



TUGAS AKHIR - TE 145561

**ANALISIS TEGANGAN TEMBUS KERTAS ISOLASI
TRANSFORMATOR AKIBAT LAMA PERENDAMAN PADA
ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR**

**Raka Anthony Elfreda
NRP 0711164500033**

**Dosen Pembimbing
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc
Danar Fahmi S.T., M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - TE 145561

***ANALYSIS OF BREAKDOWN VOLTAGE TRANSFORMER
PAPER INSULATION TOWARD IMMERSION DURATION IN
TRANSFORMER OIL INSULATION***

Raka Anthony Elfreda
NRP 07111645000033

Advisor
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc
Danar Fahmi S.T., M.T

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

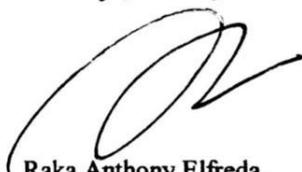
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Analisis Tegangan Tembus Kertas Isolasi Transformator Akibat Lama Perendaman pada Isolasi Minyak Transformator”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka dalam Tugas Akhir ini.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar atau terjadi kesalahan dan pelanggaran, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 4 Juli 2018



Raka Anthony Elfreda
NRP 07111645000033

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**ANALISIS TEGANGAN TEMBUS KERTAS ISOLASI
TRANSFORMATOR AKIBAT LAMA PERENDAMAN
PADA ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

ANALISIS TEGANGAN TEMBUS KERTAS ISOLASI TRANSFORMATOR AKIBAT LAMA PERENDAMAN PADA ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR

Nama : Raka Anthony Elfreda
NRP : 07111645000033
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc
Dosen Pembimbing 2 : Daniar Fahmi, S.T., M.T

ABSTRAK

Semakin meningkatnya permintaan listrik juga akan membuat semakin terbukanya peluang usaha dalam bidang kelistrikan, salah satu peluang usaha adalah pembuat transformator. Dalam proses produksi transformator tentunya harus dilakukan pengujian transformator oleh produsen. Rentang waktu antara perendaman isolasi kertas dan pengujian harus diperhatikan agar saat dilakukan pengujian isolasi yang terdapat didalam transformator sudah dalam keadaan yang stabil. Sebelum dilakukan pengujian isolasi kertas, kertas akan diperlakukan secara berbeda-beda mulai tanpa perendaman hingga 72 jam perendaman didalam minyak dengan suhu ruang pada tiap jenis isolasi kertas. Pengujian *breakdown voltage* pada penelitian ini menggunakan elektroda *mushroom* dengan standart IEC 60156. Dari hasil pengujian didapatkan isolasi tiap jenis kertas memiliki nilai *breakdown voltage* yang stabil dengan lama perendaman kertas yang berbeda, kertas press 48 jam, kertas krep dan pressboard 36 jam, dan kertas kraft 12 jam. Semakin lama direndam isolasi kertas akan mengalami proses adhesi yang membuat rongga kertas membentuk susunan komposit yang lebih sempurna. Selain dilakukan pengujian *breakdown voltage*, akan dilakukan juga pengujian tentang kadar selulosa. Dalam pengujian selulosa didapatkan bahwa, dalam melakukan perendaman minyak akan membuat kadar selulosa dalam kertas semakin tinggi yang menyebabkan nilai *breakdown voltage* dari isolasi kertas akan semakin tinggi juga.

Kata Kunci: isolasi kertas, kertas press, kertas krep (crepe), kertas pressboard, kertas kraft, impregnasi minyak, lama perendaman, *breakdown voltage*, selulosa pada kertas.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**ANALYSIS OF BREAKDOWN VOLTAGE
TRANSFORMER PAPER INSULATION TOWARD
IMMERSION DURATION IN TRANSFORMER OIL
INSULATION**

Nama : Raka Anthony Elfreda
NRP : 07111645000033
Advisor 1 : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc
Advisor 2 : Daniar Fahmi, S.T., M.T

ABSTRACT

The increasing demand for electricity also make the opportunities business in the electricity scope, one business opportunity is the producer of transformers. In the production process of transformer, be must done by transformer testing electricity. Time span between paper insulation immersion and testing, shall be noticed when the insulation testing contained within the transformer is a steady state breakdown voltage. Prior the paper insulation testing, the paper will be treated differently without immersion until 72 hours immersion in the oil at room temperature on each type of paper insulation. Testing breakdown voltage this research using mushroom electrode standard IEC 60156. In the test results obtained isolation each type of paper has a steady state breakdown voltage value with different paper immersion period, 48 hours for press paper, 36 hours for crepe and pressboard paper, and 12 hours for craft paper. Longer of time immersion paper insulation witness a process adhesion that makes the paper cavity form more perfect composite arrangement, furthermore also be tested about cellulose content. In cellulose content testing, are found those oil immersion became increase of cellulose content in paper insulation, which causing the breakdown voltage value of the paper insulation be higher as well.

Keywords: *paper insulation, press paper, crepe paper, pressboard paper, craft paper, oil impregnation, immersion time, breakdown voltage, cellulose in paper.*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang selalu memberikan rahmat, berkat dan karuniaNya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir tersebut disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan Strata-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul Tugas Akhir yaitu:

ANALISIS TEGANGAN TEMBUS KERTAS ISOLASI TRANSFORMATOR AKIBAT LAMA PERENDAMAN PADA ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada orang tua, dosen pembimbing, kakak, adik, keluarga besar, Gea, teman teman angkatan, asisten laboratorium tegangan tinggi, dan PT. Bambang Djaja Transformer serta banyak pihak yang penulis tidak dapat menyebutkan satu persatu yang selalu mendukung dan membantu penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir tersebut baik dalam bentuk moral maupun materiil.

Semoga buku ini dapat membantu banyak insan dalam berbagai kepentingan tentang dampak lama perendaman dari beberapa jenis isolasi kertas transformator, selain itu kiranya apabila ada kritik, saran ataupun pertanyaan mohon memberitahukan kepada penulis melalui alamat *e-mail* penulis yang tertera pada lembar biografi.

Surabaya, 4 Juli 2018

Penulis

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR ISI

	HALAMAN
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Metodologi Penelitian	2
1.5 Sistematika Laporan	3
1.6 Relevansi.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Transformator.....	7
2.1.1 Pengertian Transformator.....	7
2.1.2 Prinsip Kerja Transformator.....	7
2.1.3 Kontruksi Transformator.....	8
2.2 Dielektrik	9
2.2.1 Pengertian Dielektrik	9
2.2.2 Kekuatan Dielektrik	9
2.3 Isolasi	10
2.3.1 Pengertian Isolasi.....	10
2.3.2 Tahanan Isolasi	10
2.3.3 Jenis-jenis Isolasi	10
2.4 Isolasi Kertas.....	14
2.4.1 Komposisi Dalam Isolasi Kertas	15
2.4.2 Kertas Kraft (<i>Craft Paper</i>)	16
2.4.3 Kertas Press (<i>Press paper</i>)	16

2.4.4	Kertas Pressboard (<i>Pressboard paper</i>).....	17
2.5	Isolasi dan Kegagalannya.....	18
2.5.1	Kegagalan Thermal	18
2.5.2	Kegagalan Intrinsik	19
2.5.3	Kegagalan Streamer	19
2.5.4	Kegagalan Erosi	19
2.5.5	Kegagalan Elektromagnetik.....	20
2.6	Partial Discharge.....	20
2.7	<i>Tracking</i> dan <i>Treeing</i>	20
2.8	Impregnasi Isolasi Kertas	21
BAB III METODELOGI PENGUJIAN.....		23
3.1	Peralatan Pengujian.....	23
3.1.1	Gelas Beaker	23
3.1.2	Plastik wrap dan note.....	24
3.1.3	Oven	24
3.1.4	Mikrometer Sekrup.....	25
3.1.5	Modul Pengujian	25
3.1.6	Pembangkitan Tegangan Tinggi AC	26
3.2	Bahan pengujian	27
3.2.1	Minyak Mineral Nynas Nitro Libra.....	27
3.2.2	Isolasi Kertas.....	28
3.3	Prosedur pengujian <i>breakdown voltage</i>	29
3.4	Metode Pengujian	30
3.4.1	Flowchart Pengujian.....	30
3.4.2	Bentuk, Tebal dan Pemanasan Kertas	31
3.4.3	Perendaman Kertas.....	31
3.4.4	Pengujian <i>Breakdown Voltage</i> Isolasi Kertas.....	32
3.4.5	Menganalisis Kandungan Kadar Selulosa Dalam Kertas.....	33
3.4.6	Menganalisis Hasil Pengujian.....	34
3.4.7	Pembuatan Laporan.....	34
BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS.....		35
4.1	Pengujian Setiap Jenis Isolasi Kertas Tanpa Dilakukan Perendaman	35
4.1.1	Pengujian Isolasi Kertas Press Tanpa Dilakukan Perendaman.....	35
4.1.2	Pengujian Isolasi Kertas Krep Tanpa Dilakukan Perendaman.....	36

4.1.3	Pengujain Isolasi Kertas Pressboard Tanpa Dilakukan Perendaman	37
4.1.4	Pengujian Isolasi Kertas Kraft Tanpa Dilakukan Perendaman	39
4.1.5	Analisis Perbandingan Setiap Jenis Isolasi Kertas Tanpa Dilakukan Perendaman	40
4.2	Pengujian Isolasi Kertas Dengan Dilakukan Perendaman Minyak Isolasi 41	
4.2.1	Pengujian Isolasi Kertas Jenis Press	42
4.2.2	Pengujian Isolasi Kertas Jenis Krep.....	51
4.2.3	Pengujian Isolasi Kertas Jenis Pressboard	60
4.2.4	Pengujian Isolasi Kertas Jenis Kraft	70
4.2.5	Analisis Semua Jenis Isolasi Kertas.....	79
4.3	Analisis Pengujian Kadar Selulosa pada Isolasi Kertas	81
4.4	Analisis Kegagalan Dielektrik pada Pengujian.....	83
BAB V PENUTUP		85
5.1	Kesimpulan	85
5.2	Saran	86
DAFTAR PUSTAKA		87
LAMPIRAN		89
A.	DATASHEET KERTAS PRESS	89
B.	DATASHEET KERTAS KREP (CREPE).....	91
C.	DATASHEET KERTAS PRESSBOARD	93
D.	DATASHEET KERTAS KRAFT.....	95
BIOGRAFI PENULIS		97

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 2.1	Prinsip kerja Transformator	8
Gambar 2.2	Minyak mineral	11
Gambar 2.3	Minyak Sintetis dan Minyak Nabati.....	12
Gambar 2.4	Isolasi Kertas pada Transformator	14
Gambar 2.5	Struktur Unsur Senyawa dari Selulosa dan Hemiselulosa beserta dengan perubahan unsur senyawa yang dihasilkan.....	15
Gambar 2.6	Kertas Kraft (Craft paper).....	16
Gambar 2.7	Kertas Press (<i>Presspaper</i>).....	17
Gambar 2.8	Kertas Krep (Crepe paper).....	17
Gambar 2.9	Kertas pressboard (Pressboard paper)	18
Gambar 3.1	Gambar eksperimental set up pengujian isolasi kertas.....	23
Gambar 3.2	Gelas beaker (a), wrap plastik (b), oven (c).....	24
Gambar 3.3	Mikrometer Sekrup.....	25
Gambar 3.4	Kerangka elektroda bola modul pengujian	25
Gambar 3.5	Konstruksi Transformator Uji	26
Gambar 3.6	Modul Pengujian Pembangkitan AC	27
Gambar 3.7	Minyak Mineral Nynas Nitro Libra.....	28
Gambar 3.8	Flowchart Pengujian <i>breakdown voltage</i> Isolasi Kertas.....	30
Gambar 3.9	Perendaman Isolasi Kertas dalam Minyak Mineral ...	32
Gambar 3.10	Pengujian Isolasi Kertas	32
Gambar 3.11	Proses refluks real (a) dan proses refluks animasi (b) dengan water bath pada metode chesson	34
Gambar 4.1	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada kertas press dengan ketebalan 1mm	49
Gambar 4.2	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada kertas press dengan ketebalan 2mm	50
Gambar 4.3	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada kertas krep dengan ketebalan 1mm	59
Gambar 4.4	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada kertas krep dengan ketebalan 2mm	60

Gambar 4.5	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada kertas pressboard dengan ketebalan 1mm	68
Gambar 4.6	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada kertas pressboard dengan ketebalan 2mm	69
Gambar 4.7	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada kertas kraft dengan ketebalan 1mm	78
Gambar 4.8	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada kertas kraft dengan ketebalan 2mm	79
Gambar 4.9	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada semua jenis kertas dengan ketebalan 1mm	80
Gambar 4.10	Grafik rata-rata nilai <i>breakdown voltage</i> pada semua jenis kertas dengan ketebalan 2mm	80
Gambar 4.11	Grafik persentase kadar selulosa dalam tiap 1 gram isolasi kertas tanpa dilakukan perendaman didalam minyak	81
Gambar 4.12	Grafik persentase kadar selulosa dalam tiap 1 gram isolasi kertas tanpa dilakukan perendaman didalam minyak	82

DAFTAR TABEL

HALAMAN

Tabel 4.1	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> 1mm.....	36
Tabel 4.2	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> 2mm.....	36
Tabel 4.3	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep 1mm	37
Tabel 4.4	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep 2mm	37
Tabel 4.5	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>pressboard</i> 1mm.....	38
Tabel 4.6	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>pressboard</i> 2mm.....	38
Tabel 4.7	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft 1mm.....	39
Tabel 4.8	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft 2mm.....	39
Tabel 4.9	Nilai <i>breakdown voltage</i> pengujian langsung tanpa direndam dengan tebal kertas 1mm.....	40
Tabel 4.10	Nilai <i>breakdown voltage</i> pengujian langsung tanpa direndam dengan tebal kertas 2mm.....	41
Tabel 4.11	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 3 jam	42
Tabel 4.12	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 6 jam	42
Tabel 4.13	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 12 jam.....	43
Tabel 4.14	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 24 jam.....	43
Tabel 4.15	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 36 jam.....	44
Tabel 4.16	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 48 jam.....	44
Tabel 4.17	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 72 jam.....	45
Tabel 4.18	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 3 jam	45
Tabel 4.19	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 6 jam	46
Tabel 4.20	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas <i>press</i> dengan lama perendaman 12 jam.....	46

Tabel 4.21	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas press dengan lama perendaman 24 jam.....	47
Tabel 4.22	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas press dengan lama perendaman 36 jam.....	47
Tabel 4.23	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas press dengan lama perendaman 48 jam.....	48
Tabel 4.24	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas press dengan lama perendaman 72 jam.....	48
Tabel 4.25	Nilai <i>breakdown voltage</i> dengan lama perendaman yang berbeda-beda.....	49
Tabel 4.26	Nilai <i>breakdown voltage</i> dengan lama perendaman yang berbeda-beda.....	50
Tabel 4.27	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 3 jam.....	51
Tabel 4.28	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 6 jam.....	52
Tabel 4.29	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 12 jam.....	52
Tabel 4.30	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 24 jam.....	53
Tabel 4.31	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 36 jam.....	53
Tabel 4.32	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 48 jam.....	54
Tabel 4.33	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 72 jam.....	54
Tabel 4.34	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 3 jam.....	55
Tabel 4.35	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 6 jam.....	55
Tabel 4.36	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 12 jam.....	56
Tabel 4.37	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 24 jam.....	56
Tabel 4.38	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 36 jam.....	57
Tabel 4.39	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 48 jam.....	57

Tabel 4.40	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas krep dengan lama perendaman 72 jam.....	58
Tabel 4.41	Nilai <i>breakdown voltage</i> dengan lama perendaman yang berbeda-beda (1 mm).....	58
Tabel 4.42	Nilai <i>breakdown voltage</i> dengan lama perendaman yang berbeda-beda (2mm).....	59
Tabel 4.43	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 3 jam	61
Tabel 4.44	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 6 jam	61
Tabel 4.45	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 12 jam.....	62
Tabel 4.46	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 24 jam.....	62
Tabel 4.47	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 36 jam.....	63
Tabel 4.48	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 48 jam.....	63
Tabel 4.49	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 72 jam.....	64
Tabel 4.50	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 3 jam	64
Tabel 4.51	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 6 jam	65
Tabel 4.52	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 12 jam.....	65
Tabel 4.53	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 24 jam.....	66
Tabel 4.54	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 36 jam.....	66
Tabel 4.55	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 48 jam.....	67
Tabel 4.56	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas pressboard dengan lama perendaman 72 jam.....	67
Tabel 4.57	Nilai <i>breakdown voltage</i> dengan lama perendaman yang berbeda-beda (1 mm).....	68
Tabel 4.58	Nilai <i>breakdown voltage</i> dengan lama perendaman yang berbeda-beda (2mm).....	69

Tabel 4.59	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 3 jam.....	70
Tabel 4.60	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 6 jam.....	71
Tabel 4.61	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 12 jam.....	71
Tabel 4.62	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 24 jam.....	72
Tabel 4.63	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 36 jam.....	72
Tabel 4.64	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 48 jam.....	73
Tabel 4.65	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 72 jam.....	73
Tabel 4.66	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 3 jam.....	74
Tabel 4.67	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 6 jam.....	74
Tabel 4.68	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 12 jam.....	75
Tabel 4.69	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 24 jam.....	75
Tabel 4.70	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 36 jam.....	76
Tabel 4.71	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 48 jam.....	76
Tabel 4.72	Nilai <i>breakdown voltage</i> kertas kraft dengan lama perendaman 72 jam.....	77
Tabel 4.73	Nilai <i>breakdown voltage</i> dengan lama perendaman yang berbeda-beda (1mm)	77
Tabel 4.74	Nilai <i>breakdown voltage</i> dengan lama perendaman yang berbeda-beda (2mm)	78
Tabel 4.75	Nilai kadar selulosa yang terkandung dalam isolasi kertas tanpa dilakukan perendaman didalam minyak .	81
Tabel 4.76	Nilai kadar selulosa yang terkandung dalam isolasi kertas dengan dilakukan perendaman didalam minyak	82

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik pada saat ini dapat dikategorikan sebagai salah satu kebutuhan utama bagi kalangan masyarakat setelah air dan kebutuhan primer lainnya. Dengan bertambahnya jumlah masyarakat maka membuat permintaan listrik juga akan terus semakin meningkat[1]. Seiring dengan permintaan masyarakat yang terus meningkat maka peluang usaha dari produsen peralatan listrik juga akan terbuka lebar dan terus meningkat, salah satu peralatan listrik yang banyak digunakan adalah transformator.

