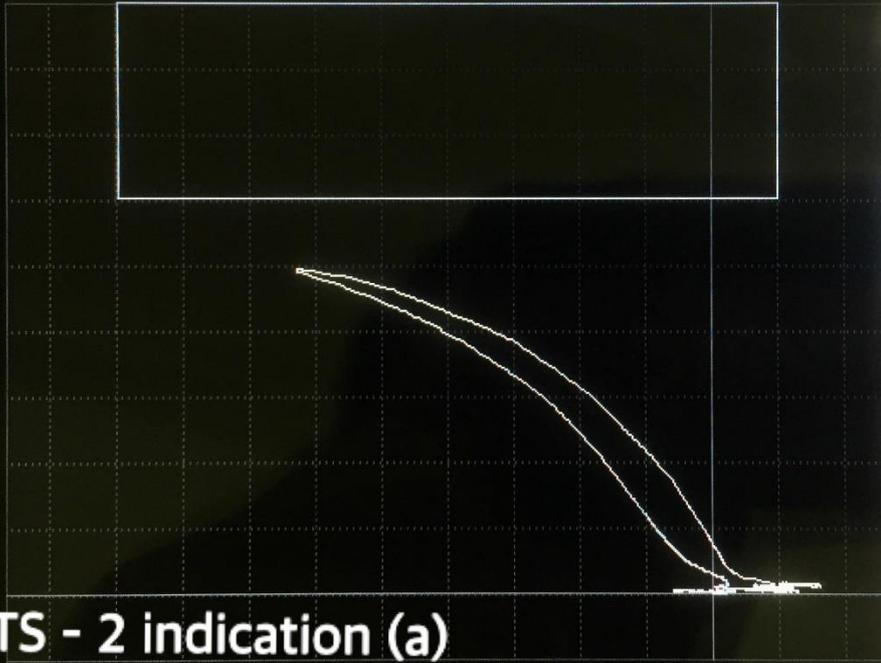
OLYMPUS

19/11/2019 11:22



V_{mx} 4.9

F



TS - 2 indication (a)

FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

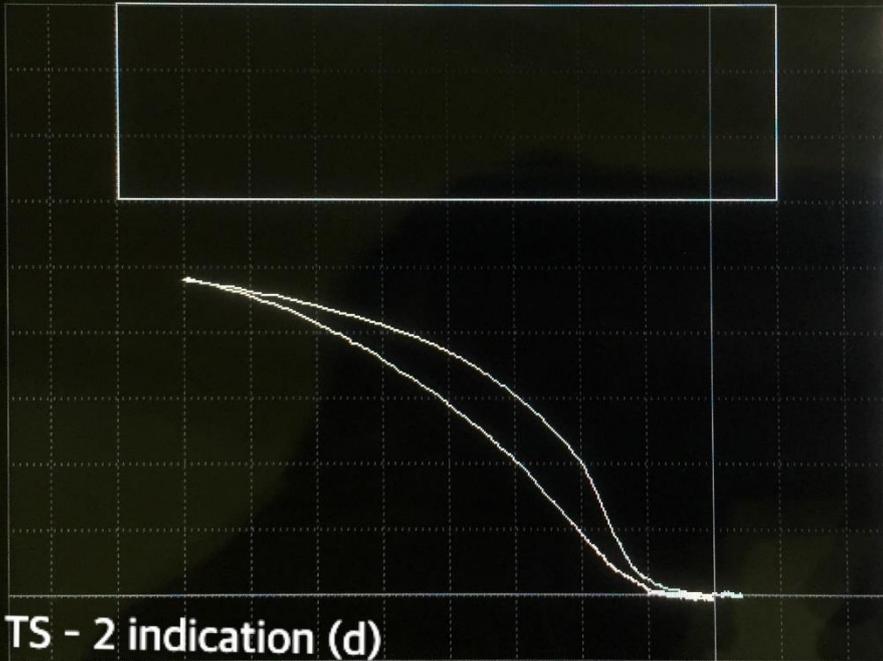
OLYMPUS

19/11/2019 11:27



Vmx 4.8

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

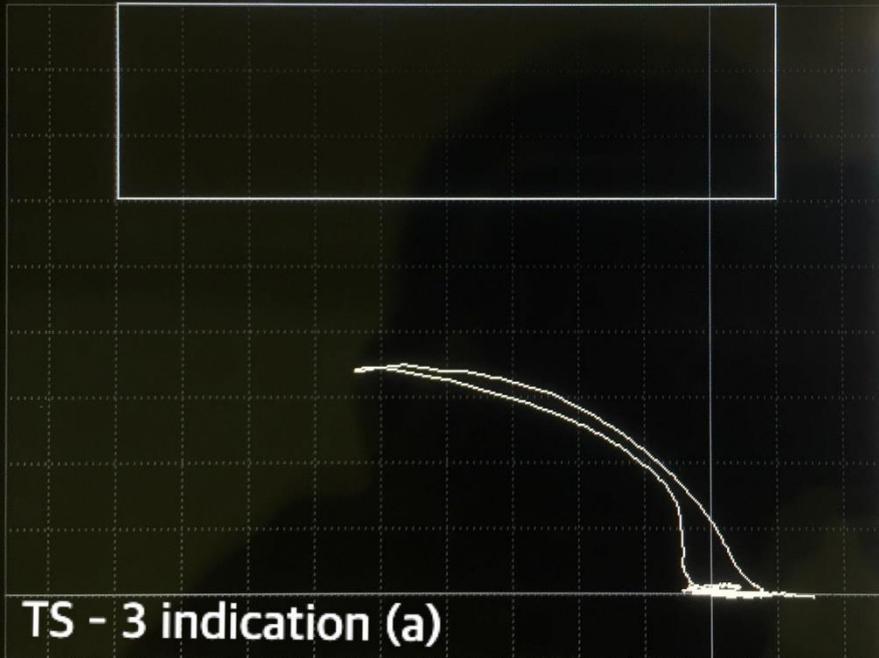
OLYMPUS

18/11/2019 11:37



650 kHz V_{mx} 3.5

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

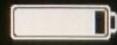
58.2dB

V GAIN

72.3dB

OLYMPUS

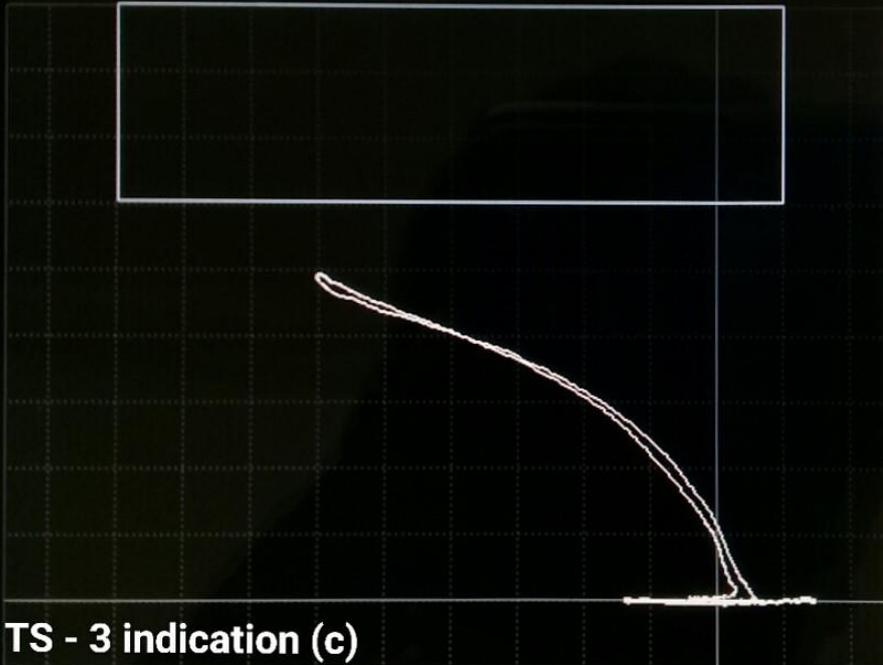
18/11/2019 11:56



650 kHz

Vmx 4.9

F



FREQ 1

FREQ

650kHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

