



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الطاقة الكهربائية

أثر التشيع في تحسين خصائص الزيوت العازلة

أطروحة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الطاقة الكهربائية

إعداد

م. مثني الجاسم

المشرف المشارك

د. أحمد الفلاح

الأستاذ في قسم الكيمياء

كلية العلوم

جامعة دمشق

المشرف

د. علي السيد

الأستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق

2026 - 2025

فهرس المحتويات

الصفحة	العنوان
1	الفصل الأول: الإطار العام للبحث
1	1-1 - مقدمة
1	1-2 - إشكاليات البحث
2	1-3 - تساؤلات البحث
2	1-4 - فرضيات البحث
2	1-5 - مسلمات البحث
3	1-6 - الهدف من البحث
3	1-7 - أهمية البحث
3	1-8 - مبررات البحث
4	1-9 - حدود البحث
4	1-10 - الدراسة المرجعية
8	1-11 - مناهج البحث وأدواته
9	1-12 - مكونات البحث
12	الفصل الثاني: المواد العازلة المستخدمة في تجهيزات التوتر العالي
12	2-1 - مقدمة
13	2-2 - خصائص المواد العازلة المستخدمة في تجهيزات التوتر العالي
13	2-2-1 - مقاومة المواد العازلة
16	2-2-2 - التغيرات في خصائص المواد العازلة تحت تأثير درجة الحرارة
17	2-2-3 - التدرج المحتمل للعوازل
18	2-2-4 - متانة العزل

21	5-2-2- الأقفاس الكهربائية
21	6-2-2- التقادم الحراري
22	3-2- العوازل الصلبة
24	4-2- العوازل السائلة
24	1-4-2- عموميات
26	2-4-2- الزيوت العازلة المعدنية
28	3-4-2- الزيوت العازلة السيليكونية
29	4-4-2- زيوت الكلوفين أو الاسكاريل
30	5-2- العوازل الغازية
30	1-5-2- خصائص العوازل الغازية
31	2-5-2- انهيار الغازات
34	الفصل الثالث: الاختبارات المعيارية المعتمدة للزيوت العازلة المعدنية
34	1-3- مقدمة
34	2-3- اختبارات الزيت ودالاتها
35	3-3- الاختبارات الفيزيائية
35	1-3-3- نقطة الأنيلين
35	2-3-3- اللون
34	3-3-3- نقاط الوميض واحتراق الزيت
35	4-3-3- الإجهاد السطحي أو البيني
36	5-3-3- نقطة الانسكاب
36	6-3-3- الكثافة النسبية (الوزن النوعي)
36	7-3-3- اللزوجة
36	8-3-3- الفحص البصري

37	3-4- الاختبارات الكهربائية
37	3-4-1- توتر انهيار العازلية
38	3-4-2- توتر الانهيار النبضي
38	3-4-3- عامل الفقد (عامل القدرة)
38	3-4-4- انحلال الغاز في زيوت العزل المعرضة لجهودات كهربائية وعمليات التأين
39	3-5- الاختبارات الكيميائية
39	3-5-1- محتوى الغاز
39	3-5-2- المركبات ثنائية الفلور متعددة الكلور
40	3-5-3- الكبريت المسبب للتآكل
40	3-5-4- رقم التكافؤ أو الحموضة
41	3-5-5- الماء والمركبات العضوية الحلقية في الزيوت العازلة
42	الفصل الرابع: التقنيات الحديثة لتقييم حالة الزيوت العازلة المعدنية
42	4-1- مقدمة
43	4-2- تقنية تحليل الغازات الذائبة
45	4-3- كروماتوغرافيا الغاز/قياس الطيف الكتلي (GC-MS)
45	4-4- تقنية التحليل بمطيافية الأشعة تحت الحمراء
47	4-5- تقنية مطيافية الأشعة فوق البنفسجية/المرئية
48	4-6- تقنية تحديد الرطوبة
49	الفصل الخامس: عمليات التشعيع
49	5-1- مقدمة
49	5-2- تعريف الاشعاع
50	5-3- اشعاع الفا
50	5-4 اشعاع بيتا

51	1-4-5 اشعاع غاما
55	الفصل السادس: التجهيزات المستخدمة في الدراسة العملية
55	1-6 مقدمة
55	2-6 مكان إجراء الدراسة والوصف التفصيلي للمواد والتجهيزات
55	3-6 المواد المستخدمة في الدراسة
56	4-6 التجهيزات المستخدمة في الدراسة
57	2-4-6 فرن تجفيف كهربائي
57	3-4-6 دورق عياري
58	4-4-6 جهاز الموجات فوق الصوتية
59	5-4-6 الكلوروفورم
60	6-4-6 جهاز قياس توتر الانهيار
61	7-4-6 جهاز التحليل الطيفي FTIR
62	8-4-6 التشعيع بأشعة غاما
63	5-6 البروتوكولات التجريبية الكاملة
63	1-5-6 قياس محتوى الماء
64	2-5-6 قياس الكثافة
64	3-5-6 قياس الحموضة
65	4-5-6 قياس توتر الانهيار
66	5-5-6 التحليل بمطيافية الأشعة تحت الحمراء FT-IR
66	6-5-6 التشعيع بأشعة غاما
66	6-6 المنهجية التحليلية للبيانات
69	الفصل السابع: النتائج ومناقشتها
69	1-7 مقدمة

70	2-7 نتائج اختبارات العينات قبل التشعيع
79	3-7 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 50Kgy
90	4-7 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 100Kgy
100	5-7 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 150Kgy
110	6-7 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 200Kgy
121	7-7 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 250Kgy
132	8-7 العلاقة بين جرعات التشعيع ومتانة العينات المدروسة والمنهجية المستخدمة
137	9-7 التنبؤ بقيمة توتر انهيار الزيت العازل المشع باستخدام تقنيات الذكاء الصناعي
140	10-7 الخاتمة
142	11-7 التوصيات
143	المراجع
I	Abstract

قائمة الجداول

الصفحة	الجدول
16	الجدول (1-2) خصائص المواد العازلة
23	الجدول (2-2) تصنيف بعض العوازل الصلبة تجارياً.
26	الجدول (3-2) الخصائص الكهربائية للسوائل العازلة الأكثر استخداماً
31	الجدول (4-2) أهم متطلبات الغازات المستخدمة كعزل كهربائي
31	الجدول (5-2) الخصائص الرئيسية لخلائط النيتروجين وثنائي أكسيد الكربون وسداسي فلوريد الكبريت كعازل غازي داخلي
45	الجدول (1-4) الغازات الناتجة حسب نوع العطل
46	الجدول (2-4) تصنيف الاعطال وفقاً للمعيار IEC60599 والمعيار IEEE StdC57.104
57	الجدول (1) مواصفات العينات المدروسة
70	الجدول (1-6) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص المدروس
73	الجدول (2-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة
76	الجدول (3-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة
80	الجدول (5-7) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغرام
83	الجدول (6-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغرام
87	الجدول (7-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغرام
90	الجدول (8-7) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغرام
93	الجدول (9-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغرام
97	الجدول (10-7) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغرام

101	الجدول (7-11) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغرام
104	الجدول (7-12) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغرام
107	الجدول (7-12) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغرام
111	الجدول (7-14) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغرام
115	الجدول (7-15) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغرام
116	الجدول (7-16) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغرام
122	الجدول (7-17) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغرام
126	الجدول (7-18) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغرام
129	الجدول (7-19) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغرام
137	الجدول (7-20) مقارنة بين النماذج المقترحة للعينات المدروسة

قائمة الأشكال

الصفحة	اسم الشكل
17	الشكل (1-2) التغيرات في الخواص العازلة مع درجة الحرارة
25	الشكل (2-2) المتطلبات الأساسية للسوائل العازلة
28	الشكل (3-2) بنية جزئ مادة سليكونية (جزئ البولي سيلوكسان)
29	الشكل (4-2) البنية الكيميائية للأحجار الأساسية لجزئ زيوت الكلوفين
48	الشكل (5-2) مميزة الفولت-أمبير
48	الشكل (6-2) الانهيار الحرج للجهد
57	الشكل (1-5) العينات المدروسة
57	الشكل (2-5) ميزان الكتروني
58	الشكل (3-5) فرن تجفيف كهربائي
59	الشكل (4-5) ورق عياري
60	الشكل (5-5) جهاز الموجات فوق الصوتية
61	الشكل (6-5) محلول الكلوروفور
62	الشكل (7-5) جهاز قياس توتر الانهيار
63	الشكل (8-5) جهاز التحليل الطيفي
64	الشكل (9) العينات ضمن محطة التشعيع
54	الشكل (1) التأثير الضوئي
55	الشكل (2) الية تبعثر كومبتون
55	الشكل (3) توليد الأزواج
71	الشكل (1-7) التحليل الطيفي للعينات الأولى قبل التشعيع بأشعة غاما
74	الشكل (2-7) التحليل الطيفي للعينات الثانية قبل التشعيع بأشعة غاما

77	الشكل (3-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة قبل التشعيع بأشعة غاما
81	الشكل (5-7) التحليل الطيفي للعينة الأولى بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغرام
84	الشكل (6-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغرام
88	الشكل (7-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغرام
90	الشكل (8-7) التحليل الطيفي للعينة الأولى بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغرام
94	الشكل (9-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغرام
98	الشكل (10-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغرام
102	الشكل (11-7) التحليل الطيفي للعينة الأولى بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغرام
105	الشكل (12-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغرام
108	الشكل (13-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغرام
112	الشكل (14-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغرام
116	الشكل (15-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغرام
119	الشكل (16-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغرام
123	-الشكل (17-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغرام
127	الشكل (18-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغرام
130	الشكل (19-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغرام
134	الشكل (20-6) تغيرات قيمة جهد الانهيار مع الجرعة المطبقة
135	الشكل (21-6) تغيرات قيمة جهد الانهيار مع الجرعة المطبقة
136	الشكل (22-6) تغيرات قيمة جهد الانهيار مع الجرعة المطبقة
139	الشكل (23-7) مقارنة للبيانات الاصلية مع التنبؤات المستقبلية
139	الشكل (24-7) الخلية العصبونية

قائمة المعادلات

المعادلة	الرقم
(1-2)	1
(2 – 2)	2
(3 – 2)	3
(1 – 5)	4
(2 – 5)	5
(3 – 5)	6
(4 – 5)	7
(1-6)	8
(2-6)	9
(1 – 7)	10
(2 – 7)	11
(3-7)	12
(4-7)	13
(5-7)	14

جدول المصطلحات

باللغة الانكليزية	باللغة العربية
Electrical Power System	النظام الكهربائي
Electric Power System Stability	استقرار نظام الطاقة الكهربائية
Polychlorinated biphenyl (PCBs)	ثنائي الفينيل متعدد الكلور
Ultraviolet radiation	الأشعة فوق البنفسجية
High voltage	التوتر العالي
Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)	وكروماتوغرافيا الغاز - مطياف الكتلة
Thermogravimetric analysis (TGA)	والتحليل الوزني الحراري
TRICHLORBENZENE	ثلاثي كلور البنزين
Total acid number	الرقم الحمضي الكلي
Polyethylene (PE)	البولي إيثيلين
Dissolved Gas Analysis (DGA)	تحليل الغازات الذائبة
American Society for Testing and Materials	الجمعية الأمريكية لاختبار المواد
Institute of Electrical and Electronics Engineers	معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات
Partial discharge	التفريغ الجزئي
Artificial Neural Networks (ANN)	شبكات عصبونية اصطناعية
Electric arcs	الأقواس الكهربائية
Artificial Intelligence	الذكاء الاصطناعي
Insulating fluid	السوائل العازلة
Mineral Insulating oil	الزيت العازل المعدني
Solid insulating	العوازل الصلبة
Gasses Insulating	العوازل الغازية
Artificial Neural Networks (ANN)	الشبكات العصبونية الاصطناعية
Breakdown voltage	توتر الانهيار
Acidity	الحموضة