Kualitas dan kuantitas transformator dari tiap-tiap produsen akan bersaing untuk menjadi yang terbaik agar transformator buatan masing masing produsen akan laku keras di pasaran. Tentu hal tersebut bukan perkara yang sembarangan mengingat transformator merupakan salah satu peralatan listrik yang vital pada sistem kelistrikan dan memiliki harga yang tidak dapat dipandang sebelah mata. Maka dari itu untuk segala komponen yang berada di dalam transformator harus mendapat perhatian khusus, bila diteliti lebih dalam transformator akan mengalirkan arus besar dan dapat menyebabkan area panas dari akibat arus lewat tersebut. Untuk itu di dalam transformator diperlukan isolasi sebagai pengamanannya. Baik dalam mengisolasi panasnya ataupun kelistrikannya. Dalam dunia kelistrikan isolasi dapat dibagi dalam beberapa jenis, diantaranya: isolasi gas, cair, dan padat. Pada tugas akhir ini akan dilakukan pengujian dengan jenis isolasi jenis padat, yaitu isolasi kertas.

Pengujian pada tugas akhir ini akan dilakukan dengan perbedaan jenis kertas isolasi yang berada pada setiap bagian transformator yang memiliki fungsi dan *breakdown* (tegangan tembus) yang berbeda beda. Disertakan juga dilakukan lama perendaman pada setiap jenis isolasi padat yang direndam di dalam minyak transformator yang dibuat bervariasi mulai dari 0 jam atau langsung, 3 jam, 6 jam, 9 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam 48 jam hingga 72 jam. Diharapkan dari hasil pengujian tersebut didapatkan analisis yang mampu membantu bagi produsen transformator yang tentunya semakin hari akan memiliki peran yang semakin penting, terutama dalam melakukan *testing* (pengujian) agar setiap isolasi kertas mampu untuk menahan tegangan tembus yang diharapkan sesuai dengan spesifikasi dari transformator tersebut atau biasa yang disebut dengan FAT (*Factory Acceptance Test*). Selain itu kiranya tugas akhir ini dapat membantu penelitian mengenai kertas isolasi

tentang fungsi tata letak serta tegangan tembusnya yang disesuaikan dengan kondisi setiap bagian transformator dan kebutuhan sistem kelistrikan dilapangan.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini ada beberapa subyek, antara lain adalah sebagai berikut: menentukan jenis kertas isolasi yang biasa digunakan pada transformator dipasaran baik dalam tingkat distribusi, instrument, pengujian hingga transformator daya. Mendesain modul yang akan digunakan saat melakukan pengujian pada laboratorium tegangan tinggi. Bagaimana pengaruh dari lama perendaman kertas dalam minyak isolasi transformator untuk sebelum digunakan. Serta, menentukan kertas isolasi yang baik digunakan sebagai isolasi transformator yang juga harus disesuaikan dengan fungsi dan letak dari setiap kertas isolasi pada bagian transformatornya.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang terjadi dalam tugas akhir ini adalah, dari banyaknya jenis isolasi kertas yang digunakan pada transformator dipasaran hanya beberapa jenis yang dipilih untuk dilakukan pengujian, sehingga perbandingannya hanya mencakup beberapa jenis kertas saja. Parameter yang digunakan dalam tugas akhir tersebut dalam melakukan pengujian masih belum terlalu banyak dan belum terlalu kompleks dibandingkan dengan keadaan nyata dalam transformator. Peralatan pembangkitan pada laboratorium yang sudah terhitung lama dalam penggunaan maupun dalam kalibrasi pada setiap pembangkitan, selain itu dalam hal penggunaan modul pembangkitan masih manual sehingga dalam langkah menaikkan tegangan pada setiap sampel pengujian belum tentu sama dalam memperlakukannya. Dalam analisis isolasi kertas hanya senyawa tertentu yang diteliti yaitu selulosa dan glukosa.

1.4 Metodologi Penelitian

Penelitian atau pengujian pada tugas akhir tersebut bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan ketahanan dari setiap jenis kertas isolasi terhadap tegangan tembus dan efek dari lama perendaman yang dilakukan di dalam minyak untuk waktu tertentu terhadap tegangan tembusnya.

Pengujian dan analisis pada tugas akhir tersebut terbagi dalam empat tahapan, yaitu studi literatur, sistem pengujian, pengujian pengambilan data, serta penyusunan laporan. Pada setiap tahap, akan

dijelaskan secara lengkap bagaimana cara melakukan persiapan pengujian, pembuatan modul, pengujian, hingga analisis serta kesimpulan yang telah dipaparkan dalam tugas akhir ini.

Pada tahap studi literatur, dilakukan pencarian buku, kumpulan jurnal, maupun beberapa makalah yang dapat membantu dan mengarah pada topik yang dibahas yaitu kertas isolasi transformator. Tujuan dari pengumpulan informasi tersebut adalah mengetahui jenis kertas isolasi transformator yang biasa digunakan di pasaran dan mudah untuk didapat untuk dilakukan pengujian.

Selanjutnya, pada sistem pengujian tentu sebelumnya harus dilakukan penyesuaian standard pengujian yang akan digunakan atau prosedur pengujian yang sesuai dengan IEC serta membuat modul pada pengujian yang disesuaikan dengan standard modul tegangan tembus yang ada.

Tahap ini dilakukan pengujian dengan beberapa langkah, yaitu dengan menguji setiap jenis kertas isolasi dengan masing masing lama perendaman di dalam minyak yang berbeda beda dengan ketebalan kertas yaitu 1 milimeter dan 2 milimeter, dengan setiap ketebalan kertas dengan 2 *sample* kertas dan pada setiap sampelnya dilakukan 3 kali pengujian (tegangan tembusnya) pada masing masing titik kertas yang berbeda beda pula.

Selanjutnya yang dilakukan adalah penyusunan laporan, termasuk beberapa teori tentang tegangan tembus yang disebabkan oleh bentuk, luas permukaan isolasi, kekasaran daerah permukaan isolasi. Memasukkan nominal tegangan saat terjadi tegangan tembus pada setiap kali terjadi tegangan tembus pada setiap kali pengujian yang disertakan dengan gambar kertas isolasi transformator saat belum direndam ke dalam minyak sesudah hingga kertas telah mengalami tegangan tembus.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika dalam laporan pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab, sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Pada bab I yang berisi pendahuluan tersebut menjelaskan mengenai latar belakang pemilihan topik tugas akhir, perumusan masalah dan batasan masalah yang belum lengkap baik itu variabel ataupun kelengkapan lain serta keterbatasan alat yang digunakan

dalam tugas akhir tersebut. Selain itu, bab ini juga membahas tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan yang mana pada setiap bab akan dijelaskan tentang apa saja yang terdapat di dalamnya, dan relevansi dari penelitian yang dilakukan.

Bab II Dasar Teori

Pada bab II akan terpaparkan penjelasan mengenai fungsi dari transformator, bagian bagian dari transformator, pengertian isolasi, pentingnya isolasi pada transformator, jenis isolasi, jenis isolasi kertas yang biasa dipakai, dan beberapa teori mengenai tegangan tembus mengapa dapat terjadi pada isolator, seperti : kegagalan asasi, kegagalan elektromekanik, kegagalan *streamer* atau *avalanche*, kegagalan thermal, kegagalan erosi, kegagalan kimia dan elektrokimia, kegagalan akibat fenomena *treeing* dan *tracking*.

Bab III Metode Penelitian

Pembahasan pada bab ini mengenai metode yang digunakan saat melakukan pengujian, dan sebelumnya harus membuat modul pengujian terlebih dahulu yang disesuaikan dengan standard yang ada.

Bab IV Analisis Data Pengujian

Hasil dari penelitian dan pengujian setiap jenis kertas dan lama perendaman akan dibuat per tabelnya dan dijelaskan secara lengkap perbedaan dan analisis baik itu secara elektrik dan analisis secara struktur senyawanya pada bab IV.

Bab V Penutup

Pada bab V ini atau bab penutup ini berisi 2 sub bab yang akan dibahas, yaitu mengenai kesimpulan dan saran dari hasil pengujian yang telah dilakukan.

1.6 Relevansi

Hasil pengujian dan analisis yang diperoleh dari tugas akhir ini bertujuan sebagai referensi produsen transformator dalam menentukan lama perendaman isolasi kertas transformator pada minyak yang disesuaikan dengan desain dan kapasitas transformator saat melakukan pengujian pabrik atau Factory Acceptance Test (FAT), untuk mengetahui karakteristik isolasi kertas serta untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

2.1.1 Pengertian Transformator

Transformator, merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi sebagai penyalur daya atau tenaga dari satu sisi menuju sisi lain tanpa terhubung secara elektrik (langsung). Terdapat jenis-jenis dari transformator yang sering berada di lapangan, diantara lain: transformator penurun tegangan (*step down*), transformator penaik tegangan (*step up*), transformator instrumen, dan transformator pengujian. Transformator penurun tegangan, tentunya sesuai dengan namanya tegangan pada sisi primer lebih tinggi daripada sisi lainnya, dan berakibat akan membuat arus pada sisi sekunder lebih besar dari pada sisi primernya sebaliknya pada transformator penaik tegangan, arus primer akan lebih besar dari pada sisi lainnya.

2.1.2 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja dari transformator adalah mentransferkan atau mengirimkan daya dari satu sisi ke sisi lainnya. Transformator tidak terhubung secara elektris pada kedua sisinya, namun transformator memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik yang dibentuk oleh lilitan sisi primer yang kemudian diterima dengan dari sisi lainnya dengan rumus perbandingan tegangan dan lilitan pada primer dan sekundernya [2] sebagai berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.1)$$

Keterangan:

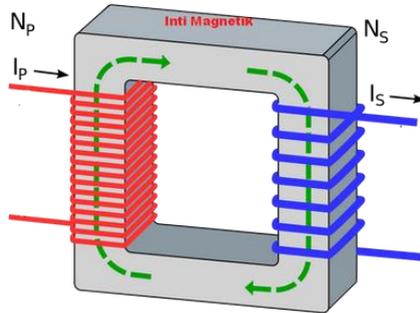
V_p: tegangan pada sisi kumparan primer.

V_s: tegangan pada sisi kumparan sekunder.

N_p: banyaknya jumlah lilitan pada kumparan primer.

N_s: banyaknya jumlah lilitan pada kumparan sekunder.

Pada tegangan dan jumlah kumparan akan berbanding lurus, karena semakin besar tegangan maka semakin banyak pula jumlah belitannya. Namun, apabila berbicara mengenai arus akan berbanding terbalik, karena dimana tegangan besar akan memiliki arus yang kecil, begitupun sebaliknya sesuai dengan rumus transformator sebagai berikut:



Gambar 2.1 Prinsip kerja Transformator

$$S_{in} = S_{out}, \text{ dimana:}$$

$$S = V \cdot I \quad (2.2)$$

Keterangan:

S_{in} = kapasitas/daya masukan transformator

S_{out} = kapasitas/daya keluaran transformator

V = tegangan nominal transformator

I = arus melalui transformator

2.1.3 Kontruksi Transformator

Kontruksi dari transformator juga, menentukan kualitas dari transformator, seperti: fluks yang timbul pada transformator, arus inrush, atau arus magnetisasi pada saat pertama kali transformator akan digunakan, bahkan dari arus inrush tersebut dapat membuat transformator rusak atau terbakar. Kontruksi pada inti transformator saat adalah:

a. Bentuk Core (*core form*)

Bentuk kontruksi core, akan memiliki bentuk fisik yang berbeda dengan bentuk shell, yaitu dimana inti transformator dikelilingi oleh kumparan. Fluks magnetik yang terjadi pada bentuk core memiliki fluks yang penuh tanpa terbagi ataupun bercabang.

b. Bentuk Shell (*shell form*)

Kontruksi transformator dengan inti berbentuk shell, memiliki bentuk fisik kumparan yang dikelilingi oleh inti dari transformator. Sehingga fluks magnetik yang terjadi pada inti transformator terbagi menjadi 2.

Dari dua jenis kontruksi transformator tersebut memiliki perbedaan yang cukup banyak, mulai dari: fluks magnetik pada inti transformator, isolasi dari transformator, rugi-rugi (*losses*), perawatan transformator dan lain-lain.

2.2 Dielektrik

2.2.1 Pengertian Dielektrik

Dielektrik merupakan suatu bahan yang apabila diberikan medan potensial yang berbeda (tegangan) mampu untuk mempertahankan medan potensial tersebut sehingga medan potensial tersebut tidak dengan mudah melewati bahan dielektrik tersebut. Ada beberapa jenis dari dielektrik memiliki pola pengutupan sebagai polarisasinya, seperti kapasitor dan komponen lainnya, namun adapun beberapa contoh bahan atau komponen dielektrik yang tidak memiliki polarisasi antara lain: keramik, dan kertas.

Bahan dielektrik sangat penting dalam dunia kelistrikan karena bahan tersebut digunakan untuk memisahkan antara *circuit* yang dilalui oleh arus dan bagian yang tidak menerima hantaran arus listrik tersebut. Selain itu, agar sistem dapat berjalan sesuai dengan perhitungan dan tidak mengganggu atau merusak sistem tersebut.

Dalam pemilihan bahan dielektrik pada suatu peralatan atau komponen listrik menjadi hal yang patut diperhatikan yaitu dengan meminimalkan semua rugi-rugi yang mungkin terjadi di dalam sistem, memiliki kekuatan mekanisme yang baik, tahan terhadap lingkungan sekitar. Bahan dielektrik dapat terbuat dari 3 jenis, yaitu: gas, cair, dan padat.

2.2.2 Kekuatan Dielektrik

Kekuatan dielektrik merupakan tingkat kemampuan dan ketahanan bahan atau komponen dari setiap jenis bahan dielektrik terhadap tegangan yang diterima pada setiap bagian sisi permukaannya. Tentunya, pada setiap jenis dielektrik memiliki kekuatan yang berbeda-beda tergantung bagaimana peralatan atau komponen dibuat, mulai dari luas permukaan, bentuk permukaan, dan kualitas bahan dari atom bahan penyusun dielektrik tersebut.

Kekuatan dielektrik dari suatu komponen atau peralatan listrik merupakan faktor yang sangat penting dan harus diperhitungkan karena apabila dielektrik tidak mampu menahan medan potensial dari sistem sebagai pemisah antara bagian yang memiliki level tegangan dengan level tegangan berbeda, dan bila terjadi tegangan tembus dalam dielektrik

tersebut maka dapat berpeluang besar mengganggu atau bahkan merusak sistem yang sedang berjalan atau yang telah direncanakan.

2.3 Isolasi

2.3.1 Pengertian Isolasi

Bahan isolasi merupakan komponen atau peralatan yang digunakan sebagai pengaman pada peralatan listrik yang harus mampu mengamankan peralatan atau pengguna dari peralatan tersebut sehingga tidak terjadi lompatan api (*flashover*) dan percik api (*sparkover*). Kekuatan, ketahanan dan kualitas dari setiap isolasi sangatlah berpengaruh terhadap sistem yang berjalan. Isolasi listrik dikatakan baik apabila tingkat ketahanan isolasinya yang tinggi, serta kekuatan dielektriknya yang baik.

2.3.2 Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi merupakan arus bocor yang terjadi pada isolator baik dalam keadaan aman ataupun tidak, namun apabila sudah terjadi arus bocor pada isolator tersebut, maka dapat dikatakan bahwa isolator tersebut sudah dilalui arus dan isolator tersebut sudah tidak dapat digunakan kembali. Karena arus akan cenderung melewati jalur yang sudah ada tersebut, oleh karena itu menyebabkan isolator akan terus mengalami arus bocor.

2.3.3 Jenis-jenis Isolasi

Ada beberapa jenis isolasi yang ada, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Isolasi cair.

Isolasi cair sesuai dengan katanya isolasi cair merupakan daerah yang sulit untuk dilalui oleh listrik. Isolasi cair banyak digunakan dalam dunia kelistrikan terlebih bagi transformator tegangan tinggi, selain sebagai isolasi dalam transformator isolator cair tersebut berfungsi sebagai pendingin. Isolasi jenis cair biasanya berupa minyak dengan berbagai macam jenis dan banyak pertimbangan yang lain, dan kegagalan minyak lebih sedikit kemungkinan dibandingkan dengan zat cair yang lain[3]. Berikut penjelasan dari setiap jenis minyak transformator yang biasa digunakan dipasaran:

- a. Isolasi minyak jenis mineral

Minyak jenis mineral pada transformator merupakan hasil dari pengolahan beberapa jenis minyak bumi antara lain fraksi

dari minyak diesel dan minyak turbin yang kemudian diolah kembali dengan beberapa tahapan dan hasil dari olahan tersebut memiliki struktur kimia yang cukup kompleks. Pada isolasi minyak mineral memiliki warna bening kekuning-kuningan seperti pada gambar 2.3. Minyak trafo jenis mineral terbagi menjadi dua jenis, paraffinic dan napthenic.