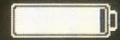
58.2dB

V GAIN

72.3dB

OLYMPUS

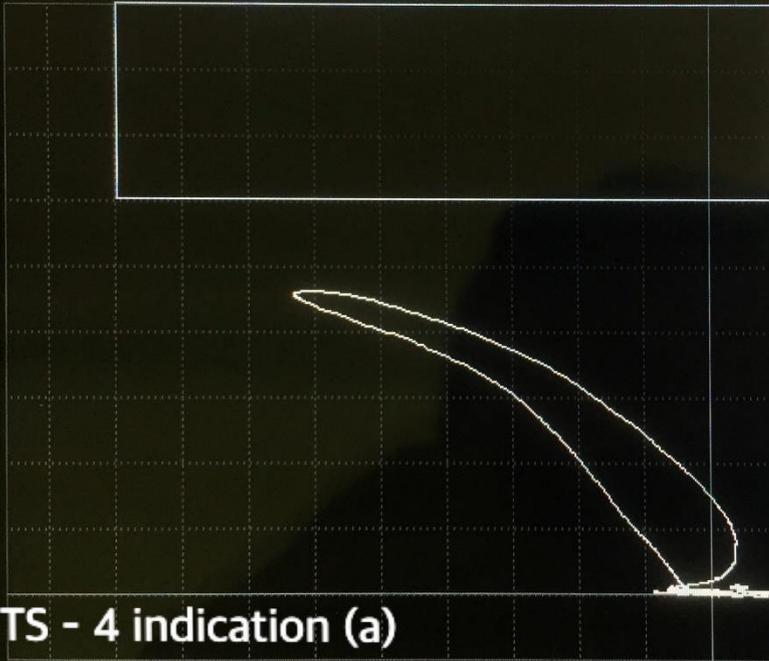
18/11/2019 11:20



650 kHz

V_{mx} 4.6

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 4 indication (a)

OLYMPUS

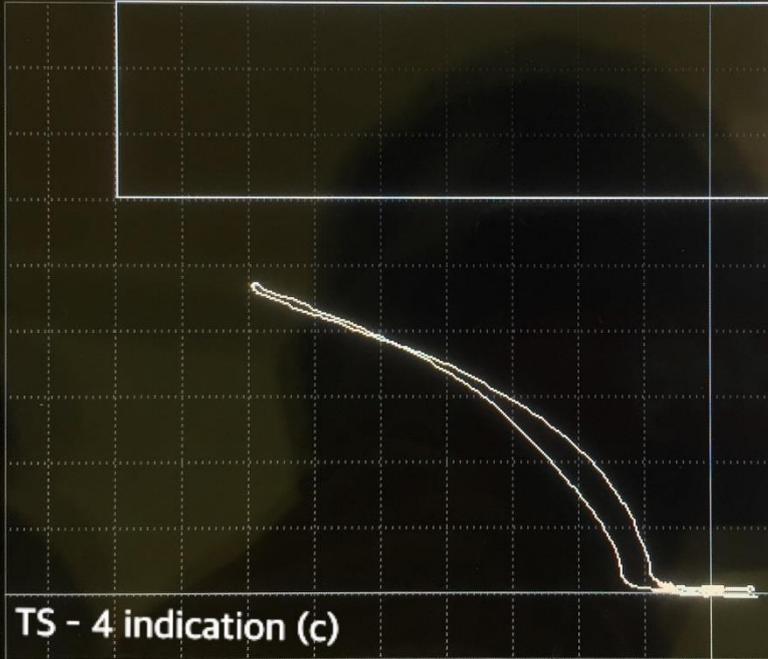
18/11/2019 11:27



650 kHz

Vmx 4.7

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

OLYMPUS

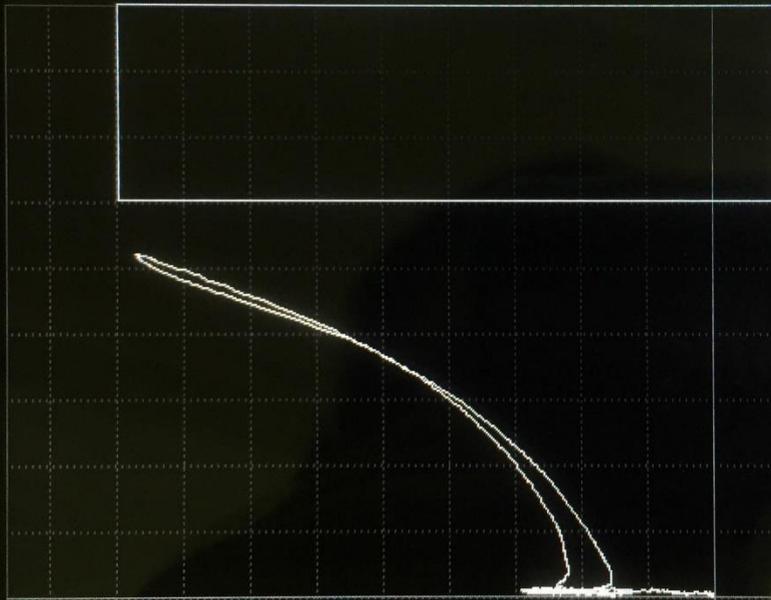
19/11/2019 11:17



650 kHz

Vmx 5.2

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 5 indication (c)