Density	الكثافة
Water content	محتوى الماء
Regression	الانحدار
Prediction	التنبؤ
Polynomial regression	الانحدار متعدد الحدود
Radiation	التشعيع
Gamma rays	أشعة غاما
Alpha rays	أشعة الفا
Beta rays	أشعة بيتا
Aging	التقادم
Degradation	التدهور
Electrical tests	الاختبارات الكهربائية
Chemical tests	الاختبارات الكيميائية
Physical tests	الاختبارات الفيزيائية
Fourier-Transform Infrared Spectroscopy	التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء
Radiation dose	جرعة التشعيع
Photoelectric effect	التأثير الكهروضوئي
Pair production	توليد الأزواج
Compton scattering	تبعثر كومبتون
Electrical Breakdown Strength	متانة الانهيار الكهربائي
Ionizing Radiation	الاشعاع المؤين

الملخص

تعد المحولات الكهربائية من أهم معدات منظومة نقل الطاقة الكهربائية؛ فهي صلة الربط المشتركة بين محطات التوليد وبين خطوط النقل وكذلك بين خطوط النقل وبين شبكات التوزيع، فأى إنهيار في المحول يؤثر على مدى إستقرار وموثوقية الشبكة الكهربائية، وبما أن عمر المحول يعتمد على تصميم وحالة العزل الكهربائي، فقد يؤدي أي تدهور في العزل الي إنهيار المحول؛ خلال فترة التشغيل للمحولات تتولد حرارة بالملفات تنتقل بالتأثير الحراري إلى المواد العازلة ثم إلى زيت المحول الذي بدوره يقوم بعدة وظائف أهمها التبريد و العزل و ذلك للمحافظة على العازلية الجيدة للمحول بالتالي استمرارية عمله، من هنا تكمن أهمية وظيفة زيوت المحولات كمادة سائلة عازلة، وبما أن موثوقية عمل المحولات الكهربائية يعتمد بشكل أساسي على خصائص العازل المستخدم في المحولة، تركزت هذه الدراسة على السوائل العازلة من خلال بيان أثر العمليات المختلفة على خصائصه، حيث لا يزال تطوير المواد العازلة لتجهيزات التوتر العالي يحظى باهتمام كبير من قبل العديد من الباحثين حول العالم لاسيما في ظل التحديات التشغيلية والبيئية التي تواجه نظم الطاقة الحديثة. يتضمن هذا العمل استخدام تقنية التشعيع بأشعة غاما لدراسة أثرها في تحسين بعض الخصائص الكهربائية والكيميائية والفيزيائية للزيوت المعدنية العازلة. والهدف من ذلك هو دراسة إمكانية استخدام هذه التقنية لتحسين أداء واستدامة زيوت العزل، حيث يعد ذلك أمراً ضرورياً للحفاظ عليها والإطالة لعمرها الافتراضي وزيادة الموثوقية التشغيلية. أجريت الدراسة على ثلاثة عينات لزيوت عازلة معدنية مستخدمة حالياً في تجهيزات التوتر العالي في وزارة الكهرباء في سوريا من مصادر انتاج مختلفة، تم دراسة الخصائص الكهربائية والكيميائية والفيزيائية لتلك العينات قبل وبعد التشعيع ضمن الشروط والمعايير المعتمدة، تمت مقارنة نتائج الاختبارات مع قيم الخصائص المرجعية عالمياً (IEC, ASTM, ISO) وتم استخدام تقنية التحليل الطيفي تحويل فورييه (FT-IR) لمعرفة التغيرات الحاصلة في البنى الكيميائية للعينات المدروسة قبل وبعد التشعيع، وتم استخدام نموذج الانحدار متعدد الحدود لربط العلاقة ما بين توتر انهيار العينات وجرعات التشعيع المطبقة.

كلمات مفتاحية: العازلية، الجهد العالي، الزيوت العازلة، الخصائص، أشعة غاما.

الفصل الأول: الإطار العام للبحث

1-1 مقدمة:

تشير معظم الإحصائيات إلى أن أغلب حالات فشل تجهيزات التوتر العالي ناتجة عن مشكلات العزل وتقدر بنسبة 36.62%، كان الزيت المعدني ولا يزال السائل العازل الأكثر استخدامًا على نطاق واسع حيث يعد الهدف الرئيسي لاستخدام الزيوت العازلة هما التبريد والعزل. ومن الناحية الاقتصادية فإنها تعتبر هي رخيصة الثمن ومتوفرة بسهولة.

يشرح هذا الفصل: اشكالياته وتساؤلاته وفرضياته ومسلماته والهدف منه وأهميته ومبرراته وحدوده وذلك ضمن الإطار العام لمخطط البحث الذي تمت الموافقة عليه للتسجيل في الدكتوراه. بالإضافة لشرح عام للدراسات المرجعية المرتبطة بموضوع البحث.

2-1 إشكاليات البحث:

تعتمد محولات القدرة في تبريدها وعزلها على الزيت، حيث يعمل الزيت على تصريف الحرارة الناتجة عن الضياعات في داخل المحولات إلى الوسط الخارجي، كما أنه يقوم بوظيفة العزل بين الملفات فيما بينها (أي ملفات التوتر المنخفض والعالي)، إن حدوث أي انهيار في هذا الزيت يؤدي إما إلى عطل في المحولة يؤدي إلى خروجها من الخدمة، أو إلى حدوث تقادم مسرع للمحولة ينقص من عمرها الزمني. لذلك، قامت العديد من الدراسات والأبحاث في العمل لتحسين خصائص هذه الزيوت أو البحث عن بديل آخر، وقد استخدمت الزيوت ذات المصدر النباتي في العزل، ولكن لا يشكل ذلك حل للمشكلة لذلك نسعى في هذا البحث إلى دراسة امكانية استخدام تقنية التشعيع في تحسين بعض خصائص الزيوت المستخدمة في محولات القدرة الكهربائية.

1-3 تساؤلات البحث:

سيتم في هذا المحور طرح عدة تساؤلات للمساهمة في تشكيل استيعاب أكبر لمشكلة البحث وكيفية علاجها وذلك كما يلي:

- ما هي أنواع الزيوت التي يتم استخدامها في العزل للتجهيزات الكهربائية في وزارة الكهرباء؟
- في حال تبين أن الزيت يحتاج لإعادة تأهيل ما هي الطرق المستخدمة لتحسين عازليته؟
- كيف ستتغير خصائص الزيت بعد تشعيه وهل سيكون مطابقاً لخصائص الزيت الجديد؟

1-4 فرضيات البحث:

- من خلال دراسة خصائص الزيوت العازلة المستخدمة في محولات القدرة الكهربائية يمكن تقدير حالة عمل المحول والمساهمة بخفض الأعطال فيها مما يساهم الحفاظ على موثوقية عملها ويؤثر على أدائها بشكل خاص وأداء الشبكة الكهربائية بشكل عام.
- من الممكن خفض تكاليف الصيانة واستبدال الزيوت في المحولات عند تطبيق طرق جديدة للحفاظ على خصائصه عند القيم المرجعية عالمياً
- العمل على تحسين كفاءة الشبكة الكهربائية من خلال تقليل الأعطال في محولات القدرة الكهربائية التي تعتبر العنصر الرئيسي في المنظومة الكهربائية.
- استخدام تقنية جديدة لدراسة إمكانية تحسين خصائص الزيوت العازلة والعمل على تطبيقها على الزيوت العازلة المستخدمة حالياً في محولات القدرة الكهربائية.

1-5 مسلمات البحث:

- يستند هذا البحث إلى الانتشار الواسع للزيوت العازلة واستخدامها كمادة عازلة في تجهيزات التوتر العالي.

1-6 الهدف من البحث:

- دراسة الطرائق الحديثة لتحسين خصائص الزيوت العازلة عالمياً.
- اختيار طريقة التشعيع والعمل على دراسة امكانية استخدامها لتصبح قابلة للتطبيق على التجهيزات الكهربائية المستخدمة لدينا /محولات القدرة الكهربائية/.
- تطبيق هذه الطريقة على كميات من الزيوت المستخدمة حالياً في بعض محولات القدرة في وزارة الكهرباء.

1-7 أهمية البحث:

يعد دراسة طريقة جديدة لتحسين خصائص الزيت العازل المستخدم في محولات القدرة الكهربائية أمراً ضرورياً ليصبح مواكباً للتطور لما وصلت إليه الدول المتقدمة وأخرها استخدام الزيوت النباتية للعزل في المحولات الكهربائية، سيتم في هذه الدراسة استخدام تقنية التشعيع للتحقق من أثرها على خصائص الزيوت العازلة هل ستساعد في تحسين عازلية محولات القدرة مما ينعكس إيجاباً على أدائها، ويؤدي إلى تحقيق موثوقية في العمل ومردود أعلى ومقدرة أعلى على التكيف والحصول على نتائج جيدة مقارنة بالقيم المرجعية الدولية المعتمدة بهذا المجال.

1-8 مبررات البحث:

زاد في السنوات الأخيرة وبشكل ملحوظ الاهتمام في مختلف دول العالم المتقدمة بالعمل على تطوير مواد جديدة لاستخدامها كمواد عازلة في التجهيزات الكهربائية. بينت الأبحاث العديدة أن استخدام عوازل سائلة ذات متانة كهربائية عالية يساعد في تحسين أداء عمل التجهيزات الكهربائية التي تستخدم تلك المواد كعوازل، لذلك كان لابد من التفكير في استخدام طريقة جديدة لدراسة إمكانية تحسين خصائص الزيوت العازلة المستخدمة في محولات القدرة الكهربائية.

1-9 حدود البحث:

يشمل نطاق البحث دراسة خصائص الزيوت العازلة المستخدمة في تجهيزات التوتر العالي، والعمل على دراسة امكانية تحسين خصائصها العازلة.

1-10 الدراسة المرجعية:

اطُلع على عددٍ من الكتب والرسائل والأوراق البحثية؛ لمعرفة ما توصل إليه العالم في مجال بحثنا حيث انه على الرغم من الدراسات العديدة التي تناولت تأثير التشعيع على المواد العازلة، لا تزال هناك فجوات معرفية حول الآليات الجزيئية الدقيقة التي تحكم تفاعل الإشعاع مع المكونات الهيدروكربونية للزيوت. ونعرض هنا بعض هذه الأبحاث:

1-10-1 الدراسة المرجعية الأولى:

المعالجة المتقدمة للزيوت المعدنية للمحولات الملوثة بمخاليط الأروكلور باستخدام طريقة الامتصاص والإشعاع فوق البنفسجي المرئي: تأثيرات درجة الحرارة ولون الزيت وفقًا لمعيار ASTM D1500

Advanced treatment of transformer mineral oils contaminated with aroclor mixtures using a combined UV–Visible irradiation and adsorption method: Effects of temperature and oil color according to ASTM D1500.

Chemical Engineering Journal- August 2024

تناول البحث [1] طريقة لإعادة تدوير زيوت المحولات الملوثة بالأروكلور مع الحفاظ على خصائصها الكيميائية والفيزيائية الأصلية. تتضمن التقنية المقترحة تعريض الزيت الملوث للأشعة فوق البنفسجية (UV) المرئية. تُقيّم فعالية العملية باستخدام تقنيات تحليلية مختلفة، بما في ذلك توتر الانهيار، ومعايرة الحموضة، وكروماتوغرافيا الغاز-مطياف الكتلة (GC/MS)، والتحليل الوزني الحراري (TGA)، وتحليل الألوان-ASTM D1500. تُظهر النتائج أنه بعد 8 ساعات من التشعيع، يُمكن خفض مستويات الأروكلور في الزيت إلى أقل من

50 جزءًا في المليون، مع إزالة مركبات الأحماض الكلورية لاحقًا بواسطة الطين المنشط. من خلال الجمع بين الأشعة فوق البنفسجية والمرئية والامتصاص، لا تعمل هذه الطريقة على إزالة الأركلور فحسب، بل تعمل أيضًا على تحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للزيوت، مما يجعلها نهجًا واعدًا لتنقية سوائل المحولات.