Minyak mineral jenis *Paraffinic* dan jenis minyak mineral Napthenic memiliki sifat yang keterbalikan namun dalam satu jenis minyak, yaitu minyak isolasi transformator mineral. Berikut adalah contoh jenis minyak mineral, yang biasa digunakan di pasaran:



Gambar 2.2 Minyak mineral

b. Isolasi minyak sintetis (sintetik)

Isolasi minyak jenis sintetis merupakan hasil dari proses pencampuran atau pengolahan minyak dari bahan sintetis atau bahan kimia tanpa adanya campuran minyak bumi ataupun minyak dari tumbuh-tumbuhan yang kemudian ditambah dengan bahan aditif, ditambahkannya minyak aditif pada minyak sintetis berfungsi sebagai meningkatkan indeks viskositasnya atau kekentalan, menghambat korosi dan oksidasi, penampakan minyak sintetis seperti pada gambar 2.4 (kiri). Dengan bahan penyusun unsur kimia maka minyak sintetis dapat dengan mudah bekerja pada suhu yang rendah maupun suhu tinggi sekalipun. Dengan bahan kimia tentunya minyak sintetis jauh lebih mahal dibandingkan

dengan minyak mineral. Contoh gambar minyak isolasi jenis sintetis adalah sebagai berikut:

c. Isolasi minyak nabati

Isolasi minyak jenis nabati merupakan minyak yang terbuat dari yang sesuai dengan namanya yaitu berasal dari tumbuh-tumbuhan yang diekstrak kemudian diolah sampai menjadi minyak yang bisa digunakan sebagai isolasi listrik, isolasi minyak nabati dapat dilihat pada gambar 2.4 (kanan). Beberapa jenis minyak nabati yang biasa digunakan dalam dunia industri transformator adalah minyak kelapa sawit, minyak randu, dan minyak jagung. Contoh gambar dari minyak isolasi jenis nabati, adalah sebagai berikut:



Gambar 2.3 Minyak Sintetis dan Minyak Nabati

2. Isolasi Gas

Isolasi listrik jenis gas merupakan bahan dielektrik yang dijadikan isolasi atau dapat dikatakan gas tersebut yang sulit untuk dilalui oleh aliran elektron namun tidak semua jenis gas bisa digunakan sebagai isolator listrik yang baik. Berikut ini adalah beberapa jenis gas yang dapat dijadikan isolasi listrik atau yang biasa digunakan didunia kelistrikan adalah sebagai berikut:

a. Hidrogen (H_2)

Hidrogen adalah sebuah jenis gas yang sangat jarang ditemukan dengan unsur H saja namun dengan ikatan partikel H_2 yang juga saling mengikat dengan yang lain.

b. Sulfur Heksafluorida (SF_6)

Sulfur heksafluorida atau SF_6 merupakan jenis gas isolasi yang terbentuk dari hasil reaksi eksotermis atau karena suhu gas antara sulfur (S) dan flour (F) melebur menjadi suatu gas campuran atau gabungan yaitu SF_6 .

3. Isolasi Padat

Isolasi padat merupakan bahan isolator yang sering digunakan dalam sistem kelistrikan transmisi dan gardu induk konvensional. Karena isolasi padat memiliki tahanan yang cukup bagus, dan termasuk dalam isolator yang kuat, serta memiliki harga yang ekonomis dibandingkan dengan jenis isolator yang lain. Isolator padat dibagi menjadi:

a. Bahan isolasi padat

Contoh bahan isolasi bertekstur padat antara lain:

- Kaca, isolator kaca adalah hasil pendinginan dari substansi partikel yang telah dilelehkan. Bahan-bahan pembuat kaca, antara lain silikat (pasir), alkali (Na dan K), kapur, dan oksida timah hitam.
- Polimer, isolator polimer merupakan isolator yang terbentuk dari zat-zat kandungan kimia yang kompleks sehingga memiliki ketahanan dielektrik yang baik dibanding dengan yang lain, namun kekurangan dari polimer adalah harga yang mahal.
- Porselin (keramik), isolator porselin merupakan isolator yang cukup sering digunakan pada level transmisi ataupun pada level distribusi, dengan kekuatan yang cukup menahan tegangan dan daya yang terjadi, harga yang harus diberikan jauh lebih ekonomis daripada polimer walaupun kekuatan isolator porselin juga dibawah isolator polimer.

b. Bahan isolasi mineral

Bahan isolasi mineral diperoleh dari hasil tambang yang digunakan sebagai isolasi memanfaatkan ikatan kimia alaminya atau tanpa melewati sebuah pengolahan proses kimia atau proses termal sebelumnya. Jenis-jenis bahan isolasi mineral, diantaranya adalah: mika, marmar, dan klorida.

- c. **Bahan isolasi plastik**
Plastik merupakan bahan sintetis yang mudah untuk dibentuk atau dibuat lebih keras dan sebaliknya, isolasi plastik biasa digunakan sebagai pelindung konduktor seperti: NYA, NYM, dan NYY.
- d. **Bahan isolasi berserat**
Bahan isolasi berserat memiliki kelebihan dibanding isolasi padat lainnya, diantaranya bentuknya yang fleksibel, kekuatan mekanis yang baik, mudah untuk diolah dan harga yang ekonomis juga menjadi pertimbangan. Namun bukan tanpa kekurangan, bahan isolasi berserat memiliki sifat higroskopis sehingga isolator tersebut mudah sekali untuk membuat rongga antar partikelnya dan tegangan tembus yang efektif rendah pada tiap milimernya. Jenis-jenis dari isolator padat adalah: kayu, tekstil, dan kertas.

2.4 Isolasi Kertas

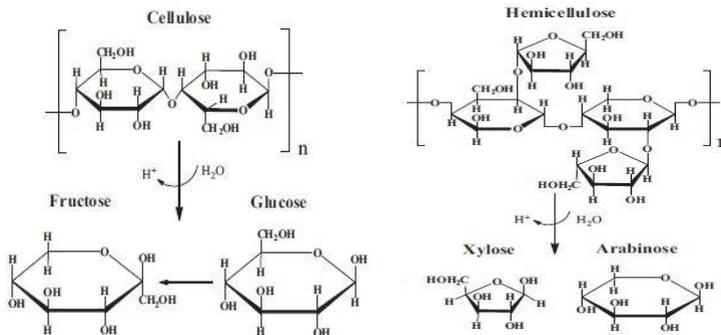
Isolasi kertas banyak dimanfaatkan pada peralatan listrik seperti transformator, isolator kertas selain tipis juga memiliki sifat yang fleksibel yang dapat mengikuti bentuk yang diinginkan oleh produsen transformator. Gambaran isolasi kertas yang diletakkan pada transformator seperti pada gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.4 Isolasi Kertas pada Transformator

2.4.1 Komposisi Dalam Isolasi Kertas

Isolasi kertas sendiri memiliki jenis dan kekuatan dielektrik yang berbeda-beda, walaupun bahan atau komposisi dari setiap jenis kertas adalah sama, diantaranya adalah: selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa dapat tereduksi menjadi fruktosa dan glukosa. Pada hemiselulosa dapat tereduksi menjadi silose dan arabinose, sedangkan pada lignin dapat tereduksi menjadi coniferyl alcohol dan senyawa kimia lainnya. Dengan terbentuknya unsur senyawa seperti fruktosa dan glukosa dari selulosa yang akan tercampur dengan minyak akan membuat senyawa yang disebut furan, sedangkan pada silose dan arabinose akan terbentuk senyawa yang akan bercampur dengan minyak yaitu furfuran. Dua senyawa yaitu furan dan furfuran dapat membantu proses *breakdown voltage* pada transformator, untuk itu diperlukan pengetesan transformator mengenai dua senyawa kimia tersebut. Pada isolasi kertas fungsi senyawa kimia selulosa dapat menahan tekanan elektron pada sisi permukaan kertas. Minyak transformator akan masuk melalui rongga-rongga pada permukaan kertas yang disebut proses adhesi, dari proses adhesi tersebut akan membuat ikatan-ikatan senyawa selulosa menjadi bertambah panjang, hal tersebut akan membuat tiap rongga pada permukaan kertas terisi oleh selulosa hasil dari pemanjangan ikatan tersebut[4]. Gambar 2.6 adalah bentuk unsur senyawa dari selulosa.



Gambar 2.5 Struktur Unsur Senyawa dari Selulosa dan Hemiselulosa beserta dengan perubahan unsur senyawa yang dihasilkan

Dampak negatif dari penggunaan isolasi kertas dalam minyak adalah munculnya kontaminan yang berasal dari kertas yang tercampur pada minyak dengan unsur senyawa furfural dan furan yang dapat menyebabkan salah satu faktor terjadinya *breakdown voltage*.

2.4.2 Kertas Kraft (*Craft Paper*)

Kertas kraft adalah jenis kertas isolasi yang paling sering digunakan, kertas jenis kraft merupakan kertas yang diproduksi dari chemical pulp yang diolah melalui proses kimiawi yang disebut *craft processing*. Dari pengolahan tersebut akan membuat kertas kraft memiliki kekuatan lebih dibanding melalui proses pengolahan mekanis ataupun proses pengolahan lainnya, bentuk dari kertas kraft seperti pada gambar 2.7. Kertas kraft memiliki beberapa kegunaan, antara lain: sebagai pembungkus (*wrapping*), kantong belanja, karung semen, dan isolasi pada transformator. Kertas kraft berfungsi pada transformator biasa digunakan pada bagian isolasi antar lapisan (*layer*) coil pada sisi tegangan tinggi ataupun tegangan rendahnya. Berikut adalah gambar dari kertas kraft yang biasa digunakan pada transformator:



Gambar 2.6 Kertas Kraft (*Craft paper*)

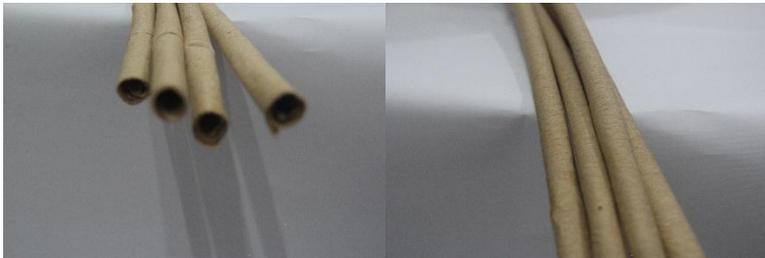
2.4.3 Kertas Press (*Press paper*)

Kertas press diproduksi dengan hasil olahan pulp kayu kraft semuannya tanpa adanya tambahan bahan kimia dalam pembuatannya, gambar 2.8 merupakan bentuk dari kertas press. Kertas press merupakan kertas isolasi yang memiliki ketahanan terhadap tegangan tembus yang baik, pada peralatan listrik seperti transformator kertas press berfungsi diberbagai tempat yaitu sebagai sebagai pembatas antar *coil* dan *core*, *core* dan *core*, serta *core* dan *coil*. Seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.7 Kertas Press (*Presspaper*)

Kertas krep memiliki beberapa fungsi antara lain sebagai kertas kerajinan tangan, kertas lipat, dan isolator. Dalam fungsinya sebagai isolator kertas krep merupakan isolasi kertas yang tergolong cukup penting di dalam peralatan listrik transformator karena kertas krep ini memiliki fungsi pada transformator yang terletak pada *lead connection*, *tap changer* transformator sisi primer maupun sekunder serta pada *bushing* transformator. Kertas krep memiliki komposisi yang hampir sama dengan kertas kraft yaitu: selulosa, glukosa, dan senyawa kimia lainnya. Perbedaan krep dan kraft, yaitu pada krep memiliki tekstur yang kasar pada permukaannya dan persentase dari selulosa, glukosa ataupun senyawa kimia lainnya yang berbeda juga. Berikut adalah contoh gambar dari kertas krep adalah sebagai berikut:



Gambar 2.8 Kertas Krep (*Crepe paper*)

2.4.4 Kertas Pressboard (*Pressboard paper*)

Kertas pressboard ini memiliki komponen yang sama dengan kertas press, dalam komponen atau komposisi dalam kertas pressboard memiliki rongga yang kecil. Kertas pressboard juga memiliki permukaan yang

lebih keras dan padat dibandingkan dengan kertas press. Fungsi dari kertas pressboard adalah sebagai pembatas bagian alas, atas, dan samping *coil* dan *core* dengan bungkus (*case*) dari transformator, selain itu fungsi dari kertas tersebut adalah sebagai pengamanan konduktor pentanahan (*grounding*) pada transformator.



Gambar 2.9 Kertas pressboard (Pressboard paper)

2.5 Isolasi dan Kegagalannya

Isolasi dapat dikatakan bahwa itu adalah isolasi yang baik adalah pada saat mampu menahan tekanan listrik pada permukaan, salah satu yang membuat kekuatan dielektrik isolasi kertas bertambah dengan cara merendam di dalam minyak, karena dengan demikian terjadi suatu proses adhesi pada rongga-rongga isolasi kertas[5]. Kegagalan didalam kelistrikan dapat terjadi oleh karena banyak penyebab mulai dari kejadian alam, peralatan atau kesalahan pengguna (*human error*). Salah satu faktor kegagalan dari kelistrikan adalah isolasinya yang ditembus oleh arus listrik[6]. Dari setiap jenis isolasi yang ada seperti: padat, cair, dan gas. Isolasi jenis padat adalah jenis isolasi yang berbeda, karena apabila telah atau pernah terjadi arus bocor pada isolasi, isolasi padat tidak dapat diperbaiki kembali, sifat ini disebut non-self restoring.

2.5.1 Kegagalan Thermal

Kegagalan thermal, merupakan kegagalan pada peralatan listrik, sesuai dengan pembahasan, yaitu peralatan listrik berupa isolasi. Penyebab kegagalan thermal dikarenakan oleh munculnya laju temperature atau suhu dalam suatu atau beberapa titik yang tidak sebanding dengan laju kecepatan pembuangan panasnya dan akan

berlangsung terus menerus yang membuat laju panas pada titik tersebut melebihi batas kemampuan dari isolasinya. Sehingga membuat isolasi tersebut tidak sesuai dengan ketahanan tegangan tembus yang mampu ditahannya. Laju thermal pada masing-masing isolasi berbeda-beda sesuai dengan komponen penyusunnya.

2.5.2 Kegagalan Intrinsik

Kegagalan instrinsik, merupakan sebuah kegagalan isolasi yang disebabkan diterapkan tegangan yang tinggi pada lapisan dielektrik yang tipis tanpa pengaruh dari pihak luar seperti tekanan, suhu, bahan elektroda, permukaan elektroda. Kegagalan ini terjadi dalam waktu yang cukup singkat, dengan memiliki medan listrik yang cukup tinggi. Sehingga tegangan tinggi (energi dari sumber) mengenai lapisan celah yang seharusnya tidak boleh energi luar tersebut masuk sampai kepada lapisan konduksi.

2.5.3 Kegagalan Streamer

Kegagalan streamer terjadi oleh karena ion-ion pada yang terlepas yang diberi tegangan dan arus akan tertahan oleh karena titik jenuh tegangan, akan saling menumbuk yang kemudian akan terjadi banjir (*avalanche*) elektron, sehingga elektron tersebut akan membentuk sebuah kumpulan elektron, kemudian akan membuat medan local yang terus terbentuk hingga akan muncul jembatan serat-serat yang jika itu terus terjadi maka akan terjadi tegangan tembus (*breakdown voltage*).

2.5.4 Kegagalan Erosi

Pada pembuatan sebuah isolasi baik itu isolasi dalam bentuk apapun tidak akan selalu sempurna dalam pengerjaannya dengan isolasi penuh pada setiap sisi, sehingga apabila terdapat rongga pada salah satu sisi dengan luas tertentu akan membuat ruang yang masuk baik itu rongga udara ataupun yang lain, yang tentunya akan membuat kedua daerah ini mempunyai kekuatan medan atau kekuatan dielektrik yang berbeda daripada bahan isolasi yang tertutup rapi. Pada saat rongga berisi udara atau zat lain tersebut terdapat konsentrasi medan listrik, maka nilai tegangan normal kekuatan medan pada rongga dapat melebihi kekuatan isolasi dalam keadaan normal, namun dapat menyebabkan terjadinya kegagalan. Kekuatan medan dalam rongga yang rapuh tersebut ditentukan oleh perbandingan dari permitivitas dan bentuk rongga serta luasan

rongga. Seperti teori, bahwa setiap pelepasan muatan akan timbul panas, dan apabila terjadi hal tersebut dalam rongga, lama kelamaan rongga tersebut akan terjadi karbonisasi dan dapat merusak susunan kimia isolasi di sekitarnya dan terjadilah erosi isolasi yang lama kelamaan akan semakin lebar.

2.5.5 Kegagalan Elektromagnetik

Kegagalan elektromagnetik, merupakan sebuah kegagalan yang diakibatkan oleh terdapatnya sebuah perbedaan polaritas dari kedua elektroda yang mengapit isolasi tersebut baik itu cair, padat ataupun gas. Sehingga timbul perbedaan potensial dan tekanan listrik pada bahan isolasi tersebut. Dari tekanan listrik tersebut akan muncul juga tekanan lain, yaitu tekanan mekanik yang akan membuat elektroda tersebut tarik menarik seperti magnet diantara kedua elektroda tersebut.

2.6 Partial Discharge

Partial Discharge merupakan sebuah peristiwa atau kejadian pelepasan dan loncatan listrik yang berupa bunga api yang terjadi pada salah satu titik dari sebuah isolasi baik itu cair, padat atau gas dan tepatnya pada rongga dalam sebagai efek dari tingginya beda potensial yang terjadi. Pengukurannya partial discharge tergolong hal yang sangat penting, karena dari hasil pengujian tersebut akan mendapat data yang mampu untuk menentukan keandalan dari suatu peralatan yang dapat disebabkan oleh lamanya penggunaan dan kegagalan tersebut mampu dianalisis dengan tepat. Adanya partial discharge dalam bahan isolasi dapat ditentukan dengan tiga metode yaitu: dengan pengukuran tegangan langsung pada permukaan objek isolator, dengan pengukuran arus didalam rangkaian tambahan, serta mengukur intensitas frekuensi radiasi gelombang elektromagnetik yang disebabkan oleh adanya partial discharge tersebut.