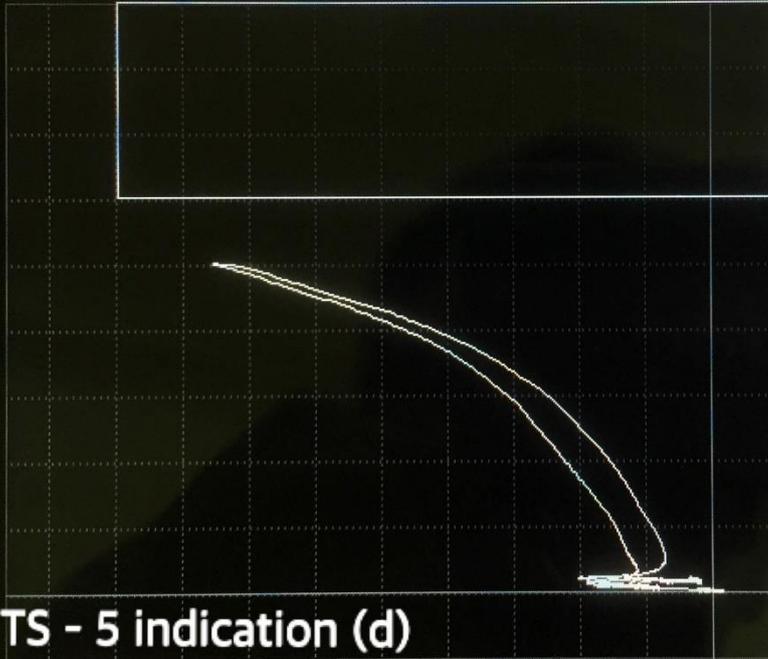
OLYMPUS

19/11/2019 11:18



650 kHz V_{mx} 5.0

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

OLYMPUS

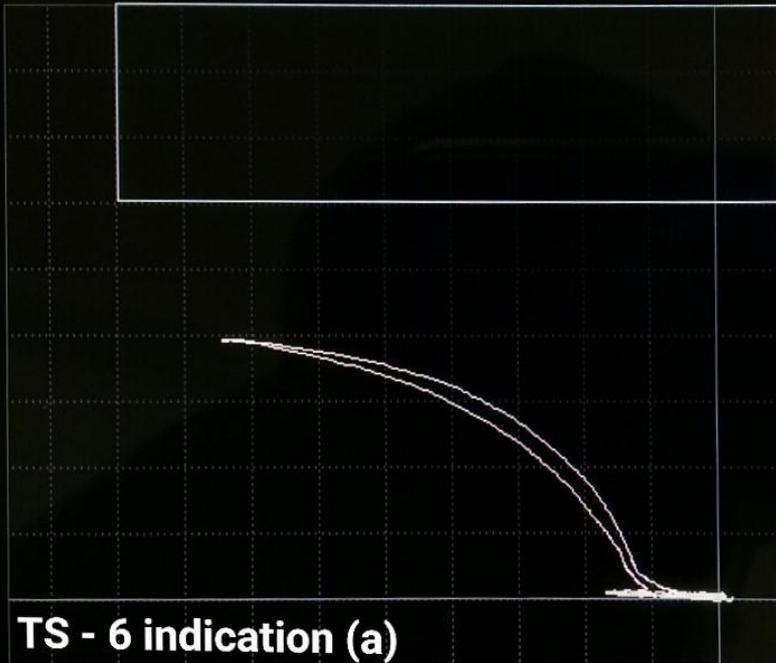
18/11/2019 12:32



650 kHz

V_{mx} 3.9

F



FREQ 1

FREQ

650kHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

OLYMPUS

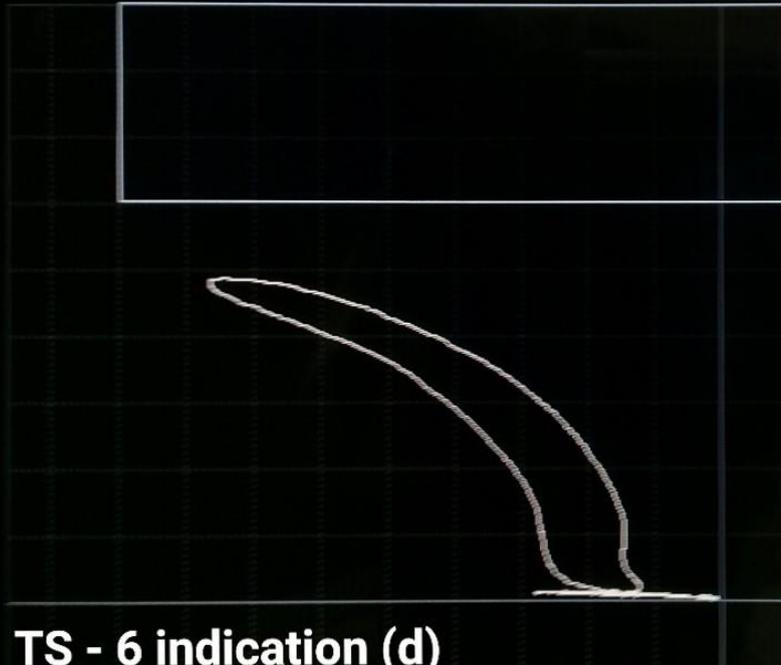
18/11/2019 12:40



650 kHz

Vmx 4.8

F



FREQ 1

FREQ

650kHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 6 indication (d)