1-10-2 الدراسة المرجعية الثانية

تحسين إزالة التلوث من زيت المحولات: نهج متكامل يدمج الامتصاص والمعالجة الإشعاعية لمركبات ثنائي الفينيل متعدد الكلور

Improving transformer oil decontamination: A synergistic approach integrating adsorption and radiative treatment for polychlorinated biphenyls

Elsevier, journal of Separation and Purification Technology, April 2024,

تناول البحث [2] تطوير طريقة فعالة وآمنة لإزالة مركبات ثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs) من زيت المحولات الكهربائية الملوثة، مع الحفاظ على الخصائص الكيميائية والفيزيائية للزيت لتمكين إعادة استخدامه. تعتمد الطريقة المبتكرة على دمج تقنيتين رئيسيتين: التشعيع بالأشعة فوق البنفسجية المرئية، (UV-Visible): الامتصاص باستخدام البوكسيت المنشط: (BFE)، يؤدي تعريض الزيت الملوثة للأشعة (بطول موجة 290-390 نانومتر) إلى تكسير روابط الكلور في مركبات PCBs، مما يحولها إلى مركبات أقل سمية مثل ثنائي الفينيل (PCB No. 0) بعد 8 ساعات من التشعيع، انخفض تركيز PCBs من 350 جزء في المليون إلى أقل من 50 جزء في المليون، وهو الحد المسموح به في الاتحاد الأوروبي. يُستخدم البوكسيت (يحتوي على 92% من أكسيد الألمنيوم) لامتصاص المنتجات الثانوية الكلورية والأحماض الناتجة عن التشعيع، مما يعيد للزيت لونه وخصائصه الفيزيائية. يمكن إعادة تنشيط البوكسيت حرارياً حتى 350 مرة قبل أن يفقد فعاليته بسبب تغيرات في البنية البلورية. توصل الباحث إلى ما يلي:

- حفظ الخصائص الكهربائية للزيت (مثل توتر الانهيار) بعد المعالجة، مما يجعله صالحًا لإعادة الاستخدام.

- أظهر تحليل H-NMR و GC/MS كفاءة عالية في تتبع تحلل PCBs وتأكيد نقاء الزيت.
- انخفاض الرقم الحمضي الكلي (TAN) من 0.3 إلى 0.03 mgKOH/g/ بعد المعالجة.

1-10-3 الدراسة المرجعية الثالثة

التغيرات في خصائص أداء زيت المحولات نتيجة الإشعاع المؤين

Changes in Performance Characteristics of Transformer Oil by the Action of Ionizing Radiation

High Energy Chemistry 53(6):454-458, November 2019

تناول البحث [3] دراسة تجريبية لأثر الأشعة المؤينة على الخصائص الكيميائية للزيوت المعدنية

المستخدمة في المحولات الكهربائية. الطريقة التي اعتمدها الباحث تحديد التغيرات الحاصلة على الخصائص الكيميائية كالكتافة واللزوجة والغازات المنتجة.

وجد الباحث تجريبياً تكويناً فعالاً للمنتجات الغازية ومنتجات الأكسدة (H_2O_2) عند تعرض زيت

المحولات للإشعاع. علاوة على ذلك، يؤدي تأثير الإشعاع إلى انخفاض كثافة الزيت. وفي ظل الظروف

التجريبية، وجد انخفاضاً طفيفاً في المقاومة الكهربائية وزيادة في التوصيل الكهربائي.

4-10-1 الدراسة المرجعية الرابعة

دراسة مقارنة للتحلل الإشعاعي لزيت المحولات المستعمل والزيت المحتوي على 1، 2، 4-ثلاثي

كلورو البنزين تحت تأثير أشعة جاما

A COMPARATIVE STUDY OF THE RADIOLYSIS OF USED TRANSFORMER OIL AND OIL CONTAINING 1, 2, 4-TRICHLOROBENZENE UNDER THE INFLUENCE OF GAMMA-RADIATION

Problems of Atomic Science and Technology journal , October 2019

تناول البحث [4] دراسة مقارنة للتحليل الإشعاعي لزيت المحولات المُستعمل والزيت المحتوي على 1، 2، 4-ثلاثي كلورو البنزين (TCB) تحت تأثير أشعة غاما. دُرست علاقة تركيز H_2 و H_2O_2 ومؤشر الرقم الهيدروجيني، وأطياف الأشعة تحت الحمراء للعينات المُشععة بـ γ من جرعات مُمتصة في نطاق 4 إلى 136 كيلو جراي. كما دُرست علاقة الرقم الهيدروجيني وتركيز بيروكسيد الهيدروجين بالجرعة المُمتصة. يؤدي التشعيع إلى زيادة الحموضة، المرتبطة بإزالة الكلور من جزيئات TCB. وُجد أنه أثناء التحليل الإشعاعي لزيت المحولات المحتوي على TCB في وجود الأكسجين المذاب، تحدث أكسدة للزيت نتيجة للإشعاع (تكوين H_2O_2 ، CO_2).

5-10-1 الدراسة المرجعية الخامسة

متانة الانهيار الكهربائي لزيوت المحولات المشععة بأشعة جاما

Electrical Breakdown Strength of Gamma-Irradiated Transformer Oils

Japanese Journal of Applied Physics, March 2009

تناول البحث [5] طريقة لفهم خصائص زيوت المحولات المُشععة بأشعة جاما، قام الباحث بقياس توتر الانهيار الكهربائي والمكونات الذائبة في الزيوت بعد تعريضها لأشعة جاما. من خلال قياسات الجهد وتحليل تركيز الماء في الزيوت، استنتج أن الجهد يرتبط ارتباطاً سلبياً قوياً بتركيز الماء. كما أكد ثبات الخصائص الكروماتوغرافية العامة للزيوت، بغض النظر عن توليد الماء والمكونات المتطايرة بفعل أشعة جاما. وخلص إلى أن الخصائص الجوهرية المطلوبة لزيت المحولات لا تتأثر بتعريضه لأشعة جاما حتى جرعة 850 كيلو جراي.

6-10-1 الدراسة المرجعية السادسة

العلاقة بين الخصائص الكهربائية لزيت المحولات بمحتوى الماء باستخدام طريقة الانحدار

The Correlation of Transformer Oil Electrical Properties with Water Content Using a Regression Approach.

Energies 2021, 14, 2089

تناول البحث [6] طريقة التجريبية لقياس تأثير المحتوى المائي على الخصائص الكهربائية لزيوت المحولات المعدنية، وخاصة توتر الانهيار والمقاومة وعامل الفقد. واستخدم طريقة الانحدار لدراسة العلاقة ما بين المحتوى المائي وبعض الخصائص الكهربائية، حيث تضمنت الدراسة العملية ثلاث عينات:

زيت محولات معدني، جديد زيت محولات معدني مجدد، زيت محولات معدني مستعمل منتج.

أجرى الباحث معالجة فيزيائية للعينات المدروسة وذلك بتقليل المحتوى المائي وإزالة الشوائب استخدم الباحث النموذج الانحدار الأسّي لدراسة العلاقة بين محتوى الماء والخصائص الأخرى المدروسة، توصل الباحث الى ما يلي: النموذج الأسّي المقترح ذو أهمية كبيرة لأنه أعطى تطابقاً مع النتائج التجريبية ذات معاملات الارتباط العالية ومن ناحية أخرى، فهو صالح لجميع الخصائص المدروسة، مثل: توتر الانهيار والمقاومة وعامل الفقد العازل وجميع عينات الزيت المدروسة.

7-10-1 الدراسة المرجعية السابعة

تشعيع المواد البوليميرية في الاستخدامات الكهربائية

Irradiation of Polymeric Materials for Electrical Applications

أطروحة دكتوراه جامعة دمشق 2007

درس الباحث ما يلي [7]:

(1) تحسين خواص المواد البوليميرية البولي إيثيلين PE بواسطة التشعيع سواء خصائص كهربائية أو حرارية

أو فيزيائية.

(2) دراسة خصائص هذه المواد قبل وبعد التشعيع وكذلك قبل وبعد التقادم.

(3) الوصول لأفضل الجرعات اللازمة لتحسين هذه الخصائص، وتحديد العلاقة بين الجرعة وهذه الخصائص.

11-1 مناهج البحث وأدواته:

تعتمد الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي التجريبي حيث تتضمن:

- إجراء دراسة لبعض الخصائص الكيميائية والفيزيائية والكهربائية لزيوت عازلة مستخدمة في الجمهورية العربية السورية.

- تعريض تلك العينات لجرعات مختلفة من أشعة غاما.

- دراسة خصائص الزيوت المدروسة بعد التشعيع للتحقق عمليا من تأثير تلك الأشعة على خصائص الزيوت المدروسة

12-1 مكونات البحث:

(1) المقدمة والدراسة المرجعية.

(2) المواد العازلة المستخدمة في تجهيزات التوتر العالي:

1. مقدمة.

2. خصائص المواد العازلة المستخدمة في تجهيزات التوتر العالي.

3. العوازل الصلبة.

4. العوازل السائلة.

5. العوازل الغازية.

(3) الاختبارات المعيارية المعتمدة للزيوت العازلة المعدنية:

1. مقدمة

2. الاختبارات الفيزيائية

3. الاختبارات الكهربائية

4. الاختبارات الكيميائية

(4) التقنيات الحديثة لتقييم حالة الزيوت العازلة المعدنية.

1. مقدمة

2. تقنية تحليل الغازات الذائبة (DGA)

3. كروماتوغرافيا الغاز/قياس الطيف الكتلي (GC-MS).

4. تقنية التحليل بمطيافية الأشعة تحت الحمراء.

5. تقنية مطيافية الأشعة فوق البنفسجية/المرئية.

6. تقنية تحديد الرطوبة.

(5) عمليات التشيع

(6) التجهيزات المستخدمة في الدراسة العملية.

1. مقدمة

2. مكان اجراء الدراسة والوصف التفصيلي للمواد والتجهيزات.

3. المواد المستخدمة في الدراسة.

4. التجهيزات المستخدمة في هذه الدراسة.

5. البروتوكولات التجريبية الكاملة.

6. المنهجية التحليلية للبيانات.

(7) مناقشة النتائج الخاتمة والتوصيات.

تتكون هذه الدراسة من سبعة فصول مقسمة على النحو الآتي:

يتضمن الفصل الأول الإطار النظري للبحث والدراسة المرجعية التي تعرض آخر الأبحاث التي تمت

عن استخدام التشعيع في مجال الزيوت العازلة.

على حين يتناول الفصل الثاني معلومات حول المواد العزلة المستخدمة في تجهيزات التوتر العالي.

أما الفصل الثالث فقد توجه الى الاختبارات المعيارية التقليدية المستخدمة لفحص خصائص الزيوت

العازلة في تجهيزات التوتر العالي، بمفاهيم نظرية لكل منها.

والفصل الرابع يتضمن التقنيات الحديثة المستخدمة عالمياً لتقييم جودة الزيوت العازلة.

والفصل الخامس الذي يتضمن دراسة نظرية حول مصادر الاشعاع وانواعها واستخداماتها.

والفصل السادس يتضمن الدراسة العملية والمواد والتجهيزات المستخدمة والتي هي عبارة عن عينات

زيوت عازلة يتم استخدامها كعوازل سائلة في وزارة الكهرباء في الجمهورية العربية السورية.

وأخيراً الخاتمة والنتائج والتوصيات في الفصل السابع.