2.7 Tracking dan Treeing

Apabila suatu bahan isolasi padat terkena tekanan listrik dalam jangka waktu yang lama, maka akan kemungkinan terjadi kegagalan. Karena dengan tekanan listrik tersebut arus akan mengalir di permukaan isolator dan dengan demikian akan membuat permukaan isolator panas lama kelamaan permukaan isolator akan timbul sebuah percikan (discharge). Percikan tersebut akan menyebar selama proses

perjalanannya dan akan mengalami konduksi sehingga pada permukaan isolator mudah sekali membuat rongga-rongga udara yang menyebabkan terbentuknya jalur (*tracking*) tegangan tembus yang terjadi pada isolasi. Selain itu, setelah munculnya jalur pada rongga isolasi kertas, akan terbentuklah cabang cabang dimana itu menyerupai pepohonan atau yang biasa disebut (*treeing*).

2.8 Impregnasi Isolasi Kertas

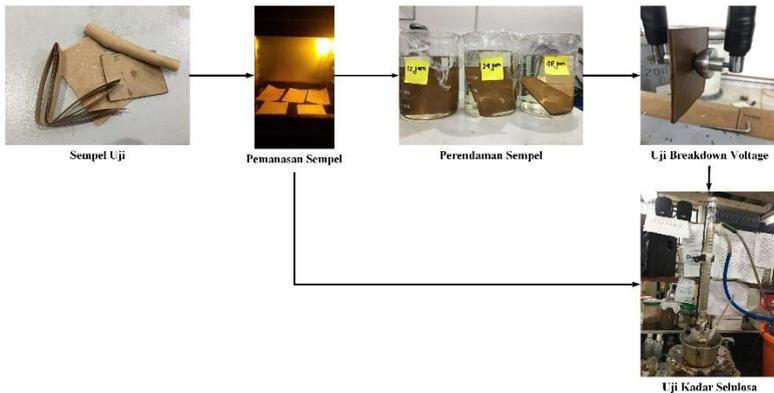
Impregnasi isolasi kertas merupakan suatu kejadian dimana isolasi kertas direndam dalam isolasi cair (minyak) yang bertujuan untuk menambah kekuatan dielektrik dari isolasi kertas. Perendaman tersebut sesuai dengan teori adhesi bahwa rongga dan pori-pori udara pada kertas isolasi tersebut akan tertutup dengan minyak yang telah terserap di dalamnya dan isolasi kertas tersebut akan membentuk susunan komposit yang lebih sempurna[7].

Dalam transformator isolasi kertas merupakan komponen yang penting dimana setiap jenis kertas isolasi memiliki peran tersendiri, selain itu isolasi kertas memiliki kelebihan, yaitu isolator yang mampu menahan tekanan mekanis maupun elektrik sehingga isolator tersebut tidak dapat diremehkan dalam transformator. Dengan semakin lamanya penggunaan transformator maka kekuatan dielektrik dari isolator kertas akan semakin berkurang, maka dari itu diperlukan minyak agar menambah kekuatan dielektrik[8]. Namun demikian, minyak dan kertas isolasi ini memiliki kekurangan dimana kertas tersebut lama-kelamaan akan tergerus oleh minyak sehingga kertas tersebut dapat menjadi kontaminan dari minyak isolasi transformator.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB III METODELOGI PENGUJIAN

Pada bab ini akan menjelaskan mengenai langkah-langkah pengujian dan metode yang digunakan secara terperinci dan lengkap. Yang pertama peralatan yang digunakan, kemudian bahan yang dibutuhkan, langkah selanjutnya adalah mempersiapkan sebelum melakukan pengujian mulai pemilihan kertas hingga dilakukannya pengujian pada setiap sample yang dibutuhkan.



Gambar 3.1 Gambar eksperimental set up pengujian isolasi kertas

3.1 Peralatan Pengujian

Peralatan pengujian merupakan perlengkapan yang dibutuhkan untuk mendukung proses pengujian sehingga dapat berjalan, peralatan pengujian antara lain: gelas beaker, plastik wrap dan oven, serta pembangkitan AC.

3.1.1 Gelas Beaker

Gelas beaker yang digunakan pada pengujian merupakan gelas beaker dengan bervolume 1000 ml, ACG IWAKI CTE33, seperti pada gambar 3.2 (a). Gelas beaker pada pengujian ini digunakan sebagai wadah untuk merendam kertas isolasi didalam minyak dengan volume 600 ml dan lama perendaman yang bervariasi.

3.1.2 Plastik wrap dan note.

Plastik wrap pada pengujian ini berfungsi sebagai pelindung dari udara dan debu yang berterbangan untuk masuk ke dalam gelas beaker serta menjaga minyak dan kertas tetap dalam keadaan bersih atau tidak terkontaminasi dengan zat-zat yang mungkin masuk dari luar, yang terpasang sesuai dengan gambar 3.2 (b). Dan note pada pengujian ini digunakan untuk menempelkan label pada beaker agar tidak terjadi salah pengujian.

3.1.3 Oven

Oven yang dipakai dalam menyelesaikan pengujian tugas akhir ini bertipe Ox-8830 Oxone Oven Master 30 liter, sesuai dengan gambar 3.2 (c). Oven tersebut digunakan untuk memanaskan kertas sebelum direndam di dalam minyak dengan tujuan agar kertas benar-benar kering dan tidak terkontaminasi dengan air ataupun zat-zat yang lain yang berada dalam pori-pori atau rongga dari kertas isolasi tersebut.



(a)

(b)



Gambar 3.2 Gelas beaker (a), wrap plastik (b), oven (c)

3.1.4 Mikrometer Sekrup

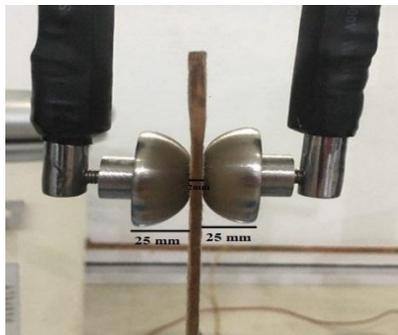
Mikrometer biasa digunakan untuk mengukur ketebalan, dan diameter dari benda tertentu, gambar micrometer sekrup ditunjukkan paa gambar 3.3. Pada pengujian ini mikrometer sekrup digunakan untuk mengukur ketebalan dari setiap jenis sample kertas yang akan diuji dengan ketebalan masing masing 1 jenis kertas dibuat memiliki ketebalan 1mm dan 2mm. Dengan pembacaan yang tertera pada penunjukkan angka.



Gambar 3.3 Mikrometer Sekrup

3.1.5 Modul Pengujian

Pada modul pengujian, pada ujung kedua sisinya ditaruh elektroda bola sesuai dengan standart yang tercantum di dalam IEC-60156 yaitu elektroda bola sebesar 25mm, seperti pada gambar 3.4.



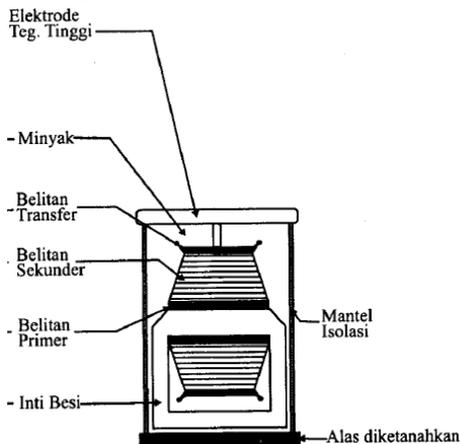
Gambar 3.4 Kerangka elektroda bola modul pengujian

3.1.6 Pembangkitan Tegangan Tinggi AC

Pembangkitan tegangan tinggi AC, pembangkitan tegangan tinggi AC digunakan untuk pengujian ketahanan isolasi kertas yang telah dipilih. Pembangkitan tegangan AC berasal dari sumber AC yang kemudian masuk kedalam transformator *step up*, agar tegangan output dapat lebih tinggi dari pada tegangan sumber. Persyaratan pembangkitan tegangan tinggi AC adalah:

- Nilai tegangan testing merupakan nilai puncak (V_{peak}), dan untuk mendapatkan nilai V_{rms} maka nilai puncak tersebut harus dibagi $\sqrt{2}$ terlebih dahulu.
- Bentuk gelombang output yang terbentuk harus sinusoidal yang sempurna.
- Gelombang tegangan yang muncul harus memiliki nilai *ripple* atau gangguan yang rendah (5%).

Pada konstruksi transformator, transformator pengujian menggunakan 1 phasa dan kabel yang diketanahkan, transformator pengujian memiliki beberapa bagian, seperti pada gambar 3.5. Traformator pengujian tersebut mampu menghasilkan tegangan output hingga 100kV, transformator pengujian yang digunakan pada Laboratorium Tegangan Tinggi menggunakan transformator yang termasuk transformator uji tanpa menggunakan *bushing*.



Gambar 3.5 Kontruksi Transformator Uji

Dalam pembangkitan tegangan tinggi AC, input dari sumber kemudian masuk kedalam autotransformator yang kemudian dinaikkan hingga tegangannya hingga level tertentu dan masuk kedalam resistor yang bertujuan untuk menghindari arus balik bila terjadi *short circuit*, dan masuk kedalam modul pengujian hingga sampai kepada elektroda, yang digambarkan sesuai dengan gambar 3.6 berikut:



Gambar 3.6 Modul Pengujian Pembangkitan AC

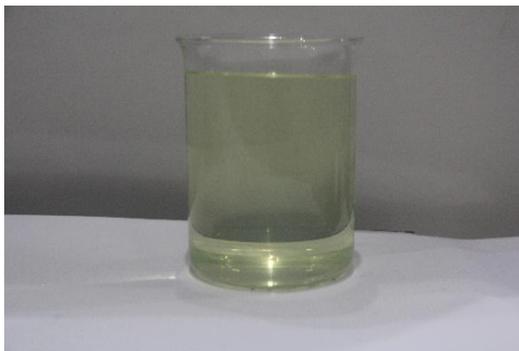
3.2 Bahan pengujian

Bahan pengujian, merupakan sesuatu yang penting oleh karena bahan pengujian merupakan salah satu bagian terpenting dalam pengujian, beberapa bahan pengujian pada tugas akhir ini adalah: isolasi minyak jenis mineral nynas nitro libra, isolasi kertas kraft, kertas krep, kertas press, dan kertas pressboard.

3.2.1 Minyak Mineral Nynas Nitro Libra

Minyak isolasi jenis Mineral Nynas Nitro Libra merupakan minyak yang tergolong sering digunakan dipasaran terutama pada transformator milik PT. PLN bagian distribusi. Minyak mineral nynas nitro libra yang digunakan untuk melakukan pengujian diperoleh dari PT. Bambang Djaja Transformer (B&D). Minyak mineral memiliki warna bening kekuning kuningan seperti pada gambar 3.7. Minyak tersebut dalam pengujian berfungsi sebagai tempat perendaman kertas isolasi yang akan digunakan untuk menguji tegangan tembus (*breakdown voltage*) dengan rentang waktu yang berbeda-beda antara 0 hingga 72 jam setiap jenis kertasnya.

Minyak Mineral Nynas Nitro Libra, merupakan minyak mineral dengan memiliki warna yang bening sesuai dengan standart IEC 60296 yang ada (sesuai dengan datasheet yang terlampir).



Gambar 3.7 Minyak Mineral Nynas Nitro Libra

3.2.2 Isolasi Kertas

Kertas isolasi merupakan bahan pengujian yang akan melalui beberapa langkah sebelum dilakukan tes tegangan tembus (*breakdown voltage test*). Kertas isolasi tersebut melalui pemilihan jenis kertas hasil diskusi dari dosen pembimbing dan *engineering department* dari PT. Bambang Djaja Transformer (B&D). Tidak hanya mengenai pemilihan logistik (pengadaan) setiap jenis kertas berasal dari PT. Bambang Djaja Transformer (B&D). Berikut adalah jenis kertas yang akan digunakan pada pengujian ini:

- a. Kertas kraft, kertas yang digunakan untuk pengujian ini memiliki ketebalan 0.05 milimeter. Hasil diskusi dengan dosen pembimbing 1 dan dosen pembimbing 2 bahwa setiap jenis kertas yang diuji memiliki ketebalan 1mm dan 2mm.
- b. Kertas krep, kertas tersebut memiliki tekstur yang tidak rata dan memiliki ketebalan pada setiap lembarnya 0.2 milimeter. Seperti pada kertas kraft kertas krep pada saat dilakukan pengujian juga memiliki ketebalan 1mm dan 2mm.
- c. Kertas press, kertas ini termasuk kertas yang sulit untuk dilakukan pengujian karena memiliki lebar hanya cm. Untuk itu pada kertas press, hanya dilakukan pengujian 2 kali dalam 1 *sample* kertas. Kertas press memiliki ketebalan pada setiap lembarnya 0.5

milimeter. Seperti jenis kertas yang lain setiap pengujian kertas yang diuji memiliki ketebalan 1mm dan 2mm.

- d. Kertas pressboard, memiliki komponen atau elemen penyusun yang hampir sama dengan kertas press, namun pada kertas pressboard memiliki rongga yang lebih padat, kuat dan kaku. Kertas pressboard memiliki ketebalan 2mm, sehingga diperlukan penipisan kertas agar kertas mampu memiliki ketebalan 1mm, dan untuk 2mm kertas pressboard dapat langsung digunakan.

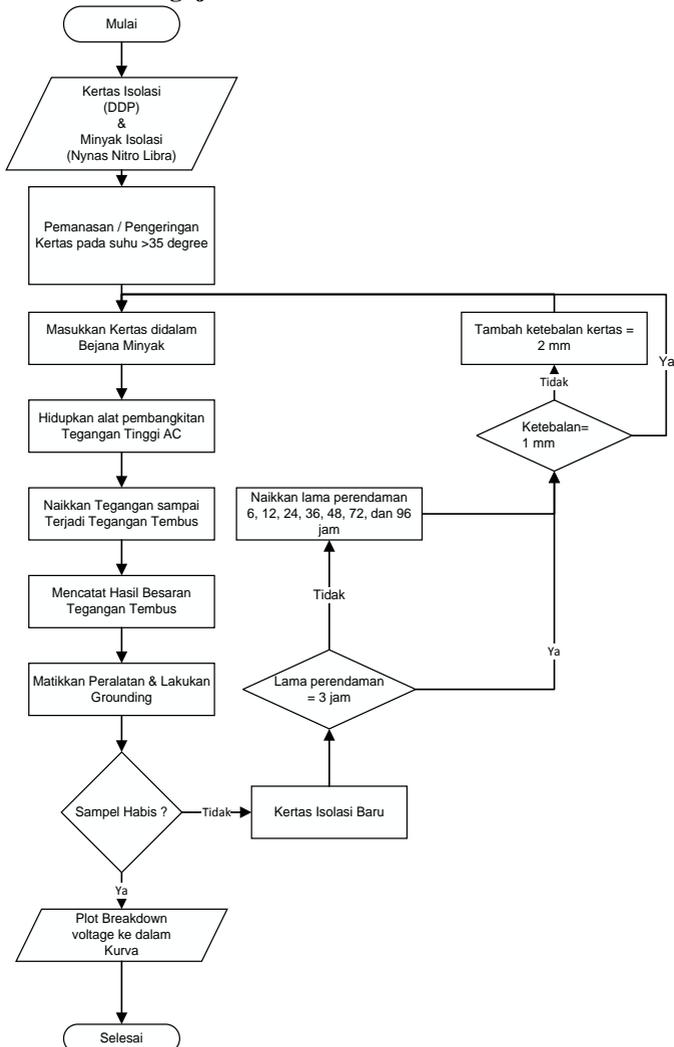
3.3 Prosedur pengujian *breakdown voltage*

Terdapat beberapa prosedur pengujian yang harus diperhatikan saat melakukan pengujian agar tidak terjadi hal-hal yang membahayakan bagi keselamatan pengguna dan menghindari kerusakan alat pengujian, prosedur pengujiannya antara lain sebagai berikut:

- a. Pemasangan rangkaian pembangkitan AC terpasang dengan benar sesuai dengan gambar dan standart yang ditetapkan.
- b. Langkah-langkah pengujian harus dilakukan sesuai dengan flowchart yang ada pada gambar 3.8 apabila kertas tersebut direndam dalam minyak dengan lama perendaman bervariasi mulai dengan langsung hingga perendaman 72 jam.
- c. Pemasangan tanda berbahaya di daerah pembangkitan AC, agar tidak ada orang mendekati modul dan transformator pengujian pada saat dilakukan pengujian.
- d. Pengecekan konduktor pentanahan (*grounding*) harus terpasang dengan benar dan aman.

3.4 Metode Pengujian

3.4.1 Flowchart Pengujian



Gambar 3.8 Flowchart Pengujian *breakdown voltage* Isolasi Kertas

Flowchart pada gambar 3.8 merupakan langkah-langkah yang harus dilakukan secara bertahap dalam setiap melakukan pengujian *breakdown voltage* pada masing-masing jenis kertas. Setelah dilakukan pengujian *breakdown voltage* akan dilakukan analisis komposisi dampak dari lama perendaman pada unsur senyawa selulosa pada setiap jenis isolasi kertas.

3.4.2 Bentuk, Tebal dan Pemanasan Kertas

Semua bahan logistik isolasi kertas yang didapat dari PT. Bambang Djaja Transformer (B&D), dengan demikian isolasi kertas memiliki bentuk dan tebal sesuai dengan kebutuhan pabrik yang akan diupayakan agar sesuai dengan standart pengujian. Untuk kertas pressboard memiliki luasan kertas yang lebar dan memiliki ketebalan 2mm. Kertas pressboard tersebut untuk masuk dalam tahap selanjutnya, maka melakukan proses pemotongan dan untuk pengujian 1mm harus dilakukan pengamplasan pada permukaan kertas agar tebal kertas menjadi ± 1 mm dengan toleransi 5%. Sedangkan pada kertas kraft memiliki ketebalan 0.05 mm, sehingga dibutuhkan 20 lipatan untuk menguji kertas dengan tebal 1mm dan 40 lipatan untuk 2mm.