OLYMPUS

18/11/2019 13:52



Vmx **3.9**

F

FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

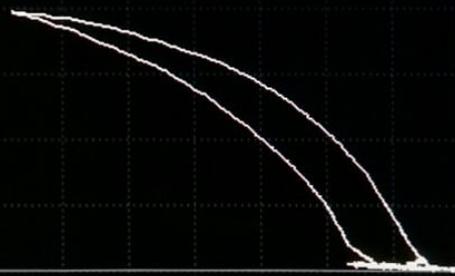
H GAIN

58.2dB

V GAIN

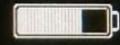
72.3dB

TS - 7 indication (c)



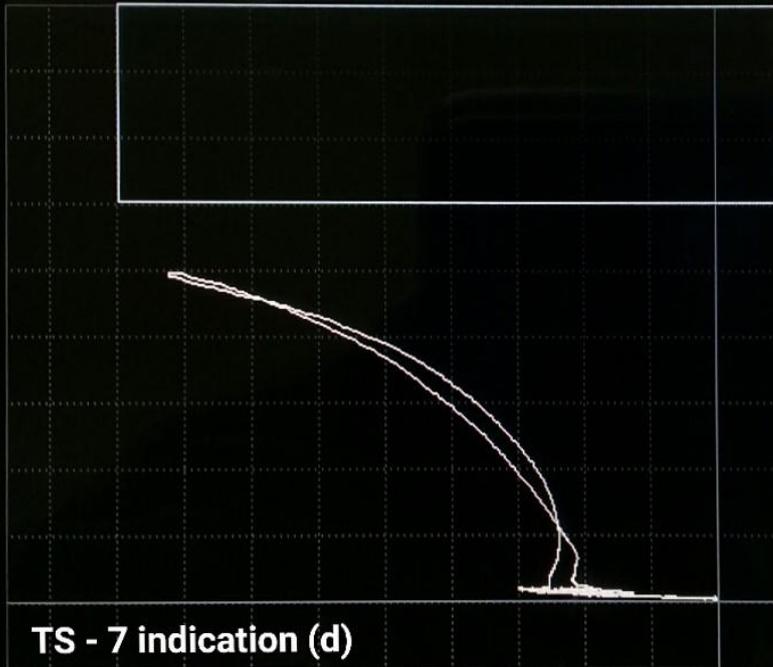
OLYMPUS

18/11/2019 13:54



Vmx 4.9

F



FREQ 1

FREQ

650kHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

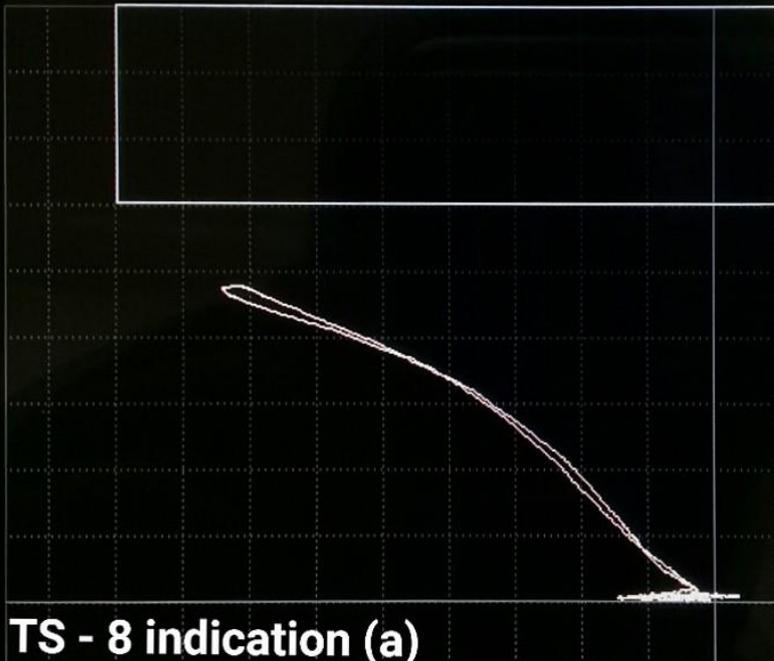
OLYMPUS

18/11/2019 12:05



650 kHz **Vmx 4.7**

F



TS - 8 indication (a)