الفصل الثاني: المواد العازلة المستخدمة في تجهيزات التوتر العالي

1-2 مقدمة:

تعتبر المواد العازلة من العناصر الأساسية في الأنظمة الكهربائية (Electrical Power System)، خصوصاً تلك التي تعمل تحت توترات عالية، إذ تساهم بشكل رئيسي في ضمان استقرار وكفاءة النظام الكهربائي (Electric Power System Stability)، بالإضافة إلى حماية الأنظمة والمعدات من الأضرار الناتجة عن الانهيار أو التلامس غير المقصود. ومن المعروف أن التوترات العالية هي جزء لا يتجزأ من شبكة توزيع الطاقة الكهربائية، سواء في محطات الطاقة أو خطوط النقل والتوزيع، حيث تتطلب هذه الأنظمة تقنيات خاصة لضمان أمانها وفعاليتها.

تتميز المواد العازلة بقدرتها على مقاومة مرور التيار الكهربائي من خلالها، وهو ما يُعرف بمقاومة العزل. وتعد هذه المواد ضرورية للحد من الضياعات الكهربائية وحماية العناصر المختلفة في الأنظمة الكهربائية مثل الأسلاك والموصلات والمحولات والأجهزة الأخرى من التفاعلات الضارة مثل قوس كهربائي أو فقدان الطاقة. في تجهيزات التوتر العالي، تتعرض المواد العازلة لظروف بيئية قاسية مثل درجات الحرارة العالية، الرطوبة، التلوث، و الاجهاد الكهربائي المرتفع، وهو ما يفرض عليها التميز بخصائص معينة مثل الثبات الحراري، القوة الميكانيكية، والقدرة على التحمل لفترات طويلة دون تأثر.

تلعب هذه المواد دوراً مهماً في منع حدوث المشاكل الكهربائية التي قد تؤدي إلى انفجارات أو حرائق، وكذلك تقليل المخاطر الصحية والبيئية المرتبطة بالحوادث الكهربائية. وتتنوع المواد العازلة المستخدمة في الأنظمة الكهربائية ذات التوتر العالي وفقاً للمتطلبات الفنية الخاصة بكل تطبيق، مثل المواد السائلة والغازية الصلبة. من بين هذه المواد نجد الزجاج، السيراميك، المطاط، البلاستيك، والزيوت العازلة، وكل منها يمتلك مزايا وعيوب تجعلها مناسبة لبعض التطبيقات دون غيرها.

يهدف هذا الفصل إلى دراسة أنواع المواد العازلة الأكثر استخداماً في تجهيزات التوتر العالي، وتحليل خصائصها الفيزيائية والكيميائية التي تؤثر في أداءها. كما سيتم تسليط الضوء على المعايير الهندسية والفنية التي تُحدد اختيار المادة العازلة المناسبة بناءً على المتطلبات البيئية والفنية للأنظمة الكهربائية. سيسهم هذا التحليل في تحسين الفهم العام للمواد العازلة واختيار الأنسب منها لتحقيق أعلى مستويات الأمان والكفاءة في تصميم الأنظمة الكهربائية ذات التوتر العالي.

2-2 خصائص المواد العازلة المستخدمة في تجهيزات التوتر العالي:

1-2-2 مقاومة المواد العازلة:

تعتمد المقاومة المقاسة R للعزل على هندسة العينة أو النظام المقاس، والتي تكون بالنسبة لترتيب الألواح المتوازية:

$$R = \frac{r \cdot t_1}{A} \quad (1-2)$$

حيث: t_1 هو سمك العزل بالسنتيمتر، و A هي المساحة بالسنتيمتر المربع، و r هي المقاومة العازلة بالسنتيمتر الأوم. إذا تغيرت t و A من مكان إلى آخر، فسيتم تحديد "مقاومة العزل" الفعالة من خلال التكامل الفعال لنسبة t_1/A على كامل المنطقة تحت التوتر، على افتراض أن المقاومة العازلة p لا تتغير. إذا لم تكن المادة متجانسة وظهرت مواد ذات مقاومة مختلفة بالتوازي، فيمكن التعامل مع النظام كمقاومات متوازية. في هذه الحالة، تتحكم المادة ذات المقاومة المنخفضة عادةً في السلوك الكلي. ولكن إذا ظهرت مواد ذات مقاومة مختلفة على التوالي في المجال الكهربائي، فإن المادة ذات المقاومة الأعلى ستتحكم عمومًا في التيار، وستظهر غالبية الجهد عبرها، كما في حالة المقاومات المتسلسلة. إن مقاومة العوازل والعوازل تعتمد عادة على الوقت (ولنفس السبب) على التردد. إن سلوك التيار المستمر للعوازل تحت الضغط هو امتداد لسلوك التردد المنخفض. يمكن من حيث المبدأ ربط مقاومة التيار المتردد والتيار المستمر ونفاذية التيار في أوقات وترددات قابلة للمقارنة.

يمكن تقسيم مرور التيار في العوازل إلى أجزاء: (أ) التيار المستمر الحقيقي، والذي يكون ثابتًا مع الوقت ويتدفق إلى ما لا نهاية، ويرتبط بنقل الشحنة من أحد الأقطاب الكهربائية إلى العازل، ومن خلال العازل،

إلى القطب الكهربائي الآخر، و(ب) تيار الاستقطاب أو الامتصاص، والذي لا ينطوي على تدفق الشحنة عبر العازل بين العازل والقطب الكهربائي، بل إزاحة الشحنة داخل العازل.

ينتج تيار الاستقطاب عن أي من الأشكال المختلفة لإزاحة الشحنة المحدودة التي يمكن أن تحدث في العازل. الإزاحة التي تحدث أولاً (في أقل من نانو ثانية) هي إزاحة الذرة المشحونة الإلكترونية والجزئية المسؤولة عن السماحية عالية التردد للغاية. الإزاحة الأبطأ التالية هي دوران الجزيئات والمجموعات ثنائية القطب التي تكون حرة نسبياً في الحركة. الإزاحة الأكثر شيوعاً في قياسات التيار المستمر، أي التيارات المتغيرة في أوقات من رتبة الثواني والدقائق، ترجع إلى الدوران البطيء للغاية للجزيئات والأيونات ثنائية القطب التي تتحرك لأعلى إلى الحواجز الداخلية في المادة أو على أسطح الموصل. عندما تحدث هذه الاستقطابات الإزاحية الأبطأ، ينخفض ثابت العزل الكهربائي مع زيادة التردد ويقترب من مربع معامل الانكسار الضوئي n_2 عند الترددات الضوئية.

في العوازل المركبة (مادة ذات مقاومة أقل نسبياً ممزوجة بمادة ذات مقاومة أعلى نسبياً)، يمكن أن يحدث استقطاب كبير بيني. يمكن تمثيل نموذج دائرة لمثل هذا الموقف عن طريق وضع دائرتين على التوالي وجعل المقاومة الموازية لإحدهما أقل بكثير من الأخرى. للحصول على التأثير، من الضروري أن يكون ثابت الزمن RpC مختلفاً لكل مادة [8، 9].

يتنبأ نموذج بسيط لتيار الاستقطاب بانخفاض أسي للتيار مع الوقت: $I_p = A * e^{-t_2}$ ، على غرار شحن المكثف من خلال المقاومة. من المرجح أن تحتوي المواد المركبة على العديد من الثوابت الزمنية المختلفة $RC/1$ متراكبة. وجد تجريبياً أن تيار الاستقطاب أو الامتصاص يتناقص عكسياً كـ t_2 سلبياً بسيط للزمن:

$$I = A * t_2^{-n} \quad (2 - 2)$$

تم تسمية نسبة التيار عند الدقيقة الواحدة إلى التيار عند 10 دقائق بمؤشر الاستقطاب ويتم استخدامه للإشارة إلى جودة عزل الآلة المركبة. يشير مؤشر الاستقطاب المنخفض المرتبط بمقاومة منخفضة في بعض

الأحيان إلى مسارات تسرب تيار متوازية عبر أو فوق سطح العزل (على سبيل المثال، في أغشية الماء الممتصة).

إن مستوى تيار التوصيل الذي يتدفق بشكل مستمر عبر العزل هو مؤشر على مستوى التركيز الأيوني والحركة في المادة. وفي كثير من الأحيان، كما هو الحال مع الملح في الماء، يتم توفير الأيونات من خلال إلكتروليات الشوائب المذابة أو الممتصة أو المضمنة في المادة. إن عملية تنقية المادة غالباً ما ترفع من المقاومة الكهربائية. وإذا كانت المادة سائلة، فيمكن إجراء عملية التنقية باستخدام الطين الماص أو راتنجات التبادل الأيوني. كما تختلف الموصلية الأيونية بشكل كبير مع نقاء المادة. ومن بين البوليمرات والراتنجات، من المرجح أن تتمتع الراتنجات غير القطبية مثل البولي إيثيلين بمقاومة كهربائية عالية، في حدود 10^{16} أو أكثر، لأنها لا تذيب أو تتفكك الشوائب الأيونية بسهولة. تتمتع الراتنجات القطبية الصلبة أو البلورية بمقاومة كهربائية أعلى من الراتنجات اللينة المماثلة ذات الثابت العازل والنقاء المماثل. عادةً ما تتمتع الراتنجات والسوائل ذات الثابت العازل الأعلى بموصلية كهربائية أعلى لأنها تذيب الشوائب الأيونية بشكل أفضل، وتتفكك الشوائب إلى أيونات بسهولة أكبر في وسط ذي ثابت عازل أعلى. تتمتع السيراميك والزجاج بمقاومة كهربائية أقل إذا كانت تحتوي على أيونات قلوية (الصوديوم والبوتاسيوم)، لأن هذه الأيونات شديدة الحركة [10]. يوضح الجدول (1-1) خصائص المواد العازلة [11].

الجدول (1-2) خصائص المواد العازلة

	kV/mm	ϵ_r	$^{\circ}\text{C}$	W/(m $^{\circ}\text{C}$)	kg/m 3
Dry air	3	1	2000	0.024	1.29
Hydrogen	2.7	1	-	0.17	0.09
Nitrogen	3.5	1	-	0.024	1.25
Oxygen	3	1	-	0.025	1.43
Sulphur hexafluoride SF $_6$	30	1	-	0.014	6.6
Helium	400kPa 1.5	1	-	-	-
Solid asbestos	1	-	1600	0.4	2000
Asbestos wool	1	-	1600	0.1	400
Askarel	12	4.5	120	-	1560
Epoxy	20	3.3	130	0.3	~1800
Glass	100	5 - 7	600	1.0	2500
Magnesium oxide	3	4	1400	2.4	-
Mica	40-240	7	500-1000	0.36	2800
Mineral oil	10	2.2	110	0.16	860
Mylar	400	3	150	-	1380
Nylon	16	4.1	150	0.3	1140
Paper (treated)	14	4 - 7	120	0.17	1100
Polyamide	40	3.7	100-180	0.3	1100
Polycarbonate	25	3.0	130	0.2	1200
Polyethylene	40	2.3	90	0.4	930
Polyimide	200	3.8	180	0.3	1100
Polyurethane	35	3.6	90	0.35	1210
Polyvinylchloride (PVC)	50	3.7	70	0.18	1390
Porcelain	4	6	1300	1.0	2400
Rubber	12 - 20	4	65	0.14	950
Silicon	10	-	250	0.3	~2300
Teflon	20	2	260	0.24	2200

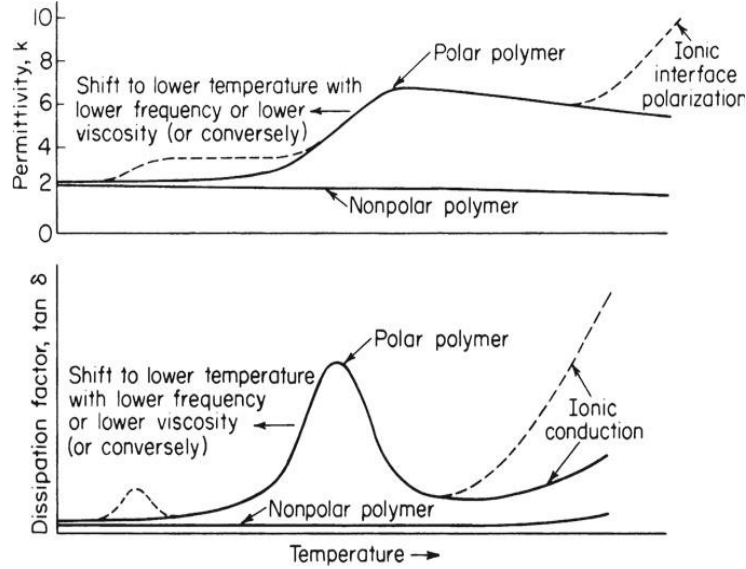
Material properties - breakdown strength, relative permittivity, thermal stability limit, thermal conductivity, and density.