Setelah sesuai dengan ukuran, langkah selanjutnya adalah ketebalan yang tepat isolasi kertas tersebut akan dimasukkan kedalam oven dengan suhu lebih dari 65°C selama 30 menit. Dipanaskan kedalam oven dimaksudkan dengan tujuan agar kadar air taupun zat cair lainnya dapat menguap sehingga rongga atau pori-pori pada isolasi kertas benar-benar terisi oleh udara dengan baik tanpa ada zat yang lain yang akan menjadi kontaminannya.

3.4.3 Perendaman Kertas

Langkah atau metode selanjutnya yang harus dilakukan setelah melakukan pemanasan kertas pada oven, yaitu perendaman isolasi kertas pada minyak mineral nynas nitro libra yang telah dituang kedalam bejana (gelas beaker) dengan ukuran 1000ml sebanyak 600 ml dengan suhu ambient (suhu ruangan). Dengan variable waktu perendaman yang berbeda-beda mulai dari 0 jam atau tanpa perendaman, 3, 6, 12, 24, 36, 48, dan 72jam, perendaman kertas dalam minyak sesuai dengan gambar 3.9. Dengan bertambahnya waktu perendaman maka proses adhesi, yaitu zat cair atau minyak masuk kedalam pori-pori atau rongga kertas dengan lebih sempurna pada jam-jam tertentu sebelum dilakukan pengujian. Dengan demikian *breakdown* pada setiap lama perendaman akan

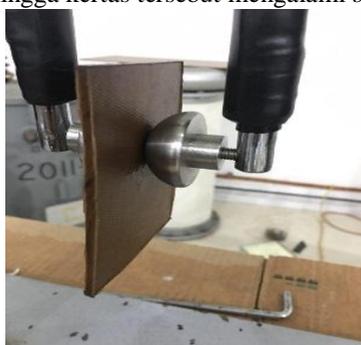
mengalami perubahan baik secara signifikan ataupun hanya mengalami perubahan dibelakang angka koma.



Gambar 3.9 Perendaman Isolasi Kertas dalam Minyak Mineral

3.4.4 Pengujian *Breakdown Voltage* Isolasi Kertas

Setelah direndam di dalam minyak mineral dengan lama perendaman tertentu, masing-masing dari sampel kertas tersebut akan dilakukan pengujian pada modul dengan menjepit setiap sampel isolasi kertas tersebut dengan elektroda bola pada kedua sisi dengan rapat sehingga jarak antar elektroda sama dengan tebal isolasi kertas, sesuai dengan gambar 3.10. Dengan menyiapkan pembangkitan untuk dilakukan pengujian, jenis pembangkitan yang digunakan adalah jenis pembangkitan AC. Saat dilakukan pengujian kertas akan ditembak tegangan tertentu hingga kertas tersebut mengalami *breakdown*.



Gambar 3.10 Pengujian Isolasi Kertas

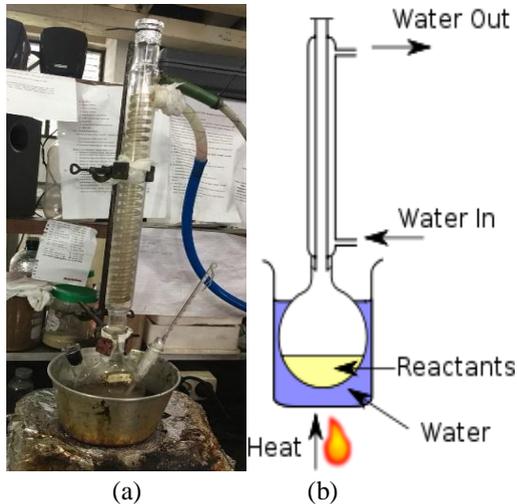
3.4.5 Menganalisis Kandungan Kadar Selulosa Dalam Kertas

Setelah melakukan pemanasan pada isolasi kertas yang bertujuan untuk mengurangi kadar air di dalamnya, kertas tersebut akan diuji kadar selulosa murni didalamnya dengan metode “chesson”, metode chesson merupakan metode yang dipakai untuk mengetahui kadar lignin, selulosa, dan hemiselulosa dalam suatu zat padat tertentu. Metode chesson merupakan metode yang mengacu kepada berat pada zat tertentu sebelum dan setelah melakukan langkah pengujian dengan mereduksi unsur senyawa yang tidak dicari hingga ditemukan unsur senyawa murni yang diinginkan. Dalam melakukan pengujian dengan menggunakan metode chesson harus diperhatikan langkah-langkahnya, sebagai berikut:

1. Menimbang 1 g sampel kering (berat a) ditambahkan 150 ml H₂O dan direflux, seperti pada gambar 3.11 dengan suhu 100°C yang ditambahkan oilbath selama 1 jam.
2. Menyaring hasilnya dan mencuci residu dengan air panas hingga filtratnya jernih (± 300 ml air yang ditambahkan).
3. Mengeringkan residu dengan oven pada suhu 60°C sampai beratnya konstan dan kemudian ditimbang (berat b).
4. Menambahkan 150 ml H₂SO₄ 1 N ke residu, kemudian direflux dengan oilbath selama 1 jam pada suhu 100°C.
5. Menyaring hasilnya dan mencuci residu dengan air panas hingga pHnya netral (± 300 ml) dan mengeringnya residu hingga beratnya konstan (berat c).
6. Menambahkan larutan H₂SO₄ 72% sebanyak 10 ml ke dalam residu kering dan direndam pada suhu kamar selama 4 jam.
7. Menambahkan larutan H₂SO₄ 1 N sebanyak 150 ml dan direflux pada suhu 100°C dengan oilbath selama 1 jam.
8. Menyaring residu dan mencuci residu dengan H₂O sampai netral (± 400 ml).
9. Menyaring residu dengan oven pada suhu 60°C sampai beratnya konstan dan ditimbang (berat d)
10. Mengabukan residu dengan furnace pada suhu 600°C selama 4 jam dan ditimbang (berat e).

Setelah melakukan 10 langkah tersebut, maka akan didapat rumus dari pada kadar selulosa dengan memperhatikan berat yang terdapat dalam isolasi kertas, sebagai berikut:

$$\text{Kadar Selulosa} = \frac{\text{berat c} - \text{berat d}}{\text{berat a}} \times 100\% \quad (3.1)$$



Gambar 3.11 Proses refluks real (a) dan proses refluks animasi (b) dengan water bath pada metode chesson

3.4.6 Menganalisis Hasil Pengujian

Setelah mendapatkan semua data yang dibutuhkan akan dilakukan penginputan data kedalam software Microsoft Excel dan akan didapat sebuah grafik dengan hasil pengujian tersebut. Dari masing-masing grafik akan dianalisis secara terperinci antara lama perendaman dan setiap jenis-jenis kertasnya. Selain itu, pada analisis pengujian tersebut akan dibuat sebuah kesimpulan pada pengujian.

3.4.7 Pembuatan Laporan

Pembuatan laporan dilaksanakan secara bertahap mulai dari awal pada saat bab 1, sesuai dengan proposal. Dalam pengerjaan bab 2 dibutuhkan referensi dan sumber yang terpercaya, sehingga dapat ditanggung jawabkan. Sedangkan pada bab 3 dan bab 4 dikerjakan selama proses pengujian berlangsung dan setelah pengujian berlangsung. Dalam pengerjaan bab selanjutnya atau bab 5 akan diambil beberapa kesimpulan dari pengujian dan hasil analisis.

BAB IV

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pada bab ini akan membahas tentang dari setiap sampel isolasi kertas pada pengujian yang dilakukan pada Laboratorium Tegangan Tinggi, pada hasil pengujian menggunakan tabel dan grafik untuk mempermudah dalam menganalisisnya. Pada setiap sampel isolasi kertas akan dilakukan 3 titik pengujian, dan pada setiap jenis isolasi kertas dilakukan pengujian 2 sampel dengan ketebalan yang sama.

4.1 Pengujian Setiap Jenis Isolasi Kertas Tanpa Dilakukan Perendaman

Pada sub-bab ini akan dibahas bagaimana hasil dari *breakdown voltage* dengan variabel jenis isolasi kertas, dengan beda ketebalan kertas 1mm dan 2mm dari masing-masing jenis isolasi kertas. Pengujian akan dilakukan secara bergantian pada setiap jenisnya.

Sebelum dilakukan pengujian kertas akan dipanaskan agar kertas benar-benar kering pada saat diuji. Pada pengujian dilakukan tegangan yang terbangkitkan merupakan tegangan tinggi AC, yang terus dinaikkan secara bertahap mulai dari 0 volt hingga terjadinya *breakdown* pada setiap jenis sampel isolasi kertas. Langkah selanjutnya akan dicatat pada tabel yang sudah dibuat sebelumnya, untuk dilakukan pengamatan dan melihat karakteristik dalam bentuk kurva pada setiap jenis isolasi kertas. Pada pengujian ini akan dilihat karakteristik dari kertas tanpa dilakukan perendaman atau dapat dikatakan pengujian ini merupakan karakteristik murni dari setiap jenis isolasi kertas.

4.1.1 Pengujian Isolasi Kertas Press Tanpa Dilakukan Perendaman

Pengujian pertama yang akan dilakukan merupakan jenis kertas press, mulai dari tegangan 0 volt hingga isolasi kertas tersebut mengalami *breakdown*, yang akan terus dilanjutkan oleh jenis isolasi kertas yang lain.

Tabel 4.1 Nilai *breakdown voltage* kertas *press* 1mm

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	7.38
	2	7.22
	3	7.43
Rata-rata bdv sampel 1		7.34
Sampel Kertas 2	1	7.32
	2	7.55
	3	7.49
Rata-rata bdv sampel 2		7.45
Rata-rata		7.40

Tabel 4.2 Nilai *breakdown voltage* kertas *press* 2mm

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	9.32
	2	9.16
	3	9.27
Rata-rata bdv sampel 1		9.25
Sampel Kertas 2	1	9.08
	2	9.59
	3	9.11
Rata-rata bdv sampel 2		9.26
Rata-rata		9.26

4.1.2 Pengujian Isolasi Kertas Krep Tanpa Dilakukan Perendaman

Setelah mendapatkan hasil *breakdown voltage* kertas *press*, pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 pengujian dilanjutkan dengan menggunakan bahan pengujian adalah kertas isolasi krep (*crepe paper*).

Tabel 4.3 Nilai *breakdown voltage* kertas krep 1mm

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	12.03
	2	12.28
	3	12.11
Rata-rata bdv sampel 1		12.14
Sampel Kertas 2	1	12.46
	2	12.15
	3	12.03
Rata-rata bdv sampel 2		12.21
Rata-rata		12.18

Tabel 4.4 Nilai *breakdown voltage* kertas krep 2mm

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	17.00
	2	17.23
	3	17.14
Rata-rata bdv sampel 1		17.12
Sampel Kertas 2	1	16.89
	2	17.35
	3	17.10
Rata-rata bdv sampel 2		17.11
Rata-rata		17.12

4.1.3 Pengujian Isolasi Kertas Pressboard Tanpa Dilakukan Perendaman

Setelah mendapatkan hasil breakdown voltage kertas krep, pada tabel 4.3 dan tabel 4.4 pengujian dilanjutkan dengan menggunakan bahan pengujian adalah kertas isolasi pressboard.

Tabel 4.5 Nilai *breakdown voltage* kertas *pressboard* 1mm

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	11.30
	2	11.02
	3	11.00
Rata-rata bdv sampel 1		11.11
Sampel Kertas 2	1	11.10
	2	10.66
	3	11.23
Rata-rata bdv sampel 2		11.00
Rata-rata		11.05

Tabel 4.6 Nilai *breakdown voltage* kertas *pressboard* 2mm

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	16.21
	2	15.26
	3	15.03
Rata-rata bdv sampel 1		15.50
Sampel Kertas 2	1	15.66
	2	15.25
	3	16.40
Rata-rata bdv sampel 2		15.77
Rata-rata		15.64

4.1.4 Pengujian Isolasi Kertas Kraft Tanpa Dilakukan Perendaman

Setelah mendapatkan hasil breakdown voltage kertas pressboard, pada tabel 4.3 dan tabel 4.4 pengujian dilanjutkan dengan menggunakan bahan pengujian adalah kertas isolasi kraft.

Tabel 4.7 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft 1mm

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	13.89
	2	13.99
	3	14.01
Rata-rata bdv sampel 1		13.96
Sampel Kertas 2	1	14.09
	2	13.72
	3	14.18
Rata-rata bdv sampel 2		14.00
Rata-rata		13.98

Tabel 4.8 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft 2mm

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	23.49
	2	23.30
	3	23.94
Rata-rata bdv sampel 1		23.58
Sampel Kertas 2	1	23.32
	2	23.97
	3	23.56
Rata-rata bdv sampel 2		23.62
Rata-rata		23.60

4.1.5 Analisis Perbandingan Setiap Jenis Isolasi Kertas Tanpa Dilakukan Perendaman

Setelah mengetahui sifat dan karakteristik dari isolasi kertas secara murni sebelum dilakukan perendaman kedalam minyak. Pada masing-masing jenis isolasi kertas diketahui bahwa kertas kraft memiliki kekuatan dielektrik paling tinggi yang kemudian disusul oleh kertas krep, kertas pressboard dan kertas press.

Untuk mengetahui perbandingan antar jenis isolasi kertas akan dibuat tabel dan grafik untuk mempermudah pembacaannya, sebagai berikut:

Tabel 4.9 Nilai *breakdown voltage* pengujian langsung tanpa direndam dengan tebal kertas 1mm

Sampel Isolasi Kertas	Jenis Isolasi Kertas	Nilai rata-rata Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	Press	7.34
	Krep	12.14
	Pressboard	11.11
	Kraft	13.96
Sampel Kertas 2	Press	7.45
	Krep	12.21
	Pressboard	11.00
	Kraft	14.00

Tabel 4.10 Nilai *breakdown voltage* pengujian langsung tanpa direndam dengan tebal kertas 2mm

Sampel Isolasi Kertas	Jenis Isolasi Kertas	Nilai rata-rata Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	Press	9.25
	Krep	17.12
	Pressboard	15.50
	Kraft	23.58
Sampel Kertas 2	Press	9.26
	Krep	17.11
	Pressboard	15.77
	Kraft	23.62

Dari tabel 4.9 dan 4.10 menunjukkan karakteristik murni daripada isolasi kertas mulai dari jenis kertas press, kertas krep, kertas pressboard, dan kertas kraft. Walaupun memiliki ketebalan yang sama namun nilai tegangan tembus pada setiap jenis kertas berbeda-beda. Dikarenakan susunan senyawa kimia dari setiap jenis kertas pun berbeda-beda juga. Dan dapat disimpulkan bahwa kekuatan dielektrik pada 4 jenis isolasi kertas tersebut yang memiliki kekuatan dielektrik tertinggi adalah kraft, yang kemudian krep, pressboard, dan yang terakhir adalah kertas press. Kesimpulan tersebut berlaku bagi kertas dengan ketebalan 1mm ataupun 2mm.

4.2 Pengujian Isolasi Kertas Dengan Dilakukan Perendaman Minyak Isolasi

Pada sampel pengujian isolasi kertas selanjutnya, *treatment* atau perlakuan ke kertas mengalami perubahan, karena setelah kertas dilakukan pemanasan yang berfungsi sebagai pengurang kandungan air dalamnya kertas akan direndam kedalam minyak dengan lama perendaman tertentu. Tujuan perendaman isolasi kertas adalah sebagai pengisi rongga-rongga pada isolasi kertas agar menutup lebih kompleks dan sempurna.