FREQ 1

FREQ

650kHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

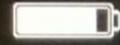
58.2dB

V GAIN

72.3dB

OLYMPUS

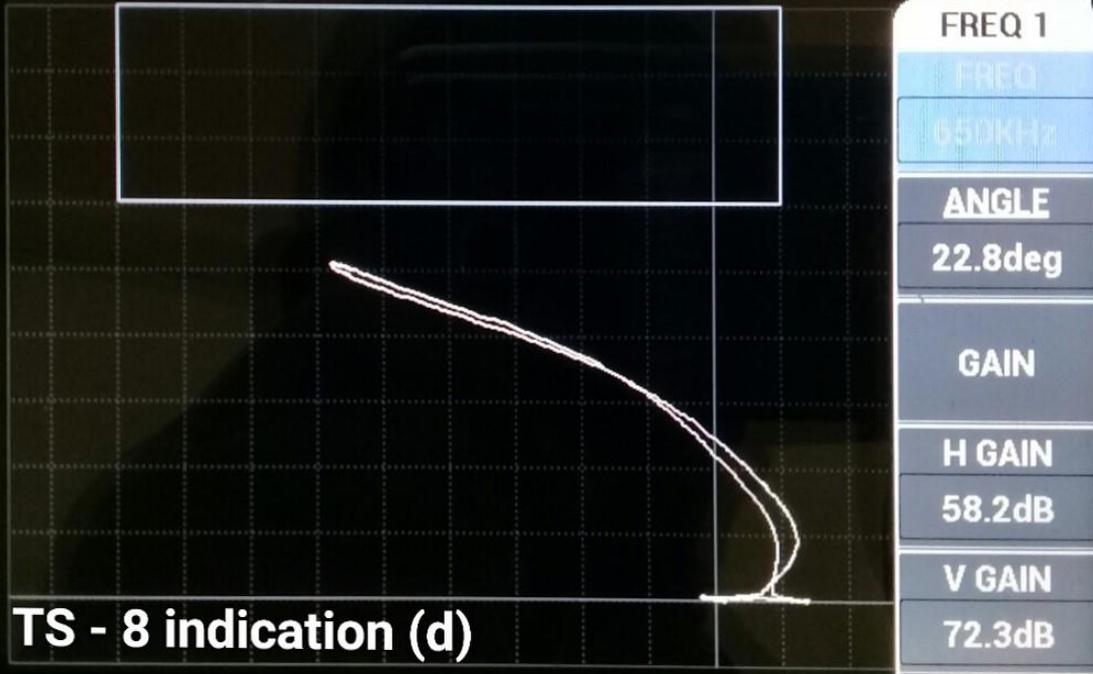
18/11/2019 12:18



650 kHz

Vmx 5.1

F



TS - 8 indication (d)