2-2-2 التغيرات في خصائص المواد العازلة تحت تأثير درجة الحرارة:

إن الاتجاه في نفاذية التيار المتناوب و المستمر، كما تم قياسه بواسطة عامل التبديد، يتم التحكم فيه من خلال الحركة الجزيئية الهجرية الأيونية المتزايدة والدورانية ثنائية القطب مع زيادة درجة الحرارة. هذا المنحنى، الذي تم الإشارة إليه في الشكل (1-1)، هو في معظم النواحي صورة طبق الأصل لاتجاه التردد حيث أن التأثيرين مترابطان.

تحدث منطقة الحد الأقصى لنفاذية التيار المتناوب والتشتت وعامل التبديد تحت درجة حرارة الغرفة للسوائل اللزجة وأقل من ذلك بالنسبة للسوائل المتحركة. في الواقع، قد تتبلور السوائل المتحركة قبل أن تظهر التشتت، باستثناء الترددات العالية. مع البوليمرات، من المرجح أن يحدث الحد الأقصى لعامل التبديد، عند ترددات الطاقة، عند درجة تحدث منطقة الحد الأقصى لنفاذية التيار المتردد والتشتت وعامل التبديد تحت درجة

حرارة الغرفة للسوائل اللزجة وأقل من ذلك بالنسبة للسوائل المتحركة. يمكن عادةً ربط التشتت العازل وتشتت معامل المرونة الميكانيكية بنفس درجة الحرارة للترددات القابلة للمقارنة.



الشكل (1-2) التغيرات في الخواص العازلة مع درجة الحرارة [12]

3-2-2 الحقل الكهربائي في العوازل:

إن تقادم الحقل الكهربائي في العوازل له أهمية بالغة فيما يتعلق بالانهيار، حيث يبدأ الانهيار أو الهالة عادة في منطقة أعلى تقادم. في ترتيب المجال الموحد للموصلات أو الأقطاب الكهربائية، يكون أقصى تقادم ببساطة هو الجهد المطبق مقسوماً على الحد الأدنى من التباعد. في المجالات المتباعدة، يجب الحصول على التدرج عن طريق الحساب (وهو أمر ممكن لبعض الترتيبات البسيطة) أو عن طريق رسم المجال.

الوضع الشائع هو الهندسة المحورية ذات نصف القطر الداخلي والخارجي R_1 و R_2 . يتم إعطاء التدرج

عند نصف القطر r (سنتيمتر) مع الجهد V المطبق بالمعادلة:

$$E = \frac{V}{r * \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)} \quad (3 - 2)$$

حيث E هي V/cm . الحقل الكهربائي

عندما تظهر مواد عازلة مختلفة على التوالي، فإن الإجهاد الأكبر مع مجالات التيار المتردد يقع على المادة ذات الثابت العازل الأقل. غالبًا ما تنهار هذه المادة أولاً ما لم تكن قوتها العازلة أعلى بكثير [12].

تأثير سمك العزل والثابت العازل (وكذلك حدة حافة الموصل) على خلق إجهاد كهربائي كافٍ لانهايار الهواء المحلي (الانفراغات الجزئية). مع مجالات التيار المستمر، يتم توزيع الإجهاد وفقًا لمقاومة المواد، ويكون الإجهاد الأعلى على المادة ذات المقاومة الأعلى.

2-2-4 متانة العزل:

تعرف على أنها شدة الحقل العظمى المطبقة عمليًا، غالبًا ما يتم تعريفها عن القوة على أنها جهد الانهيار مقسومًا على سماكة المادة العازلة بين الأقطاب الكهربائية، بغض النظر عن تركيز إجهاد القطب الكهربائي.

يبدو أن الانهيار لا يتطلب فقط إجهادًا كهربائيًا كافيًا ولكن أيضًا حدًا أدنى معينًا من الطاقة. إنها خاصية تتغير مع العديد من العوامل مثل سمك العينة وحجم وشكل الأقطاب الكهربائية المستخدمة في تطبيق الإجهاد، وشكل أو توزيع مجال الإجهاد الكهربائي في المادة، وتكرار الجهد المطبق، ومعدل ومدة تطبيق الجهد، والتعب مع تطبيقات الجهد المتكررة، ودرجة الحرارة، ومحتوى الرطوبة، والتغيرات الكيميائية المحتملة تحت الضغط. تتناقص القوة العازلة العملية بسبب العيوب في المادة، مثل الشقوق، والجسيمات الموصلة المضمنة وتجويغات الغاز. تتأثر القوة العازلة للسوائل والغازات سلبًا بالجسيمات الموصلة. لبيان القوة العازلة بشكل صحيح، يجب تحديد حجم وشكل العينة، وطريقة الاختبار، ودرجة الحرارة، وطريقة تطبيق الجهد، والظروف المصاحبة الأخرى بشكل محدد قدر الإمكان. يجب استخدام طرق ASTM القياسية لاختبار القوة العازلة لإجراء اختبارات المقارنة للمواد، ولكن لا ينبغي توقع أن تنطبق مستويات القوة العازلة المقاسة في مثل هذه الاختبارات في الخدمة لفترات طويلة. من الأفضل اختبار العزل في نفس التكوين الذي سيتم استخدامه فيه. أيضًا، يجب

مراعاة الانخفاض المحتمل في القوة العازلة أثناء التعرض لفترة طويلة لبيئة الخدمة، والشيخوخة الحرارية، والتفريغات الجزئية (الهالات)، إذا كانت موجودة عند جهد الخدمة المطبق. لدى ASTM طرق اختبار العمر الحراري لتقييم التحمل الطويل الأمد لبعض أشكال العزل مثل عزل الصفائح، ومينا الأسلاك، وغيرها. هناك اختبارات عمر حراري IEEE لبعض الأنظمة مثل ملفات المحرك ذات اللف العشوائي. تختلف القوة العازلة مع الوقت وطريقة تطبيق الجهد. مع نبضات الجهد أحادية الاتجاه، التي لها أوقات صعود أقل من بضعة ميكروثانية، يكون هناك تأخر زمني للانهييار، مما يؤدي إلى قوة أعلى واضحة للنبضات القصيرة جدًا. في اختبار العزل الورقي في الزيت المعدني، عادة ما يتم ملاحظة قوة أعلى للنبضات ذات زمن الارتفاع البطيء وقوة أعلى إلى حد ما لجهد التيار المستمر. إن الاتجاه في جهد الانهييار مع الوقت هو سمة مميزة للعديد من أنظمة العزل الصلبة. مع جهد التيار المتردد، تنخفض القوة الظاهرة بشكل مطرد مع الوقت نتيجة للتفريغات الجزئية (في الوسط المحيط عند الموصل أو حافة القطب). تخترق هذه التفريغات العزل الصلب. تنتج التفريغات عن تحلل الغاز أو السائل قبل تحلل الصلب. الميكا على وجه الخصوص، وكذلك المواد غير العضوية الأخرى أكثر مقاومة لمثل هذه التفريغات. يجب استخدام الراتنجات العضوية بحذر حيث يكون تدرج جهد التيار المتردد مرتفعًا وقد توجد تفريغات جزئية. نظرًا لأن وجود تفريغات جزئية على العزل مهم جدًا لتحمل الجهد لفترة طويلة، فقد أصبح اكتشافها وقياسها أدوات مهمة جدًا لمراقبة الجودة والتصميم. إن مقاومة الجهد الكهربائي تزداد بشكل عكسي مع التردد المطبق، حيث أن عدد التفريغات لكل وحدة زمنية يزداد بشكل مباشر تقريبًا مع التردد. ولكن في بعض الحالات، تمنع الظروف المحيطة بالتفريغ المستمر.

عندما يتم تصنيع العزل بالراتنج العضوي (مادة بوليميرية لزجة أو صلبة تُشتق من مواد عضوية (مشتقات النفط أو مصادر نباتية)) لتجنب التفريغ الجزئي باستخدام موصلات أو أقطاب كهربائية مرتبطة بشكل وثيق بالعزل، كما هو الحال في كابلات البولي إيثيلين المبطنة مع واجهة بلاستيكية شبه موصلة بين الراتنج والموصلات المعدنية الداخلية والخارجية المحورية على التوالي، فإن تحمل الجهد الكهربائي يمتد بشكل كبير. ومع ذلك، فإن العيوب في واجهة "شبه الموصل" هذه، أو عند وجود جزيئات موصلة في الراتنج، يمكن أن تؤدي

إلى تفريغات محلية وتطور نمو "الشجرة الكهربائية". كما أن تشريب الفراغ وصب الأقطاب الكهربائية أو الموصلات في الراتنج يميل أيضًا إلى تجنب التجايف والتفريغات السطحية وتحسين تحمل الجهد الكهربائي بشكل كبير عند الضغوط العالية. عادةً ما تكون قوة التيار المستمر للعزل الصلب أعلى وتتنخفض بشكل أقل بكثير مع مرور الوقت من قوة التيار المتردد، حيث أن تفريغات الهالة نادرة. إن القوة الكهربائية العازلة تكون أعلى بكثير حيث يتم تجنب التفريغات السطحية وعندما يكون المجال الكهربائي موحدًا. ويمكن تحقيق ذلك باستخدام المواد الصلبة عن طريق تجايف كروية في المادة واستخدام أقطاب الطلاء الموصلة. إن القوة الكهربائية "الجوهرية" للمواد الصلبة المقاسة في مجالات موحدة، مع تجنب التفريغات السطحية، تتراوح من مستويات في حدود 0.5-1 ميغا فولت/سم لبلورات هاليد القلوي، والتي هي الأدنى تقريبًا، إلى ما يزيد قليلاً عن 10 ميغا فولت/سم. تتمتع البوليمرات وبعض المواد غير العضوية، مثل الميكا وأكسيد الألومنيوم، بقوة تتراوح من 2 إلى 20 ميغا فولت/سم للأغشية الرقيقة. تقل القوة مع زيادة السمك ومع درجة حرارة أعلى من درجة حرارة حرجية (والتي تتراوح عادةً من 1 إلى 100 درجة مئوية)، والتي تكون القوة تحتها ذات قيمة مستوية أو زيادة معتدلة مع زيادة درجة الحرارة. يُعتقد أن الانهيار تحت درجة الحرارة الحرجية يكون إلكترونيًا بحثًا ويكون ثابتًا أو يزداد قليلاً مع درجة الحرارة. وفوق هذه درجة الحرارة، ينخفض بسبب التسخين الحراري العازل. تنخفض جهد الانهيار للمواد العازلة الرقيقة التي تحتوي على عيوب، والتي تعطي الحد الأدنى لجهد الانهيار، مع زيادة المساحة المعرضة للإجهاد. يمكن تقدير تأثير المساحة على القوة من الانحراف المعياري S للاختبارات على مناطق أصغر من خلال تطبيق إحصاءات القيمة الدنيا: $-V_2 = 1.497 S \log(A_1/A_2)V_1$ ، حيث V_1 و V_2 هما جهدا الانهيار للمناطق A_1 و A_2 . إذا كانت موصلية التيار المتردد أو المستمر للعازل عالية أو كان التردد مرتفعًا، فقد يحدث الانهيار نتيجة للتسخين العازل، مما يرفع درجة حرارة المادة بدرجة كافية للتسبب في الذوبان أو التحلل أو تكوين الغاز، إلخ. يمكن اكتشاف هذا التأثير عن طريق قياس الموصلية كدالة للإجهاد الكهربائي المطبق. إذا ارتفعت الموصلية مع الوقت، مع ثبات الجهد، ودرجة حرارة محيط ثابتة، فهذا دليل على

تسخين عازل داخلي. إذا كان نقل الحرارة إلى الأقطاب الكهربائية والبيئة المحيطة كافياً، فقد تستقر درجة الحرارة الداخلية في النهاية، ولكن إذا كان نقل الحرارة غير كافٍ، فسترتفع درجة الحرارة حتى يحدث الانهيار.