4.2.1 Pengujian Isolasi Kertas Jenis Press

Pada jenis kertas press dengan lebar 19.8 mm, memiliki nilai *breakdown voltage* dan tebal 1mm sebagai berikut:

Tabel 4.11 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 3 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	8.11
	2	8.81
	3	8.05
Rata-rata bdv sampel 1		8.32
Sampel Kertas 2	1	8.19
	2	8.12
	3	8.26
Rata-rata bdv sampel 2		8.19
Rata-rata		8.26

Tabel 4.12 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 6 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	8.20
	2	9.47
	3	9.13
Rata-rata bdv sampel 1		8.93
Sampel Kertas 2	1	8.63
	2	9.19
	3	8.92
Rata-rata bdv sampel 2		8.91
Rata-rata		8.92

Tabel 4.13 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 12 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	8.44
	2	9.20
	3	9.79
Rata-rata bdv sampel 1		9.14
Sampel Kertas 2	1	8.56
	2	9.00
	3	9.93
Rata-rata bdv sampel 2		9.16
Rata-rata		9.15

Tabel 4.14 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 24 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	10.73
	2	10.31
	3	10.82
Rata-rata bdv sampel 1		10.62
Sampel Kertas 2	1	10.42
	2	10.93
	3	10.61
Rata-rata bdv sampel 2		10.65
Rata-rata		10.64

Tabel 4.15 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 36 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	11.92
	2	11.32
	3	11.92
Rata-rata bdv sampel 1		11.72
Sampel Kertas 2	1	11.68
	2	12.07
	3	11.88
Rata-rata bdv sampel 2		11.88
Rata-rata		11.80

Tabel 4.16 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 48 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	12.73
	2	12.95
	3	12.24
Rata-rata bdv sampel 1		12.64
Sampel Kertas 2	1	12.82
	2	12.81
	3	12.29
Rata-rata bdv sampel 2		12.64
Rata-rata		12.64

Tabel 4.17 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 72 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	12.61
	2	12.52
	3	12.90
Rata-rata bdv sampel 1		12.68
Sampel Kertas 2	1	12.77
	2	12.34
	3	12.66
Rata-rata bdv sampel 2		12.59
Rata-rata		12.63

Untuk kertas press akan dilakukan pengujian kembali dengan ketebalan kertas 2mm, dengan *treatment* yang sama seperti kertas press 1mm. Tabel pengujian ketebalan kertas press 2mm, adalah sebagai berikut:

Tabel 4.18 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 3 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	9.94
	2	9.58
	3	9.97
Rata-rata bdv sampel 1		9.83
Sampel Kertas 2	1	9.96
	2	10.11
	3	9.58
Rata-rata bdv sampel 2		9.88
Rata-rata		9.86

Tabel 4.19 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 6 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	10.03
	2	9.81
	3	9.93
Rata-rata bdv sampel 1		9.92
Sampel Kertas 2	1	10.12
	2	9.76
	3	10.00
Rata-rata bdv sampel 2		9.96
Rata-rata		9.94

Tabel 4.20 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 12 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	10.21
	2	10.08
	3	10.17
Rata-rata bdv sampel 1		10.15
Sampel Kertas 2	1	10.15
	2	10.13
	3	10.16
Rata-rata bdv sampel 2		10.15
Rata-rata		10.15

Tabel 4.21 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 24 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	12.19
	2	12.28
	3	12.03
Rata-rata bdv sampel 1		12.17
Sampel Kertas 2	1	12.26
	2	12.07
	3	12.18
Rata-rata bdv sampel 2		12.17
Rata-rata		12.17

Tabel 4.22 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 36 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	13.28
	2	13.32
	3	13.59
Rata-rata bdv sampel 1		13.40
Sampel Kertas 2	1	13.11
	2	13.90
	3	13.21
Rata-rata bdv sampel 2		13.41
Rata-rata		13.40

Tabel 4.23 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 48 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	14.41
	2	14.37
	3	14.55
Rata-rata bdv sampel 1		14.44
Sampel Kertas 2	1	14.26
	2	14.22
	3	14.89
Rata-rata bdv sampel 2		14.46
Rata-rata		14.45

Tabel 4.24 Nilai *breakdown voltage* kertas press dengan lama perendaman 72 jam

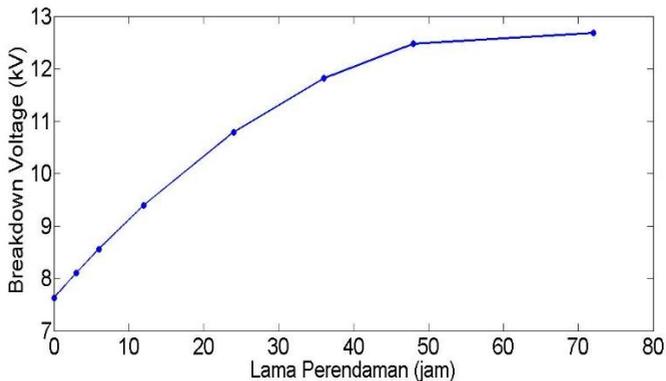
Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	14.47
	2	14.44
	3	14.63
Rata-rata bdv sampel 1		14.51
Sampel Kertas 2	1	14.48
	2	14.21
	3	14.72
Rata-rata bdv sampel 2		14.47
Rata-rata		14.49

Setelah dilakukan pengujian dengan lama perendaman yang berbeda-beda, kertas press akan dilakukan analisis dengan membentuk tabel dan grafik mengenai dampak dari lama perendaman terhadap kekuatan dielektrik dari isolasi kertas press. Untuk tabel dan grafik dari

karakteristik isolasi kertas press dengan ketebalan 1 mm, adalah sebagai berikut:

Tabel 4.25 Nilai *breakdown voltage* dengan lama perendaman yang berbeda-beda

Lama Perendaman	Nilai Breakdown Voltage (kV)
0 jam	7.40
3 jam	8.26
6 jam	8.92
12 jam	9.15
24 jam	10.64
36 jam	11.80
48 jam	12.64
72 jam	12.63

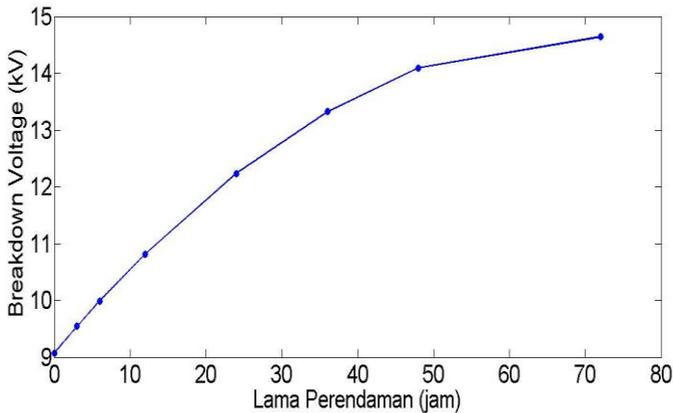


Gambar 4.1 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada kertas press dengan ketebalan 1 mm

Sedangkan nilai *breakdown voltage* pada pengujian isolasi kertas press dengan ketebalan 2mm adalah sebagai berikut:

Tabel 4.26 Nilai *breakdown voltage* dengan lama perendaman yang berbeda-beda

Lama Perendaman	Nilai Breakdown Voltage (kV)
0 jam	9.26
3 jam	9.86
6 jam	9.94
12 jam	10.15
24 jam	12.17
36 jam	13.40
48 jam	14.45
72 jam	14.49



Gambar 4.2 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada kertas press dengan ketebalan 2mm

Setelah melakukan pengujian pada isolasi kertas jenis press, didapat data seperti pada tabel diatas menunjukkan bahwa perendaman di dalam minyak dapat membuat kekuatan dielektrik daripada isolasi kertas bertambah. Perbedaan signifikan terjadi saat lama perendaman 12 jam dan 24 jam dilakukan jarak nilai *breakdown voltage* yang cukup jauh, yaitu 1 kV. Semakin lama isolasi kertas direndama didalam minyak semakin kuat pula kekuatan dielektrik dari kertas tersebut, namun pada lama

perendaman 48 jam dan 72 jam tidak mengalami perubahan yang signifikan hanya terpaut 0.01 kV pada 1mm dan 0.04 kV pada 2mm.

4.2.2 Pengujian Isolasi Kertas Jenis Krep

Seperti pada pengujian jenis isolasi kertas press, pada kertas krep juga memiliki variabel lama perendaman yang berbeda-beda. Pada setiap variabel lama perendaman dilakukan 12 kali pengujian, dengan 6 kali pengujian 1 mm dan 6 kali pengujian 2mm. Berikut adalah hasil pengujian dengan ketebalan kertas 1mm:

Tabel 4.27 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 3 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	14.20
	2	14.12
	3	14.58
Rata-rata bdv sampel 1		14.30
Sampel Kertas 2	1	14.34
	2	14.05
	3	14.62
Rata-rata bdv sampel 2		14.34
Rata-rata		14.32

Tabel 4.28 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 6 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	15.12
	2	14.59
	3	14.86
Rata-rata bdv sampel 1		14.86
Sampel Kertas 2	1	14.76
	2	14.84
	3	15.07
Rata-rata bdv sampel 2		14.89
Rata-rata		14.87

Tabel 4.29 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 12 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	16.67
	2	16.31
	3	16.83
Rata-rata bdv sampel 1		16.60
Sampel Kertas 2	1	16.71
	2	16.40
	3	16.78
Rata-rata bdv sampel 2		16.63
Rata-rata		16.62

Tabel 4.30 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 24 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	17.04
	2	17.13
	3	17.10
Rata-rata bdv sampel 1		17.09
Sampel Kertas 2	1	17.16
	2	17.00
	3	17.14
Rata-rata bdv sampel 2		17.10
Rata-rata		17.10

Tabel 4.31 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 36 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	17.33
	2	17.49
	3	17.36
Rata-rata bdv sampel 1		17.39
Sampel Kertas 2	1	17.57
	2	17.42
	3	17.32
Rata-rata bdv sampel 2		17.44
Rata-rata		17.42

Tabel 4.32 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 48 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	17.71
	2	17.50
	3	17.58
Rata-rata bdv sampel 1		17.60
Sampel Kertas 2	1	17.51
	2	17.74
	3	17.58
Rata-rata bdv sampel 2		17.61
Rata-rata		17.60

Tabel 4.33 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 72 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	17.68
	2	17.54
	3	17.62
Rata-rata bdv sampel 1		17.61
Sampel Kertas 2	1	17.56
	2	17.65
	3	17.70
Rata-rata bdv sampel 2		17.64
Rata-rata		17.63

Setelah menguji isolasi kertas krep dengan ketebalan 1mm, maka langkah selanjutnya adalah menguji isolasi kertas krep dengan ketebalan 2mm yang juga telah direndam kedalam isolasi minyak dengan lama

perendaman tertentu. Berikut adalah hasil nilai breakdown voltage kertas krep dengan ketebalan 2 mm:

Tabel 4.34 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 3 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	19.39	17.00
	18.81	17.23
	18.96	17.14
Rata-rata bdv sampel 1		19.05
Sampel Kertas 2	19.21	16.89
	18.93	17.35
	19.16	17.10
Rata-rata bdv sampel 2		19.10
Rata-rata		19.08

Tabel 4.35 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 6 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	20.64
	2	20.73
	3	20.60
Rata-rata bdv sampel 1		20.66
Sampel Kertas 2	1	20.82
	2	20.78
	3	20.55
Rata-rata bdv sampel 2		20.72
Rata-rata		20.69

Tabel 4.36 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 12 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	21.85
	2	21.42
	3	21.58
Rata-rata bdv sampel 1		21.62
Sampel Kertas 2	1	21.36
	2	21.83
	3	21.88
Rata-rata bdv sampel 2		21.69
Rata-rata		21.65

Tabel 4.37 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 24 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	22.76
	2	22.65
	3	22.75
Rata-rata bdv sampel 1		22.72
Sampel Kertas 2	1	22.87
	2	22.63
	3	22.76
Rata-rata bdv sampel 2		22.75
Rata-rata		22.74

Tabel 4.38 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 36 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	23.88
	2	23.97
	3	23.91
Rata-rata bdv sampel 1		23.92
Sampel Kertas 2	1	23.98
	2	23.81
	3	23.91
Rata-rata bdv sampel 2		23.90
Rata-rata		23.91

Tabel 4.39 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 48 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	24.16
	2	24.10
	3	24.10
Rata-rata bdv sampel 1		24.12
Sampel Kertas 2	1	24.11
	2	24.28
	3	24.03
Rata-rata bdv sampel 2		24.14
Rata-rata		24.13

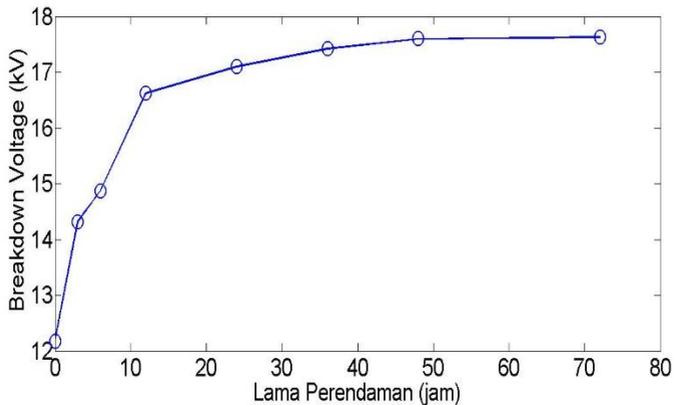
Tabel 4.40 Nilai *breakdown voltage* kertas krep dengan lama perendaman 72 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	24.12
	2	24.09
	3	24.14
Rata-rata bdv sampel 1		24.12
Sampel Kertas 2	1	24.16
	2	24.02
	3	24.15
Rata-rata bdv sampel 2		24.11
Rata-rata		24.11

Selanjutnya akan menganalisis mengenai efek dari lama perendaman dari isolasi kertas krep tersebut di dalam minyak dengan perbedaan rentang waktunya. Yang akan dimulai dengan menganalisis isolasi kertas dengan ketebalan 1mm, sebagai berikut:

Tabel 4.41 Nilai *breakdown voltage* dengan lama perendaman yang berbeda-beda (1mm)

Lama Perendaman	Nilai Breakdown Voltage (kV)
0 jam	12.18
3 jam	14.32
6 jam	14.87
12 jam	16.62
24 jam	17.10
36 jam	17.42
48 jam	17.60
72 jam	17.63

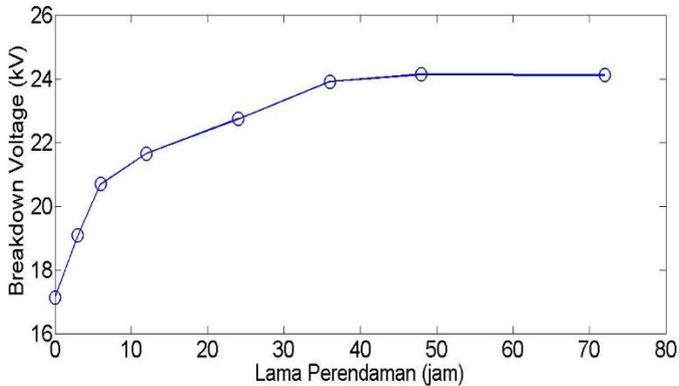


Gambar 4.3 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada kertas krep dengan ketebalan 1 mm

Tabel 4.42 Nilai *breakdown voltage* dengan lama perendaman yang berbeda-beda (2mm)

Lama Perendaman	Nilai Breakdown Voltage (kV)
0 jam	17.12
3 jam	19.08
6 jam	20.69
12 jam	21.65
24 jam	22.74
36 jam	23.91
48 jam	24.13
72 jam	24.11

Tabel diatas adalah perbandingan nilai tegangan tembus yang terjadi pada isolasi kertas krep dengan ketebalan 2mm.



Gambar 4.4 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada kertas krep dengan ketebalan 2mm

Pada pengujian yang dilakukan pada isolasi kertas krep, perendaman isolasi kertas di dalam minyak memiliki dampak yang besar hal tersebut terbukti dengan direndamnya kertas didalam minyak memiliki perbedaan nilai *breakdown voltage* yang cukup besar, yaitu: 2.14 pada isolasi kertas yang memiliki ketebalan 1mm dan 1.96 pada isolasi kertas yang memiliki ketebalan 2mm. Selain itu perendaman isolasi kertas di dalam minyak dengan rentang waktu 36 jam dan 48 jam tidak memiliki nilai *breakdown voltage* yang signifikan begitupun 48 jam dan 72 jam. Dapat dikatakan bahwa perendaman isolasi kertas krep dalam minyak agar memiliki nilai *breakdown voltage* yang tinggi harus direndam dengan rentang waktu minimal 36 jam.

4.2.3 Pengujian Isolasi Kertas Jenis Pressboard

Pengujian *breakdown voltage* selanjutnya akan dilakukan dengan objek isolasi kertas jenis pressboard. Pada kertas jenis ini memiliki rongga yang rapat dan tekstur yang keras. Hasil dari pengujian isolasi kertas pressboard dengan ketebalan 1mm, adalah sebagai berikut:

Tabel 4.43 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 3 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	11.91
	2	11.30
	3	11.87
Rata-rata bdv sampel 1		11.69
Sampel Kertas 2	1	12.16
	2	10.84
	3	11.82
Rata-rata bdv sampel 2		11.61
Rata-rata		11.65

Tabel 4.44 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 6 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	11.58
	2	11.68
	3	12.30
Rata-rata bdv sampel 1		11.85
Sampel Kertas 2	1	13.08
	2	11.26
	3	12.22
Rata-rata bdv sampel 2		12.19
Rata-rata		12.02

Tabel 4.45 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 12 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	12.08
	2	11.52
	3	13.16
Rata-rata bdv sampel 1		12.25
Sampel Kertas 2	1	13.62
	2	11.09
	3	12.76
Rata-rata bdv sampel 2		12.36
Rata-rata		12.30

Tabel 4.46 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 24 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	15.61
	2	16.48
	3	18.22
Rata-rata bdv sampel 1		16.77
Sampel Kertas 2	1	16.10
	2	16.50
	3	17.20
Rata-rata bdv sampel 2		16.60
Rata-rata		16.69

Tabel 4.47 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 36 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	17.26
	2	17.87
	3	18.13
Rata-rata bdv sampel 1		17.75
Sampel Kertas 2	1	17.16
	2	16.84
	3	18.33
Rata-rata bdv sampel 2		17.44
Rata-rata		17.60

Tabel 4.48 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 48 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	18.12
	2	18.31
	3	18.78
Rata-rata bdv sampel 1		18.40
Sampel Kertas 2	1	18.92
	2	17.58
	3	18.15
Rata-rata bdv sampel 2		18.22
Rata-rata		18.31

Tabel 4.49 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 72 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	18.02
	2	18.68
	3	18.83
Rata-rata bdv sampel 1		18.51
Sampel Kertas 2	1	18.96
	2	18.21
	3	18.43
Rata-rata bdv sampel 2		18.53
Rata-rata		18.52

Pada isolasi kertas jenis pressboard juga akan dilakukan pengujian dengan ketebalan kertas 2mm, dan berikut adalah hasil dari pengujian isolasi kertas pressboard dengan ketebalan 2mm:

Tabel 4.50 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 3 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	17.10
	2	16.98
	3	15.62
Rata-rata bdv sampel 1		16.57
Sampel Kertas 2	1	15.91
	2	18.02
	3	16.37
Rata-rata bdv sampel 2		16.77
Rata-rata		16.67

Tabel 4.51 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 6 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	17.50
	2	17.63
	3	15.89
Rata-rata bdv sampel 1		17.01
Sampel Kertas 2	1	16.03
	2	17.80
	3	18.44
Rata-rata bdv sampel 2		17.42
Rata-rata		17.22

Tabel 4.52 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 12 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	19.20
	2	17.32
	3	16.50
Rata-rata bdv sampel 1		17.67
Sampel Kertas 2	1	16.72
	2	18.16
	3	19.00
Rata-rata bdv sampel 2		17.96
Rata-rata		17.82

Tabel 4.53 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 24 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	20.58
	2	18.88
	3	20.45
Rata-rata bdv sampel 1		19.97
Sampel Kertas 2	1	20.01
	2	19.71
	3	20.23
Rata-rata bdv sampel 2		19.98
Rata-rata		19.98

Tabel 4.54 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 36 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	20.41
	2	19.42
	3	20.86
Rata-rata bdv sampel 1		20.23
Sampel Kertas 2	1	20.53
	2	20.29
	3	20.18
Rata-rata bdv sampel 2		20.33
Rata-rata		20.28

Tabel 4.55 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 48 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	21.14
	2	19.37
	3	21.89
Rata-rata bdv sampel 1		20.80
Sampel Kertas 2	1	20.55
	2	21.00
	3	20.22
Rata-rata bdv sampel 2		20.59
Rata-rata		20.70

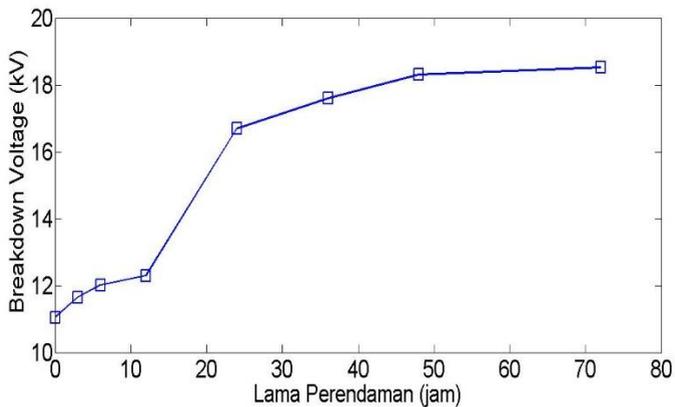
Tabel 4.56 Nilai *breakdown voltage* kertas pressboard dengan lama perendaman 72 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	21.39
	2	19.53
	3	22.00
Rata-rata bdv sampel 1		20.97
Sampel Kertas 2	1	20.86
	2	21.15
	3	20.09
Rata-rata bdv sampel 2		20.70
Rata-rata		20.84

Setelah melakukan pengujian pada isolasi kertas pressboard akan dibuat analisis mengenai dampak dari lama perendaman isolasi kertas pressboard di dalam minyak yang akan dibuat dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan menganalisisnya.