LAMPIRAN I
HASIL PEMINDAIAN KEDALAMAN RETAK 1.5 MM
DENGAN PROBE 650 KHZ

OLYMPUS

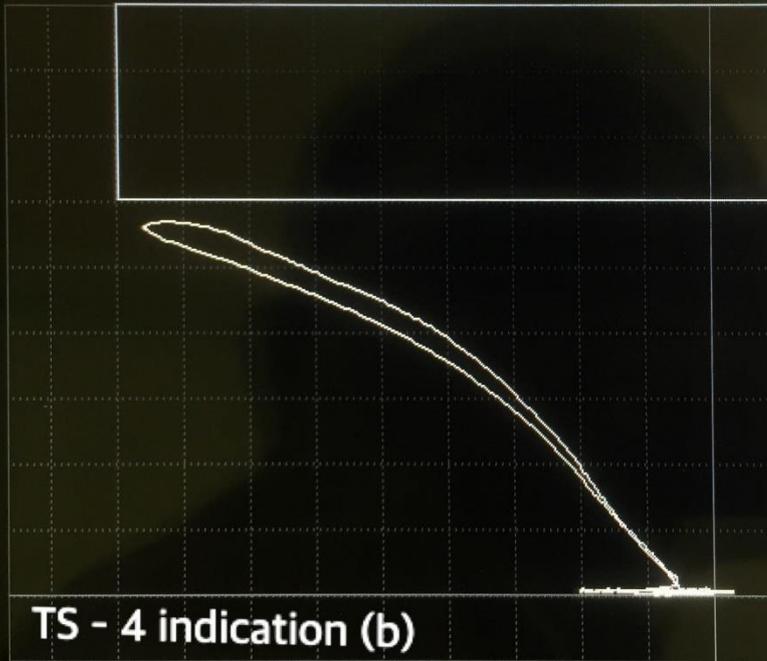
18/11/2019 11:23



650 kHz

Vmx 5.7

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

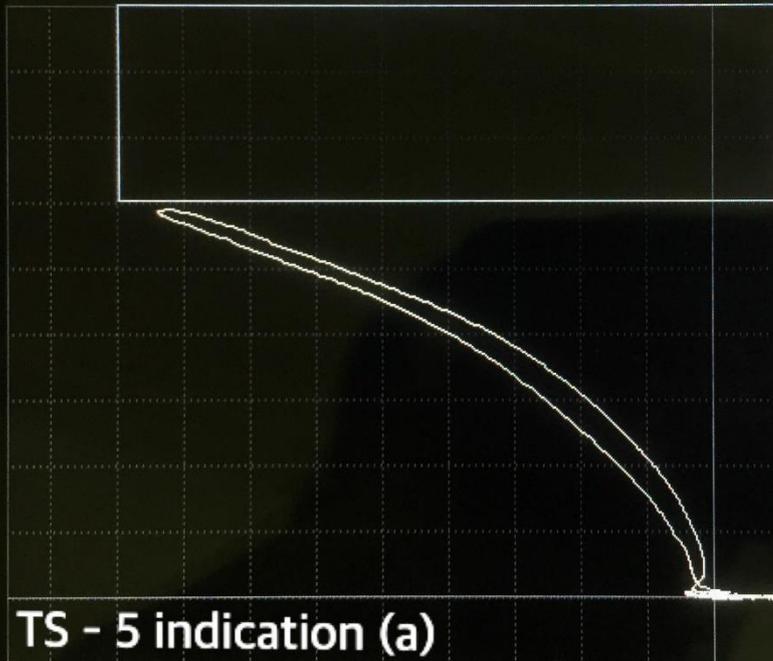
OLYMPUS

19/11/2019 11:16



650 kHz V_{mx} 5.9

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

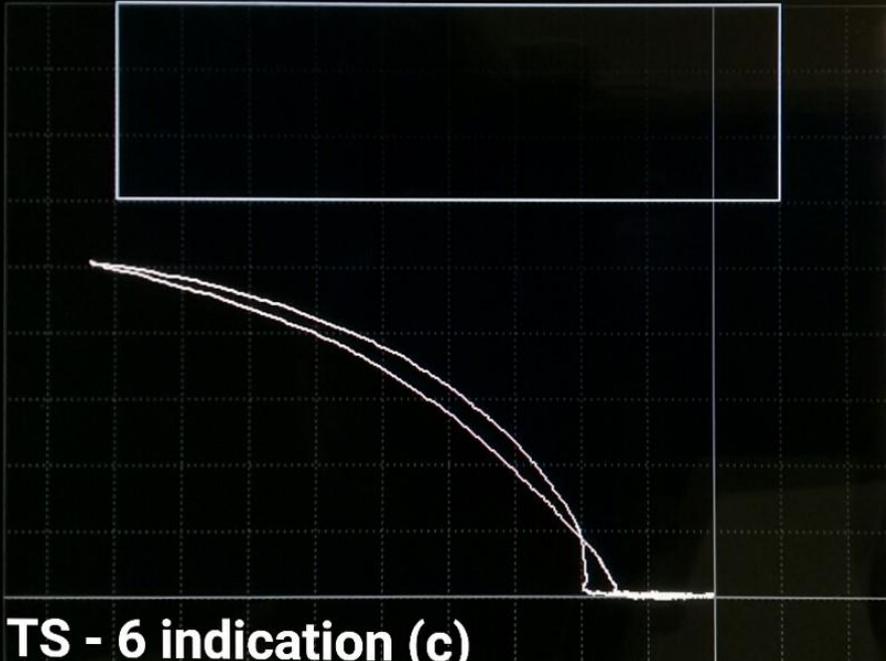
OLYMPUS

18/11/2019 12:38



650 kHz V_{mx} 5.0

F



FREQ 1

FREQ

650KHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

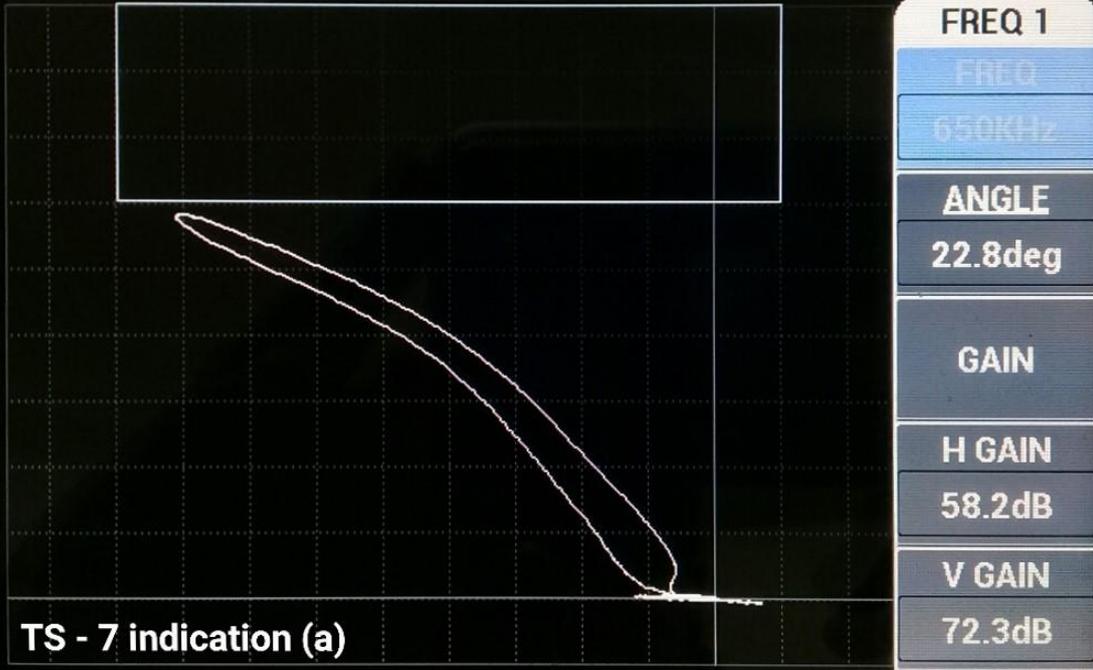
OLYMPUS

18/11/2019 13:41



650 kHz V_{mx} 5.8

F



OLYMPUS

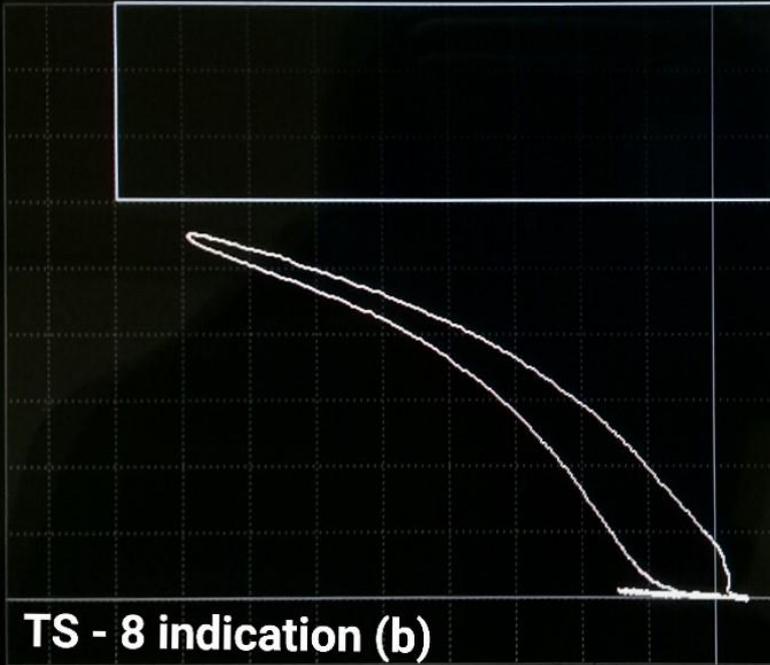
650 kHz

18/11/2019 12:11



Vmx 5.5

F



FREQ 1

FREQ

650kHz

ANGLE

22.8deg

GAIN

H GAIN

58.2dB

V GAIN

72.3dB

TS - 8 indication (b)

LAMPIRAN J
HASIL RETAK BUATAN PADA MATERIAL



TS-1

TS-2

TS-3

TS-4

TS-5

TS-6

TS-7

TS-8

BIODATA PENULIS



Mochammad Haikal Aufar dilahirkan di Semarang pada 21 September 1997 silam. Penulis merupakan anak pertama putra pertama dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Pertiwi 07.1 Kabupaten Kudus, kemudian melanjutkan ke SD 3 Demaan Kecamatan Kota Kudus, SMP 1 Kudus dan SMA Negeri 1 Pati. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2014 melalui jalur Seleksi Nasional Masuk PTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Konstruksi dan Kekuatan Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi ketua sub-acara Dialog Interaktif SAMPAN 10 ITS.

Email: haikal.aufar14@mhs.na.its.ac.id / ekalaufar@gmail.com