2-2-5 الأقواس الكهربائية:

قد تتسبب تفريغات القوس الكهربائي عالية التيار بين الموصلات عبر سطح العزل المصنوع من الراتنج العضوي في تفحم المادة وإنتاج مسار موصل. وفي وجود أغشية مائية سطحية، تتكون من المطر أو التكثيف، وما إلى ذلك، تتشكل تفريغات قوس كهربائي صغيرة بين الأجزاء المتقطعة من غشاء الماء، الذي يكون موصلاً إلى حد ما، وتتم المسارات الموصلة بشكل تدريجي عبر السطح، وفي النهاية تتشكل جسور بين الموصلات وتتسبب في انهيار كامل. وتختلف المواد على نطاق واسع في مقاومتها للتتبع، وهناك مجموعة متنوعة من الاختبارات الجافة والرطبة لهذه الخاصية. وباستخدام الحشوات المناسبة، يمكن جعل بعض الراتنجات العضوية غير قابلة للتتبع بشكل أساسي. وتشتعل بعض الراتنجات مثل بولي ميثيل ميثاكريلات وأكسيد بولي ميثيلين في اللهب في ظل ظروف القوس الكهربائي.

2-2-6 التقادم الحراري:

تخضع المواد العازلة الراتنجية العضوية على وجه الخصوص بدرجات متفاوتة للتدهور بسبب التقادم ، وهي عملية كيميائية تتضمن تحلل المادة أو تعديلها إلى الحد الذي قد يجعلها غير قادرة على العمل بشكل كافٍ كعازل مقصود. وعادة ما تتسارع تأثيرات التقادم بسبب ارتفاع درجة الحرارة، وتستخدم هذه الخاصية لإجراء اختبارات مسرعة حتى الفشل أو إلى حد التدهور الذي يُعتبر خطيراً. تُجرى مثل هذه الاختبارات عند درجات حرارة تشغيل أعلى بشكل ملحوظ من درجات الحرارة العادية، إذا كان العمر المتوقع عدة سنوات أو أكثر، حيث يجب إكمال الاختبارات المسرعة المفيدة بشكل معقول في أقل من عام.

في كثير من الأحيان، تؤثر عوامل بيئية أخرى على العمر بالإضافة إلى درجة الحرارة. وتشمل هذه العوامل وجود أو غياب الأكسجين والرطوبة والتحليل الكهربائي. قد يؤدي الإجهاد الميكانيكي والكهربائي إلى

تقليل العمر من خلال تحديد مستوى الأداء المطلوب الذي يجب أن يعمل به العزل. إذا كان هذا المستوى مرتفعاً، فإن التدهور في العزل مطلوب بشكل أقل للوصول إلى هذا المستوى.

في بعض الأحيان يتم اختبار عمر جهاز كامل، وكذلك عينات أصغر حجماً تتضمن مادة عزل واحدة فقط أو مزيجاً بسيطاً من هذه المواد في نموذج بسيط. يتم ابتكار اختبارات جديدة باستمرار، ولكن كان هناك بعض التوحيد القياسي للاختبارات من قبل معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات والجمعية الأمريكية لاختبار المواد (ASTM) وعلى المستوى الدولي من قبل اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC). من المهم ملاحظة أنه في كثير من الأحيان يتم تعيين تصنيفات درجة الحرارة للمواد بناءً على اختبارات المادة وحدها. غالباً ما تعمل هذه المادة، جنباً إلى جنب مع مواد أخرى في جهاز أو نظام، بشكل مرضٍ عند درجات حرارة أعلى بشكل ملحوظ. على العكس من ذلك، نظراً لعدم التوافق مع المواد الأخرى، فقد لا تعمل عند درجة حرارة عالية كما لو كانت بمفردها. لهذا السبب، يُعتبر من المرغوب فيه إجراء اختبارات تشغيل وظيفية على أنظمة كاملة. يمكن أيضاً تسريع هذه الاختبارات عند درجات حرارة مرتفعة وظروف التعرض البيئي مثل الترتيب والاهتزاز ودورة درجات الحرارة الباردة وما إلى ذلك التي يتم تقديمها بشكل متقطع.

2-3 العوازل الصلبة:

ان استخدام مادة عازلة "صلبة" ضرورياً في أي نظام أو تجهيزات، حيث يجب فصل الأجزاء ذات الكمونات المختلفة بشكل مادي. يتم تحقيق ذلك من خلال توفير متانة تحمل للتحطم من خلال المواد العازلة، ووسط بطول كاف حول الأسطح الخارجية. وستعتمد القيم النسبية للمساكة، والمسار الزاحف على المادة، والوسط والحقل الكهربائي (المطال والتوزيع). يتطلب الوجود الضروري للأسطح الزاحفة تصميماً دقيقاً للنهايات والبنى الداعمة. ويعد الاختيار الصحيح للمواد أمراً ضرورياً، خاصة عندما لا يكون هناك تحكم في الإجهاد الكهربائي ممكن، أو تكون الظروف الاقتصادية والبيئية سيئة. في بعض الحالات، يتم تصميم نظام المادة العازلة لحدوث انقراغات قبل حدوث الخرق للمادة الصلبة، كما هو الحال العناصر المستخدمة في خط نقل القدرة، حيث يكون الهواء هو الوسط المحيط [11]. تتمتع العوازل الصلبة بمتانة كهربائية عالية بالمقارنة بالسوائل والغازات. من

أكثر طرائق التصنيف شيوعاً هي التركيب الكيميائي، مثل: البوليمرات العضوية، وغير العضوية، والاصطناعية .
من وجهة نظر الاستخدام، يمكن تصنيفها على أنها:

1- مركبات لدنة بالحرارة، 2- صلدة بالحرارة 3- مركبات للتضمين والغلف. المواد العضوية مشتقة من مواد نباتية أو حيوانية. وتتدهور بسرعة إذا تجاوزت درجة حرارة التشغيل 144 درجة مئوية. يتم توظيفها في الغالب بعد العلاج بالورنيش أو التشريب في الزيت، على سبيل المثال الورق والورق المقوى.

من الصعب تصنيع المواد الصلبة غير العضوية، ولكنها عوازل جيدة، ويمكن أن تعمل في درجات حرارة أعلى. أهم المواد غير العضوية هي: السيراميك، والزجاج الذي يستخدم لتصنيع العوازل، وعناصر التوتر العالي الأخرى.

تتقسم البوليمرات الاصطناعية إلى مجموعتين: اللدائن الحرارية، او اللدائن الصلدة بالحرارة. يوضح الجدول (2-2) تصنيف بعض العوازل الصلبة تجارياً.

الجدول (2-2) تصنيف بعض العوازل الصلبة تجارياً.

Synthetic polymers			
Organic	Inorganic	Thermoplastic	Thermosetting
amber paper pressboard rubber wood resins	ceramics glass mica fiber glass enamel	perspex polyethylene polypropylene polystyrene polyvinyl chloride polyamid polycarbonate	epoxy resins phenolics melamine urea formaldehyde crosslinked polyethylene elastomers

Classification of some commercial solid dielectrics.

2-4 العوازل السائلة

2-4-1 عموميات:

الوظائف الرئيسية للعزل السائل هي: عزل الأجزاء الحاملة للتيار من المعدات ذات الجهد العالي عند إمكانات مختلفة، وإزالة الحرارة الزائدة من المعدات العاملة وإطفاء القوس في القواطع وغيرها من تجهيزات الفصل ذات التوتر العالي. بالإضافة إلى ذلك، يساعد العازل السائل في الحصول على معلومات حول حالة نظام العزل الداخلي ككل واتخاذ التدابير في الوقت المناسب لمنع فشل المعدات [10].

وبالتالي، من أجل الأداء المثالي لوظائفه، يجب أن يتمتع أي عازل سائل متانة كهربائية عالية، وناقلية حرارية جيدة، واستقرار كيميائي وحراري، وأقل قابلية للاحتراق والسمية قدر الإمكان، ولزوجة مناسبة للظروف الباردة، والقدرة على الحفاظ على خصائصه الرئيسية لفترة طويلة من التشغيل. في درجات حرارة مرتفعة وفولتية كهربائية عالية [12].

بدأ البحث عن السوائل التي تلبي أفضل قائمة الخصائص المذكورة في نهاية القرن التاسع عشر ويستمر حتى الوقت الحاضر، كما هو موضح أدناه. تم إيقاف البحث فقط عن ثنائي الفينيل متعدد الكلور كعازل للمعدات ذات الجهد العالي في عام 1970.

1884—الزيت المعدني

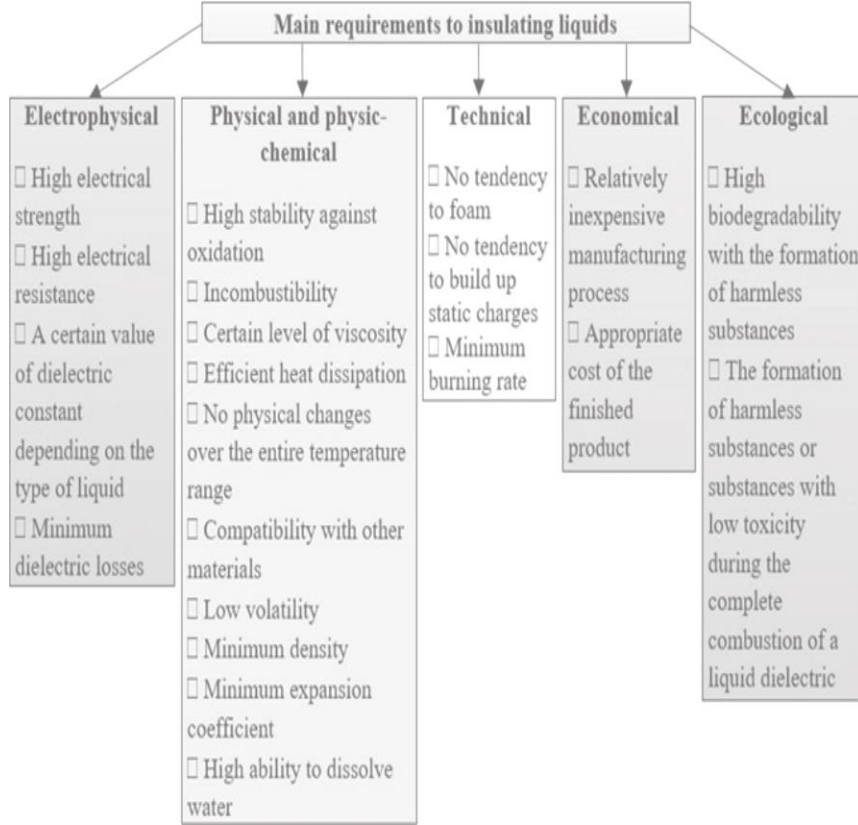
1930—ثنائي الفينيل متعدد الكلور

1974—سوائل السيليكون

1985—الإسترات الاصطناعية

1990—الإسترات الطبيعية

ويبين الشكل (2-2) المتطلبات الأساسية للسوائل العازلة.