Tabel 4.57 Nilai *breakdown voltage* dengan lama perendaman yang berbeda-beda (1mm)

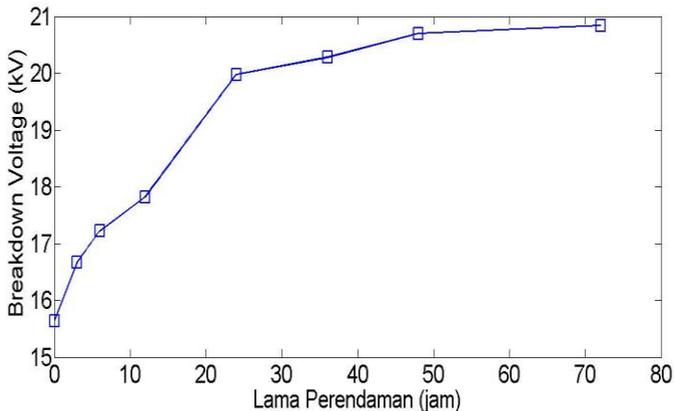
Lama Perendaman	Nilai Breakdown Voltage (kV)
0 jam	11.05
3 jam	11.65
6 jam	12.02
12 jam	12.30
24 jam	16.69
36 jam	17.60
48 jam	18.31
72 jam	18.52



Gambar 4.5 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada kertas pressboard dengan ketebalan 1mm

Tabel 4.58 Nilai *breakdown voltage* dengan lama perendaman yang berbeda-beda (2mm)

Lama Perendaman	Nilai Breakdown Voltage (kV)
0 jam	13.34
3 jam	14.16
6 jam	14.62
12 jam	15.06
24 jam	18.33
36 jam	18.94
48 jam	19.50
72 jam	19.68



Gambar 4.6 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada kertas pressboard dengan ketebalan 2mm

Setelah dilakukan pengujian pada isolasi kertas jenis pressboard, didapatkan hasil bahwa dampak yang signifikan pada perendaman kertas di dalam minyak dapat mempengaruhi nilai *breakdown voltage* kertas dengan rentang waktu 12 jam dan 24 jam. Pada isolasi kertas pressboard dengan ketebalan 1mm memiliki selisih nilai *breakdown voltage* sebesar 4.39 kV dan pada kertas pressboard dengan ketebalan 2mm memiliki selisih nilai *breakdown voltage* sebesar 3.27 kV. Pada pengujian isolasi

kertas jenis pressboard dapat diamati bahwa semakin lama isolasi kertas direndam maka semakin bertambah kekuatan dielektrik yang dimiliki, seperti pada isolasi kertas jenis press perendaman dengan rentang waktu 48 dan 72 jam nilai breakdown voltage sudah hampir memiliki nilai konstan dengan jarak yang tidak begitu jauh hanya 0.21 kV pada kertas berketebalan 1mm dan 0.18 kV pada kertas yang berketebalan 2mm.

4.2.4 Pengujian Isolasi Kertas Jenis Kraft

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan objek jenis isolasi kertas terakhir yaitu isolasi kertas jenis kraft, jenis kertas isolasi tersebut merupakan isolasi kertas yang paling sering digunakan. Kertas kraft digunakan sebagai pembatas antar layer pada coil transformator. Berikut adalah hasil nilai *breakdown voltage* pada isolasi kertas kraft dengan ketebalan 1mm:

Tabel 4.59 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 3 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	24.62
	2	24.87
	3	25.22
Rata-rata bdv sampel 1		24.90
Sampel Kertas 2	1	24.71
	2	25.13
	3	25.03
Rata-rata bdv sampel 2		24.96
Rata-rata		24.93

Tabel 4.60 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 6 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	27.95
	2	27.41
	3	27.16
Rata-rata bdv sampel 1		27.51
Sampel Kertas 2	1	27.91
	2	27.73
	3	27.38
Rata-rata bdv sampel 2		27.67
Rata-rata		27.59

Tabel 4.61 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 12 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	28.31
	2	28.20
	3	28.58
Rata-rata bdv sampel 1		28.36
Sampel Kertas 2	1	28.43
	2	28.29
	3	28.55
Rata-rata bdv sampel 2		28.42
Rata-rata		28.39

Tabel 4.62 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 24 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	28.59
	2	28.69
	3	28.81
Rata-rata bdv sampel 1		28.70
Sampel Kertas 2	1	28.66
	2	28.78
	3	28.80
Rata-rata bdv sampel 2		28.75
Rata-rata		28.72

Tabel 4.63 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 36 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	28.56
	2	29.11
	3	29.21
Rata-rata bdv sampel 1		28.96
Sampel Kertas 2	1	28.94
	2	28.94
	3	29.03
Rata-rata bdv sampel 2		28.97
Rata-rata		28.97

Tabel 4.64 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 48 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	28.98
	2	29.25
	3	29.38
Rata-rata bdv sampel 1		29.20
Sampel Kertas 2	1	29.08
	2	29.13
	3	29.11
Rata-rata bdv sampel 2		29.11
Rata-rata		29.16

Tabel 4.65 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 72 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	29.00
	2	29.18
	3	29.21
Rata-rata bdv sampel 1		29.13
Sampel Kertas 2	1	29.02
	2	29.12
	3	29.16
Rata-rata bdv sampel 2		29.10
Rata-rata		29.12

Pada pengujian isolasi kertas jenis kraft juga akan dilakukan juga pengujian dengan ketebalan 2mm, dengan hasil nilai *breakdown voltage* sebagai berikut:

Tabel 4.66 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 3 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	28.32
	2	29.21
	3	28.83
Rata-rata bdv sampel 1		28.79
Sampel Kertas 2	1	28.19
	2	28.83
	3	29.17
Rata-rata bdv sampel 2		28.73
Rata-rata		28.76

Tabel 4.67 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 6 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	32.66
	2	32.73
	3	32.72
Rata-rata bdv sampel 1		32.70
Sampel Kertas 2	1	32.84
	2	32.68
	3	32.80
Rata-rata bdv sampel 2		32.77
Rata-rata		32.74

Tabel 4.68 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 12 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	34.83
	2	35.07
	3	34.96
Rata-rata bdv sampel 1		34.95
Sampel Kertas 2	1	34.83
	2	35.11
	3	34.72
Rata-rata bdv sampel 2		34.89
Rata-rata		34.92

Tabel 4.69 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 24 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	35.70
	2	35.19
	3	34.98
Rata-rata bdv sampel 1		35.29
Sampel Kertas 2	1	35.18
	2	35.06
	3	35.46
Rata-rata bdv sampel 2		35.23
Rata-rata		35.26

Tabel 4.70 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 36 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	35.84
	2	35.96
	3	35.52
Rata-rata bdv sampel 1		35.77
Sampel Kertas 2	1	35.82
	2	35.89
	3	35.85
Rata-rata bdv sampel 2		35.85
Rata-rata		35.81

Tabel 4.71 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 48 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	35.91
	2	35.88
	3	35.91
Rata-rata bdv sampel 1		35.90
Sampel Kertas 2	1	35.67
	2	35.97
	3	36.06
Rata-rata bdv sampel 2		35.90
Rata-rata		35.90

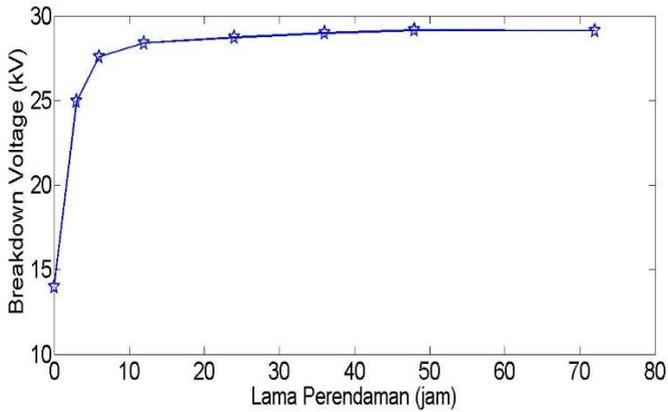
Tabel 4.72 Nilai *breakdown voltage* kertas kraft dengan lama perendaman 72 jam

Sampel Isolasi Kertas	No. Pengujian	Nilai Breakdown Voltage (kV)
Sampel Kertas 1	1	35.88
	2	35.90
	3	36.01
Rata-rata bdv sampel 1		35.93
Sampel Kertas 2	1	35.72
	2	36.12
	3	36.02
Rata-rata bdv sampel 2		35.95
Rata-rata		35.94

Setelah melakukan pengujian pada semua sampel pada isolasi kertas jenis kraft dengan ketebalan kertas 1mm dan 2mm akan dilanjutkan dengan membuat tabel perbandingan pada setiap lama perendaman dan ketebalan kertas kraft, berikut adalah perbandingan isolasi kertas kraft pada 1mm dan 2mm:

Tabel 4.73 Nilai *breakdown voltage* dengan lama perendaman yang berbeda-beda (1mm)

Lama Perendaman	Nilai Breakdown Voltage (kV)
0 jam	13.98
3 jam	24.93
6 jam	27.59
12 jam	28.39
24 jam	28.72
36 jam	28.97
48 jam	29.16
72 jam	29.12

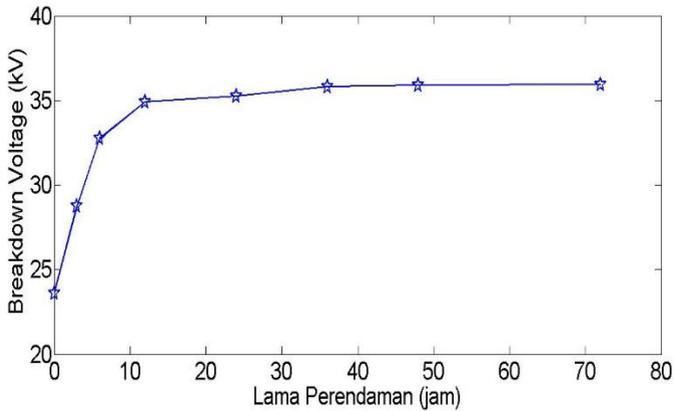


Gambar 4.7 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada kertas kraft dengan ketebalan 1mm

Berikut adalah tabel dan grafik nilai *breakdown voltage* pada isolasi kertas kraft dengan ketebalan 2mm:

Tabel 4.74 Nilai *breakdown voltage* dengan lama perendaman yang berbeda-beda (2mm)

Lama Perendaman	Nilai Breakdown Voltage (kV)
0 jam	23.60
3 jam	28.76
6 jam	32.74
12 jam	34.92
24 jam	35.26
36 jam	35.81
48 jam	35.90
72 jam	35.94



Gambar 4.8 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada kertas kraft dengan ketebalan 2mm

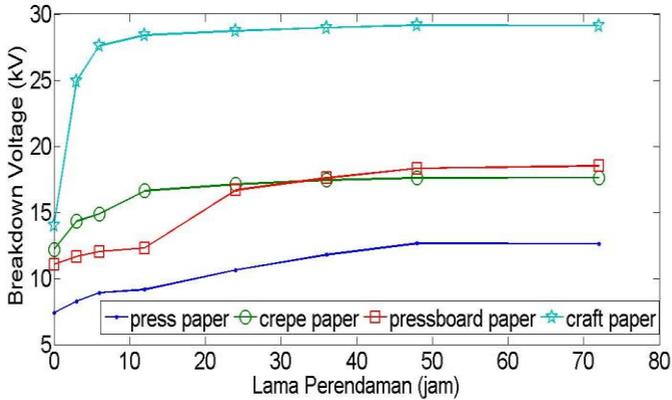
Setelah mengetahui data dari pengujian isolasi kertas jenis kraft, menunjukkan bahwa perendaman isolasi kertas jenis kraft di dalam minyak memiliki dampak yang signifikan terhadap nilai *breakdown voltage* pada karakteristik kertas kraft murni dengan ketebalan 1mm memiliki nilai *breakdown voltage* 13.98 kV dan dalam pengujian kertas yang direndam dengan perendaman minyak selama 3 jam memiliki nilai sebesar 24.93 kV, dan pada ketebalan kertas 2mm karakteristik murni kertas kraft memiliki nilai *breakdown voltage* sebesar 23.60 kV dan setelah kertas kraft tersebut di rendam di dalam minyak selama 3 jam nilai *breakdown voltage* pada kertas kraft menjadi bernilai 28.76 kV. Hal ini membuktikan adhesi yang terjadi pada kraft memiliki waktu yang lebih cepat dibanding dengan jenis isolasi kertas lainnya.

Pada perendaman kertas kraft dalam minyak selama 12 jam dan setelahnya memiliki nilai *breakdown voltage* yang cenderung tetap hanya berbeda kurang dari 1 kV.

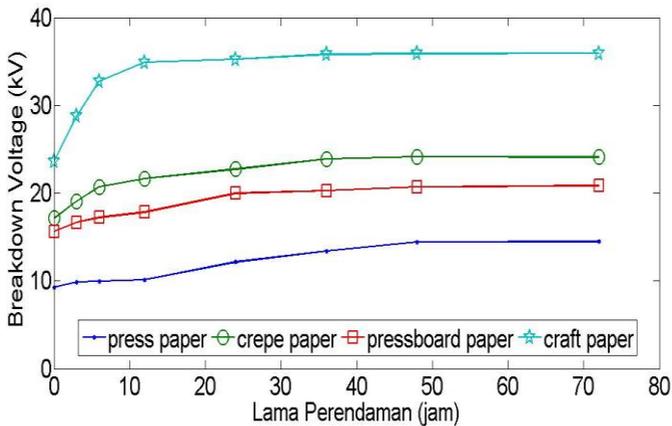
4.2.5 Analisis Semua Jenis Isolasi Kertas

Setelah dilakukan pengujian secara keseluruhan maka didapat bahwa setiap jenis kertas memiliki tingkat adhesi atau penyerapan minyak ke dalam kertas berbeda-beda. Mulai dari kraft yang hanya butuh 12 jam untuk memiliki kekuatan dielektrik yang mulai konstan, dan pada isolasi kertas pressboard dan krep membutuhkan perendaman di dalam minyak

dengan rentang waktu 36 jam untuk membuat kekuatan dielektriknya stabil. Pada isolasi kertas jenis press membutuhkan waktu yang lebih lama yaitu 48 jam perendaman dalam minyak agar kekuatan dielektrik pada permukaan kertas menjadi stabil, pernyataan tersebut dapat dilihat sesuai dengan gambar berikut:



Gambar 4.9 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada semua jenis kertas dengan ketebalan 1mm



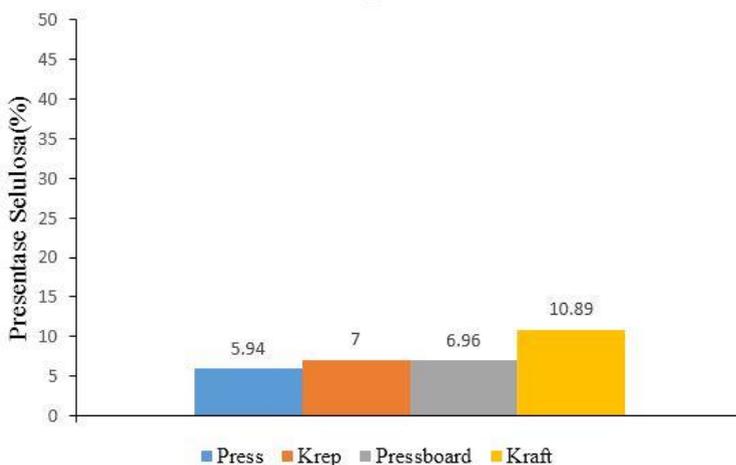
Gambar 4.10 Grafik rata-rata nilai *breakdown voltage* pada semua jenis kertas dengan ketebalan 2mm

4.3 Analisis Pengujian Kadar Selulosa pada Isolasi Kertas

Pengujian kadar selulosa pada setiap sampel jenis isolasi kertas menggunakan metode chesson. Pada tabel pertama akan akan ditunjukkan kadar selulosa pada isolasi kertas murni tanpa dilakukan perendaman didalam minyak, hanya dilakukan proses pemanasan kertas agar kadar air dalam kertas dapat diminimalisir. Pada tabel 4.75 menunjukkan berat dalam setiap langkah metode pengujian dan hasil dari pengujian berupa kadar selulosa dalam setiap 1 gram serbuk isolasi kertas. Pada gambar 4.11 merupakan grafik batang yang bertujuan mempermudah pembacaan kadar selulosa pada setiap jenis isolasi kertas.