الشكل (2-2) المتطلبات الأساسية للسوائل العازلة

تظهر الخصائص الكهربائية للسوائل العازلة الأكثر استخدامًا في الجدول (2-3).

أهم خصائص السوائل كعازل للمعدات ذات الجهد العالي هي المتانة الكهربائية، عامل الفقد، وثابت العزل بالنسبة للسوائل العازلة، يجب اعتبار المتانة الكهربائية سمة متكاملة، حيث يعتمد هذا المؤشر بشدة على درجة تلوثها بالرطوبة والجسيمات الصلبة الموصلة (ألياف السليلوز، والكربون، والغبار، والجسيمات الدقيقة المعدنية، والمركبات الغروانية، وما إلى ذلك). يجب تنظيف السوائل العازلة المحضرة للصب في الجهاز، خالية من الماء والشوائب الأخرى.

الجدول (3-2) الخصائص الكهربائية للسوائل العازلة الأكثر استخدامًا

Indicator	BMIO	SF	SE	NE
Breakdown voltage, kV	30 ÷ 80	35 ÷ 60	50 ÷ 80	60 ÷ 85
Dielectric loss factor, 50/60 Hz, at 90 °C	<0.001	<0.002	<0.006	<0.040
Dielectric constant, 50/60 Hz, at 100 °C	2.1 ÷ 2.5	2.6 ÷ 2.9	3.0 ÷ 3.3	3.2 ÷ 3.3
Specific volume resistance, Ohm cm, at 23 °C	10 ¹³	10 ¹⁵	10 ¹³	10 ¹⁴

PBMIO—petroleum based mineral insulating oil

SF—silicone fluid (organosilicon or polydimethylsiloxane)

SE—synthetic ester

NE—natural ester

يغض النظر عن التركيب الكيميائي لها، ولها جهد انهيار مرتفع (من 60 كيلو فولت وأعلى في خلية اختبار قياسية)، الجدول (3-1). لا يزال الزيت المعدني يحتل المركز الأول كعامل عازل للسوائل مبدد للحرارة في تجهيزات التوتر العالي . يتم تشغيل عدة ملايين من الوحدات من مختلف أنواع المعدات الكهربائية ومليارات الأطنان من النفط من قبل شركات الطاقة في جميع أنحاء العالم.

تظل الزيوت المعدنية البترولية ذات أولوية بسبب مزاياها المتأصلة:

التكلفة المعقولة، خصائص العزل الجيدة، اللزوجة المنخفضة، وجود متطلبات موحدة لخصائصها، سواء للزيت الجديد غير المستخدم أو للزيت قيد التشغيل، على مدى أكثر من قرن من تشغيلها، تم تطوير العديد من الأساليب والمعايير القيمة لتقييم حالة نظام العزل للمعدات المملوءة بالزيت، على مدى عقود من الزمان، تم تطوير طرائق لتشخيص المعدات الكهربائية، وخوارزميات لاستعادة خصائص العزل، وعلى وجه الخصوص، طرائق تجديد الزيت المعدني، وتجفيف العزل الصلب، والعمل في وسط زيتي، وإعادة التعبئة، واستبدال أو خلط زيوت البترول من ماركات مختلفة، إلخ.

2-4-2 الزيوت العازلة المعدنية:

الزيوت العازلة المعدنية هي عبارة عن هيدروكربونات (مركبات من الهيدروجين والكربون) يتم تكريرها من رواسب النفط الخام من الأرض. يتم استخدام حوالي 10 أنواع فقط من الزيوت في هندسة الطاقة في روسيا. يتم تحديد التركيب الكيميائي للنفط الطازج (غير المستغل) من خلال خصائص المادة الخام الأصلية للنفط وتكنولوجيا الإنتاج [10-13].

تتكون جزئياً من مركبات أليفاتية بالصيغة العامة C_nH_{2n} تتألف من خليط من المركبات ذات السلسلة المستقيمة والمتفرعة والحلقية أو الحلقية جزئياً. تحتوي العديد من الزيوت أيضاً على جزء كبير من المركبات العطرية المرتبطة بالبنزين والنفثالين ومشتقات هذه المركبات ذات السلاسل الجانبية الأليفاتية. تعتمد نسبة المكونات العطرية إلى الأليفاتية على مصدر الزيت ومعالجته التكريرية. تعتبر النسبة المئوية للمركبات العطرية ذات أهمية لخصائص امتصاص الغاز أو التقييم تحت التفريغات الكهربائية وخصائص الأكسدة.

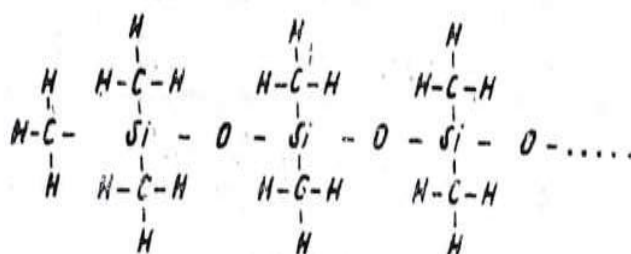
الآن، يوافق العديد من المصنعين على استخدام أي من العلامات التجارية العديدة للزيوت العازلة المعدنية في أجهزتهم بشرط أن تفي بمواصفاتهم التي تشبه ASTM D1040. قد تشير القيم المنخفضة لمتانة العزل الكهربائي إلى تلوث الماء أو الأوساخ. يشير رقم التحليل المرتفع إلى الحموضة، والتي من المحتمل جداً أن تتطور من الأكسدة، خاصة إذا تم استخدام الزيت بالفعل. من المرجح أن يؤدي وجود الكبريت إلى تآكل المعادن في الزيت.

إن قابلية ذوبان الغازات والماء في الزيت المعدني لها أهمية كبيرة فيما يتعلق بوظيفتها في الأجهزة. إن قابلية الذوبان تتناسب مع الضغط الجزئي للغاز فوق الزيت حيث S هي الكمية المذابة عند الضغط p إذا تم التعبير عن قابلية الذوبان على أنها الكمية S_0 المذابة عند الضغط P_0 غالباً ما يتم التعبير عن قابلية الذوبان كنسبة مئوية من حجم الزيت. قيم قابلية ذوبان بعض الغازات الشائعة في زيت المحولات عند الضغط الجوي (760 تور) و25 درجة مئوية هي الهواء 10.8%، والنيتروجين 9.0%، والأكسجين 14.5%، وثاني أكسيد الكربون

99.0% ، والهيدروجين 7% ، والميثان 30% من حيث الحجم. تزداد قابلية ذوبان جميع الغازات، باستثناء ثاني أكسيد الكربون، قليلاً مع زيادة درجة الحرارة. يذوب الماء في زيت المحولات الجديد إلى حد حوالي 60 إلى 80 جزء في المليون عند رطوبة نسبية 100% و 25 درجة مئوية. الكمية المذابة تتناسب طردياً مع الرطوبة النسبية. تزداد قابلية ذوبان الماء مع أكسدة الزيت وإضافة الشوائب القطبية التي يصبح الماء مرتبطاً بها. يمكن تعليق كميات أكبر من الماء في الزيت على شكل قطرات دقيقة.

2-4-3 الزيوت العازلة السيليكونية:

من خلال خواص الزيوت، يمكن القول أن الزيوت السيليكونية تمثل حلقة وصل بين المواد العضوية والمواد غير العضوية، حيث أن لها مركبات كيميائية عديدة مشابهة في كيفية تركيبها لمركبات الفحم الهيدروجينية، حيث توجد لها مركبات خطية سلسلية ومركبات حلقية ترتبط فيها ذرات السيليسيوم بأربطة جانبية مع ذرات الفحم، وبالتالي مع زمر فحم هيدروجينية مكونة سلاسل جانبية مع زمر CH₅ كما هو موضح في الشكل (2-3).



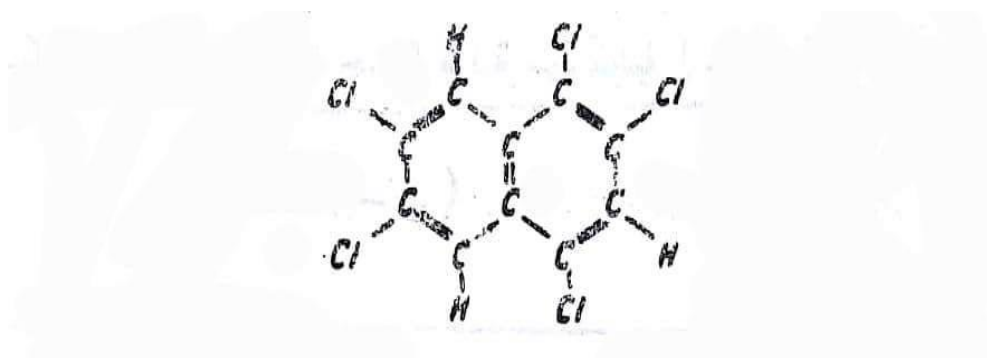
الشكل (2-3) بنية جزء مادة سيليكونية (جزء البولي سيلوكسان)

وتتعلق درجة لزوجة الزيوت السيليكونية ببنيتها وطول سلسلة جزيئاتها. وتتميز الزيوت السيليكونية وبمئاتها الحرارية العالية (نقطة الاشتعال في حدود 300 °C ، درجة حرارة التبخر أكبر من 350 °C) ، وكذلك بقلّة احتوائها على الماء، وبمئاتها الكيميائية الكبيرة، كما أن تغير عامل الفقد ودرجة اللزوجة بتغير درجة الحرارة بالمقارنة مع المواد السائلة العازلة الأخرى صغير نسبياً، وتتميز الزيوت السيليكونية على الزيوت النفطية (الفحم هيدروجينية) وزيوت الكلوفاين (الاسكاريل) بقلّة امتصاصها للماء إلى حد كبير. لذا نجد أن علاقة المتانة الكهربائية للزيوت

السليكونية بالمؤثرات أو الشوائب الخارجية أقل بكثير من بقية أنواع زيوت هي أقل بكثير من المتانة الكهربائية للزيوت النفطية $Ed = 150 \text{ kv/cm}$ العزل، لكن قيمتها التي تتراوح في حدود الفحم هيدروجينية. ويعتبر غلاء أسعار الزيوت السليكونية العامل الرئيسي في عدم توسع استخدامها في التجهيزات الكهربائية [7].

2-4-4 زيوت الكلوفين أو الاسكاريل:

تتكون زيوت الكلوفين من فحوم هيدروجينية حلقة مكلورة بالصيغة الكيميائية المبينة في الشكل (2-4).



الشكل (2-4) البنية الكيميائية للأحجار الأساسية لجزء زيوت الكلوفين

ونتيجة لتوضع ذرات الكلور غير المتناظر في بنية الجزء فإنه ينشأ لها بنية مستقطبة، مما يتسبب في ارتفاع قيمة ثابت العازلية النسبي لهذه الزيوت، حيث نجد مثلاً أن مكثف له نفس الأبعاد، ويحتوي على مواد عازلة مشربة بزيوت الكلوفين، له سعة أكبر من 45 % مما لو استخدمنا في المكثف مواداً عازلة مشربة بزيوت فحم هيدروجينية نفطية، لكن قيمة ثابت العازلية لزيوت الكلوفين تتغير بشكل كبير لدى تغير درجات الحرارة، وهناك سيئة كبيرة أخرى لزيوت الكلوفين وهو أنه عند حدوث انفراغات كهربائية فيها فإنه نتيجة للتحلل والتفاعلات التي تعقبه ينشأ حمض كلور الماء، الذي يتلف العديد من المواد الموجودة ضمن هذه التجهيزات، كما أن زيوت الكلوفين نفسها لا تعتبر مواد خاملة كيميائياً، كما هو الحال في الزيوت الفحم الهيدروجينية النفطية والزيوت السليكونية مثلاً. ويلاحظ هنا أيضاً وبصورة خاصة أن توتر الخرق للنظم المتجانسة والنظم ضعيفة عدم التجانس يتعلق إلى حد كبير بالشوائب المنحلة كالماء والجزيئات الخيطية.