Tabel 4.75 Nilai kadar selulosa yang terkandung dalam isolasi kertas tanpa dilakukan perendaman didalam minyak

Sampel Kertas	Berat (semua dalam satuan gram)				Berat % selulosa
	a	b	c	d	
Press	1.01	0.92	0.87	0.81	5.94
Krep	1.00	0.95	0.90	0.83	7.00
Pressboard	1.01	0.90	0.80	0.73	6.96
Kraft	1.01	0.94	0.88	0.77	10.89

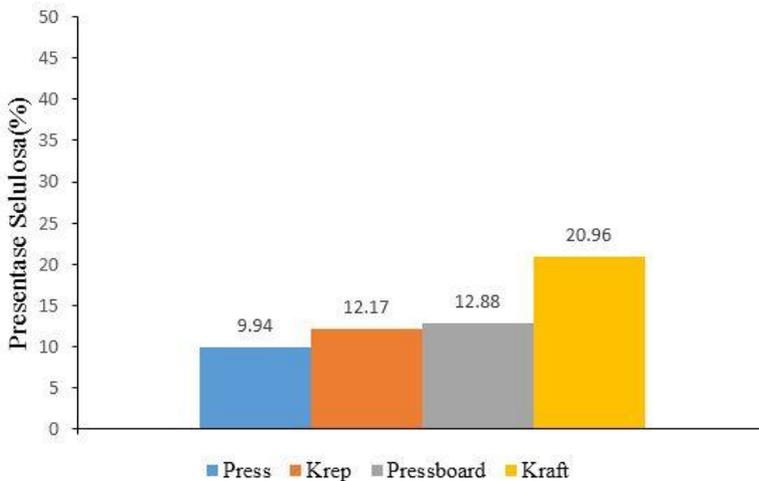


Gambar 4.11 Grafik persentase kadar selulosa dalam tiap 1 gram isolasi kertas tanpa dilakukan perendaman didalam minyak

Selanjutnya pengujian tetap menggunakan metode yang sama, hanya obyek uji merupakan isolasi kertas yang direndam di dalam minyak dengan lama perendamannya 24 jam. Pada tabel 4.76 menunjukkan berat serbuk kertas dalam setiap langkah metode pengujian dan menunjukkan hasil dari pengujian berupa kadar selulosa dalam setiap 1 gram serbuk isolasi kertas. Gambar 4.12 merupakan grafik batang yang bertujuan mempermudah pembacaan kadar selulosa pada setiap jenis isolasi kertas.

Tabel 4.76 Nilai kadar selulosa yang terkandung dalam isolasi kertas dengan dilakukan perendaman didalam minyak

Sampel Kertas	Berat (semua dalam satuan gram)				Berat % selulosa
	a	b	c	d	
Press	1.02	0.93	0.82	0.72	9.94
Krep	1.01	0.90	0.76	0.64	12.17
Pressboard	1.01	0.81	0.72	0.59	12.88
Kraft	1.01	0.89	0.88	0.70	20.96



Gambar 4.12 Grafik persentase kadar selulosa dalam tiap 1 gram isolasi kertas tanpa dilakukan perendaman didalam minyak

Dengan data pada tabel 4.75 dan tabel 4.76 dapat dianalisis bahwa dengan direndamnya kertas didalam minyak akan membuat kadar selulosa akan meningkat. Secara keseluruhan, semakin tinggi nilai kadar selulosa juga akan membuat nilai *breakdown voltage* juga akan meningkat juga, namun pada kertas press yang direndam dalam minyak memiliki kadar selulosa lebih tinggi daripada krep dan pressboard kering, mulai dari kesalahan penguji seperti jatuhnya serbuk isolasi kertas pada bahan pengujian setelah ditimbang ataupun karena metode chesson yang digunakan pada pengujian kadar selulosa merupakan metode yang memiliki kekurangan yaitu tidak meratanya zat-zat yang tereduksi yang tidak dicari dalam pengujian.

4.4 Analisis Kegagalan Dielektrik pada Pengujian

Dalam sebuah kejadian kegagalan dielektrik tentu memiliki penyebab yang membuat terjadinya hal tersebut. Hal ini tentu harus dilakukan analisis agar mampu mengetahui titik kelemahan dari suatu isolasi dan mampu untuk menghindarinya. Berikut ini adalah penyebab dari kegagalan isolasi kertas dari pengujian:

Kegagalan elektromekanik, kegagalan ini terjadi disebabkan oleh adanya perbedaan polaritas antara elektroda yang mengapit isolasi kertas tersebut, selain itu tekanan yang diberikan kepada isolasi kertas melampaui kemampuan dari ketahanan permukaan isolasi kertas tersebut sehingga isolasi kertas mengalami kegagalan.

Kegagalan intrinsik, merupakan kegagalan yang terjadi karena setiap jenis isolasi kertas memiliki karakteristik yang berbeda-beda pada permukaan lapisan kertas. Selain itu ketebalan kertas juga akan berpengaruh terhadap nilai *breakdown voltage*, bahwa semakin tebal kertas maka semakin tinggi juga nilai *breakdown voltage*.

Kegagalan erosi, kegagalan ini merupakan kegagalan yang terjadi karena isolasi kertas sendiri tanpa adanya pengaruh dari luar. Seperti pada hasil data pengujian tersebut menunjukkan walaupun dengan jenis kertas yang sama ketebalan dan perlakuan yang sama memiliki nilai *breakdown voltage* yang berbeda. Hal tersebut disebabkan karena pada isolasi kertas tersebut memiliki kualitas yang tidak semuanya sama persis, seperti jumlah rongga dan lebar rongga pada permukaan isolasi kertas tersebut.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis pada Tugas Akhir ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai *breakdown voltage* pada isolasi kertas murni (tanpa direndam) memiliki nilai yang berbeda dengan datasheet kertas, karena pada datasheet kertas menggunakan standart pengujian yang berbeda.
2. Nilai *breakdown voltage* mengalami kenaikan dengan ditambahkan ketebalan kertas dari 1mm menjadi 2mm, dengan penambahan yang tidak sampai dua kali lipat.
3. Nilai *breakdown voltage* isolasi kertas mengalami kenaikan dengan direndam kedalam minyak, semakin lama direndam didalam minyak maka nilai *breakdown voltage* akan mengalami peningkatan juga. Namun dengan lama perendaman tertentu tergantung pada setiap jenis kertas memiliki nilai *breakdown voltage* yang bernilai hampir sama.
4. Pada jenis isolasi kertas kraft harus dilakukan perendaman dalam minyak selama 12 jam agar memiliki nilai *breakdown voltage* yang stabil, sedangkan pada jenis isolasi kertas pressboard dan krep membutuhkan waktu lama perendaman 36, serta pada jenis isolasi kertas press membutuhkan waktu yang paling lama yaitu dibutuhkan lama perendaman 48 jam agar memiliki nilai *breakdown voltage* yang stabil. Hal tersebut dapat terjadi karena pada setiap jenis isolasi kertas memiliki kemampuan proses adhesi yang berbeda beda, proses adhesi adalah proses dimana antar senyawa kimia saling megikat untuk menjadi komposit yang lebih sempurna.
5. Dapat dianalisis bahwa dengan direndamnya isolasi kertas didalam minyak akan membuat kadar selulosa akan meningkat. Semakin tinggi nilai kadar selulosa juga akan membuat nilai *breakdown voltage* juga akan meningkat juga, hal tersebut dikarenakan dalam perendaman minyak akan membuat permukaan kertas yang tersusun selulosa tersebut memperbaiki struktur penyusunnya dan membuat rantai senyawa yang lebih kompleks dan panjang.

5.2 Saran

Dalam pengujian tersebut suhu yang dipakai adalah suhu ruangan dan rendaman kertas tersebut berada di laboratorium tegangan tinggi sehingga suhu tidak selalu sama dalam perendamannya oleh karena adanya pendingin udara yang digunakan suatu saat dalam keadaan nyala ataupun mati. Selain itu pada saat dilakukan pengujian udara tidak dalam keadaan hampa udara seperti pada saat isolasi kertas dalam keadaan *real* yaitu dalam keadaan hampa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Muchlis and A. D. Permana, “Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN 2003 s.d. 2020,” *Pengemb. Sist. Kelistrikan dan Menunjang Pembang. Nas. Jangka Panjang*, p. 11 Halaman, 2003.
- [2] Chapman, Stephen J., 2005. “Electric Machinery Fundamentals”. New York: McGraw-Hill.
- [3] A. Chumaidy, “Analisis kegagalan minyak isolasi pada transformator daya berbasis kandungan gas terlarut,” *Artikel_jurnal_FT*, vol. 8, no. 2, pp. 41–54, 2012.
- [4] T. A. Prevost and T. V. Oommen, “Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I - History and development,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 22, no. 1, pp. 28–34, 2006.
- [5] R. Radhitya, “Pengaruh Rendaman Minyak Transformator Terhadap Kekuatan Dielektrik Isolasi Kertas,” *Tek. Elektro Univ. Gadjah Mada, Yogyakarta*, 2014.
- [6] W. H. P. E. W. H. P. . (The H. S. B. I. and I. C. Bartley, “Analysis of Transformer Failures,” in *International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference*.
- [7] L. Nasrat, N. Kassem, and N. Shukry, “Aging Effect on Characteristics of Oil Impregnated Insulation Paper for Power Transformers,” *Sci. Res.*, vol. 2013, no. January, pp. 1–7, 2013.
- [8] P. Saha, Tapan Kumar. Prithwiraj, *Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques*. 2017.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

LAMPIRAN

A. DATASHEET KERTAS PRESS

INPR.600.050



KREMPPEL

Test report-EN 10 204-2.2

Customer PT.Bambang Djaja

Specification ---

Terms of delivery ---

Commercial product name presspaper 0.50*20*ROLL/INPR.008.050

Name and address of manufacturer KrempeL Insulations Xiamen Co., Ltd.

Order No. PO-15000462#1 KrempeL order No. 15-07-21-0004

Quantity supplied 1802.53kg Date supplied Jun 30,2015

Remarks --

Roll No. 15-21-0061/64/65/64/70-002;15-21-0055-005;15-21-0069-003

Property	Unit	Test procedure	Required values	Test result*
thickness	mm	IEC 60641-2	0.45-0.55	0.492
area weight	g/m ²	IEC 60641-2	570-630	591.9
tensile strength on MD	N/mm ²	IEC 60641-2	≥70	88.6
tensile strength on TD	N/mm ²	IEC 60641-2	≥50	64.9
Dielectric strength	kV/mm	IEC 60641-2	≥10.5	11.1
Width	mm		20.00±0.20	20.02

*Test result from current factory run.

We certify hereby, that the material complies with the terms of the order contract.

KrempeL Group Xiamen Plant

Quality Dept. Signature

Cherry



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

B. DATASHEET KERTAS KREP (CREPE)

TEST CERTIFICATE



Date
2015-09-01

Your order no
1538400689

Order no
518995201

Customer : FAXOLIF INDUSTRIES PTE LTD

Quality : CREPED KRAFT PAPER

Climatic conditions
23°C 50% RH

Testmethod
IEC 60554-2

<u>Properties</u>	<u>Units</u>	<u>Testvalues</u>
Grammage	g/m ²	86.2
Single sheet thickness	µm	252
Water content	%	<5.0
Tensile strength MD	kN/m	3.89
Elongation MD	%	43.6
Dielectric strength a.c. in oil	kV/mm	31

MUNKSJÖ PAPER AB
Lab. Quality control


Ola Jepsjö

MUNKSJÖ PAPER AB
Mailing address
Box 624
SE-551 18 Jönköping
Sweden

Visiting address
Barnarpgatan 39-41
Jönköping
www.munksjo.com

Phone +46(0)36 303 300
Fax +46(0)36 303 380
Email paperinfo@munksjo.com

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

C. DATASHEET KERTAS PRESSBOARD

1708146

KREMPEL | GROUP

Test report - EN 10 204 - 2.2

Purchaser P.T.Bambang Djaja Mrs. Catharina Boedihardjo
Surabaya 60193 Indonesien

Specification IEC 60641-3-1 (B.2.1.B)

Terms of delivery _____

Commercial product name Pressboard Psp 3050 2,00 mm

Name and address of manufacturer Krepel GmbH & Co. Pressspanwerk KG Zwönitz

Order No. PO-17001809#1 (1703324) Pos. 2 **Delivery note** 1708146

Quantity supplied 10.011,000 kg 2,00 x 1050 x 2050 mm **Date supplied** Week 20/2017

Roll No. / Part No. _____ **Batch No.** 17/0134/
17/0164/

Remarks _____

Remarks _____

Properties	Unit	Test procedure	Required values	Test results from current factory run
Thickness	mm	IEC 60641-2	2,00+/-0,10	1,95
Density	kg/dm ³	IEC 60641-2	1,20 - 1,30	1,26
Tensile strength MD	MPa	IEC 60641-2	≥ 90	116
Tensile strength TD	MPa	IEC 60641-2	≥ 60	95
Elongation MD	%	IEC 60641-2	≥ 6,0	8,5
Elongation TD	%	IEC 60641-2	≥ 8,0	11,0
Dielectric strength	kV/mm	IEC 60641-2	≥ 12,0	14,3
Water content	%	IEC 60641-2	≤ 8,0	5,8
Ash content	%	IEC 60641-2	≤ 0,7	0,2
ShrinkageMD	%	IEC 60641-2	≤ 0,70	0,48
ShrinkageTD	%	IEC 60641-2	≤ 1,00	0,65

We certify hereby, that the material described above complies with the terms of the order contract.

Quality management
Krepel GmbH & Co. Pressspanwerk KG

KREMPEL GmbH & Co.
Pressspanwerk KG
Annaberger Straße 67
08297 Zwönitz

Signature

Zwönitz, date 16.05.2017

A. A. Pcto

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

D. DATASHEET KERTAS KRAFT

101P. 0200 005
10.10.2013





kompeten - flexibel - weltweit

Test Certificate / Prüfattest

PUCARO ELEKTRO-ISOLIERSTOFFE GmbH		Dicke/Normal Thickness:	
Customer Number: K16283	IEC 554-3-1	0,05 mm both sides coated DDI	
Foxell Industries Pte Ltd. 75 Toeh Park Crescent Singapore 139070 Singapore	Datum/Date: 04.09.2013 Korm. Nr./Comm. No.: 40732310		
	Test Nr./Test No.: 327711 Order Nr./Order No.: 1332100170		

DESCRIPTION	UNIT	IEC 554-3-1	M Dichtu 1,00
Thickness	mm	± 10 %	0,05
Density apparent	g/cm ³	> 0,95	0,99
Tensile strength M.D.	N/mm ²	78	108
Tensile strength C.M.D.	N/mm ²	28	53
Elongation M.D.	%	2	2,2
Elongation C.M.D.	%	4	6,7
Ash content	%	max. 1,0	0,4
Conductivity of aqueous extract	mS/m	max. 10,0	1,4
pH of aqueous extract		6,0 - 8,0	6,4
Electrical strength unfolded	kV/mm	min. 8	12
Thickness of coating	µ	> 10	13-14

Conductivity particle testing passed

This test is created electronically and does not require any signature.

Postanschrift:
 D-74255 Reigheim
 Telefon: +49 6298 27 0
 Telefax: +49 6298 27 04
 E-Mail: service@pucaro.de
 Internet: <http://www.pucaro.de>

Fabrikant:
 Postfach 1
 D-74255 Reigheim

Sitz-/so Geschäftskunde: Reigheim
 Regio/germany Stuttgart
 Handelsregister HRB 737225
 Geschäftsführer: James Avenius
 USt-Id-Nr.: DE 275499148

Bankverbindung:
 Commerzbank AG
 BIC: COBA33HAN33
 SWIFT-Code: COBA33HAN33
 IBAN: DE44 2512 0510 0001 1436 000

Deutsche Hypo-Vereinsbank AG München
 BIC: HYPO2333
 SWIFT-Code: HYPO2333
 IBAN: DE44 2512 0510 0001 1436 000

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BIOGRAFI PENULIS



Nama lengkap penulis adalah Raka Anthony Elfreda, biasa dipanggil raka. Penulis lahir di Kediri pada tanggal 24 Januari 1995. Penulis memiliki riwayat pendidikan, sebagai berikut: pada tahun 2001 sampai 2007 bersekolah di SD Negeri Padangan 1. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Pare pada tahun 2007 hingga 2010. Penulis kemudian menempuh pendidikan di SMA Negeri 2 Pare tahun 2010 sampai 2013. Penulis memutuskan untuk melanjutkan pendidikan di program studi D3 Teknik Elektro Elektro Industri ITS – DISNAKERTRANSDUK, jurusan D3 Teknik Elektro ITS. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan Strata-1 pada program Lintas Jalur Teknik Elektro ITS program studi Teknik Sistem Tenaga. Kritik dan saran serta pertanyaan mengenai tugas akhir tersebut dapat langsung menghubungi penulis melalui email penulis, relfreda@gmail.com.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----