إن أسعار زيوت الكلوفين عالية بالمقارنة مع زيوت الفحم هيدروجينية النفطية وتبلغ في حدود عشر أضعافها في ألمانيا، Orphon تقريباً، وتأخذ هذه الزيوت أسماء مختلفة في الدول المختلفة، فتسمى زيوت الأورفون والسوفول في الاتحاد السوفييتي والبيرانول في أمريكا [14].

2-5 العوازل الغازية:

2-5-1 خصائص العوازل الغازية

الغاز هو وسط عازل شديد الانضغاط، وعادة ما يكون منخفض التوصيل وثابت العزل أكبر بقليل من الواحد، باستثناء الضغوط العالية. في المجالات الكهربائية العالية، قد يصبح الغاز موصلًا بسبب تأين جزيئات الغاز عن طريق الإلكترونات المتسارعة بواسطة المجال والعمليات الثانوية، والتي تنتج انهيارًا جزئيًا / تفريغًا جزئيًا (PD) أو انهيارًا كاملاً. الظروف التي تؤين جزيئات الغاز، مثل درجات الحرارة المرتفعة جدًا والإشعاع المؤين (الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وأشعة جاما والإلكترونات عالية السرعة والأيونات مثل جسيمات ألفا)، ستنتج أيضًا بعض التوصيل في الغاز. تزداد كثافة الغاز d (جرام لكل لتر) مع الضغط p (تور أو مليمتري من الزئبق) والوزن الجزيئي بالجرام M وتنخفض عكسيًا مع درجة الحرارة المطلقة T (درجة مئوية - 273). إن استخدام الهواء كعزل داخلي عند ضغوط تتراوح بين 10-15 ضغط جوي وما فوق يعقد تصميم الأجهزة ومدخلاتها وأختامها ويقلل من سلامة الصيانة ويجعل التشغيل صعبًا. لذلك، لهذه الأغراض، تُستخدم الغازات ذات القوة الكهربائية المتزايدة في كثير من الأحيان، مما يجعل من الممكن تجنب المشاكل المذكورة أعلاه [15-17]. أهم متطلبات الغازات المستخدمة كعزل كهربائي هي القوة الكهربائية العالية ودرجة حرارة التسييل المنخفضة، الجدول (2-4). يجب أن تكون الغازات أيضًا خاملة كيميائيًا وغير سامة ومقاومة للحريق والانفجار وغير مكلفة ولها موصلية حرارية كافية ومقاومة كيميائية أيضًا عند تعرضها لحقل كهربائي وتفرغ. كما يلي من الجدول 3.4، يلبي SF₆ جميع المتطلبات بشكل كامل، في شكله النقي، يكون خاملاً وغير قابل للاشتعال ومقاومًا للحرارة حتى 800 درجة مئوية وغير سام وعديم الرائحة. تتمتع جزيئات SF₆ بتقارب إلكتروني عالي،

مما يحدد قوتها العازلة العالية وقدرتها الجيدة على إخماد القوس الكهربائي. يتم تطبيقه في المحولات والمفاتيح والمكثفات والكابلات وبعض المعدات الأخرى ذات الجهد العالي. في الهياكل ذات الجهد العالي، يتم استخدام النيتروجين وثاني أكسيد الكربون وسداسي فلوريد الكبريت (SF_6) وخليطه مع النيتروجين بشكل أساسي كعزل غازي داخلي. يتم إعطاء خصائصها الرئيسية في الجدول (2-5). لا يتجاوز النيتروجين وثاني أكسيد الكربون الهواء الجوي في القوة الكهربائية، لكنهما خاملان كيميائيًا وبالتالي، في بيئتهما، يتم استبعاد العمليات التأكسدية للشيخوخة الحرارية للعناصر الهيكلية المصنوعة من المواد الصلبة أو إبطائها بشكل حاد. وهما، مثل SF_6 ، مقاومان للحريق والانفجار.

الجدول (2-4) أهم متطلبات الغازات المستخدمة كعزل كهربائي

Gas	Air	N_2	SF_6	$\text{CCl}_2 \text{F}_2$	CO_2	CCl_4	SeF_6
U_{Br}^G/U_{Br}^A	1.0	1.0	2.3-2.5	2.4-2.6	0.95	6.3	4.5
$T_{\text{сж}}, ^\circ\text{C}$	-192	-195.8	-62	-28	-34.6	76	49.2

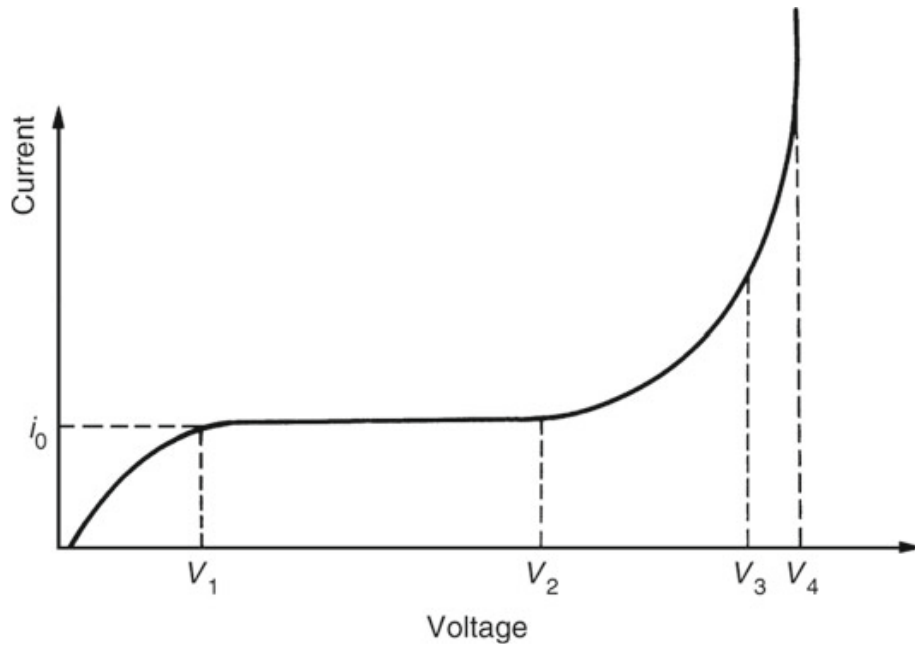
Here U_{Br}^G/U_{Br}^A is—the ratio of the electrical strength of a given gas and air, $T_{\text{liq}}, ^\circ\text{C}$ —the temperature of liquefaction of air and gases

الجدول (2-5) الخصائص الرئيسية لخلائط النيتروجين وثاني أكسيد الكربون وسداسي فلوريد الكبريت كعازل غازي داخلي

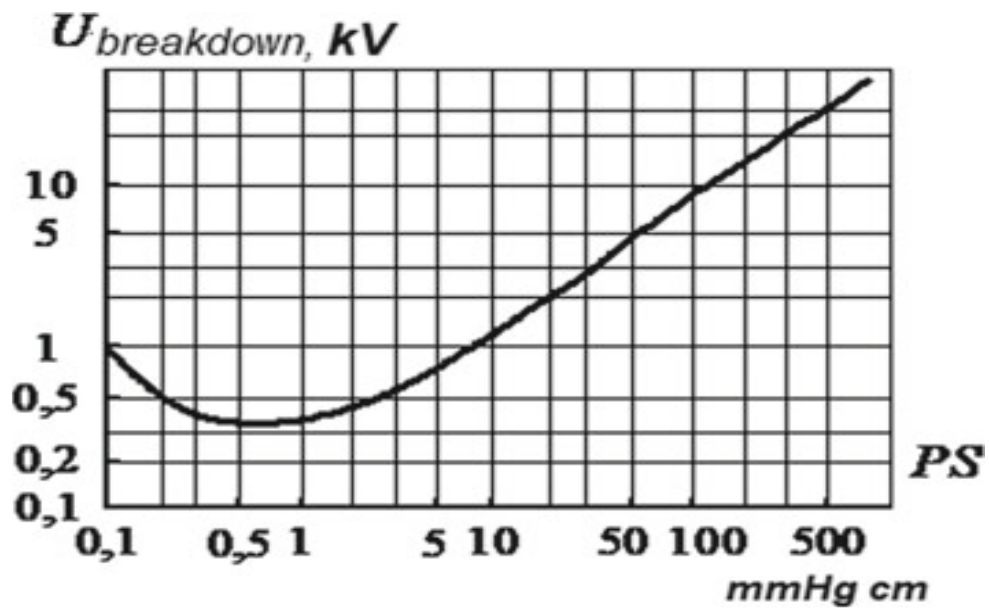
Parameters	Nitrogen	Carbon dioxide	Sulfur hexafluoride
Molecular mass	28.013	44.011	146.05
Gas density, Kg/m^3 , at 0°C and pressure 0.1 MPa	1.25	1.98	6.39
Boiling point, K, at a pressure of 0.1 MPa	77.4	194.7	318.7
Heat capacity of gas at a pressure of 0.1 MPa and 0°C , kJ/kg.K	1.06	0.82	0.625
Thermal conductivity of gas at a pressure of 0.1 MPa and 0°C , W/(m.K)	0.024	0.015	0.0127
Electrical strength of gas (relative to air strength)	1.0	0.9	2.6

2-5-2 انهيار الغازات:

انهيار عازلية الغازات هو نتيجة لتصادم للإلكترونات الحرة التي يسببها المجال المنتظم. من المفترض عمومًا أن بدء الانهيار يتطلب إلكترونًا واحدًا فقط. ومع ذلك، إذا كان هناك عدد قليل فقط من الإلكترونات موجودة قبل الانهيار، فليس من السهل قياس اتجاه التيار الموضح في الشكل (2-5) إذا اكتمل الانهيار بين أقطاب معدنية، فإن الشرارة تتطور بسرعة كبيرة إلى قوس، مما ينطوي على انبعاث وفير للإلكترونات من معدن الكاثود، وإذا سُمح بتدفق التيار الضروري، تبخر المعدن من الأقطاب. في المجالات الكهربائية المنتظمة، يحدث الانهيار عند جهد حرج وهو دالة على حاصل ضرب الضغط p والتباعد d (قانون باشن)، الشكل (2-6). سيكون من الأكثر دقة النظر في حاصل ضرب كثافة الغاز والتباعد، لأن القوة العازلة تتغير مع درجة الحرارة فقط لأن الأخيرة تؤثر على كثافة الغاز. سيلاحظ أن المجال الكهربائي عند الانهيار يتناقص مع زيادة التباعد. هذا أمر طبيعي في جميع الغازات ويرجع ذلك إلى حقيقة مفادها أنه يجب حدوث حد أدنى من تضاعف الإلكترونات قبل حدوث الانهيار. يخلق إلكترون واحد يتسارع بفعل المجال انهيارًا جليديًا ينمو بشكل أسي مثل $x.e^{\alpha x}$ ، حيث x هي المسافة و α هو معامل تأين تاونسند (الإلكترونات المتكونة من الاصطدام لكل سنتيمتر)، والذي يزداد بسرعة مع المجال الكهربائي. عند التباعد الصغير، يجب أن يكون α والمجال أعلى لتحقيق تضاعف كافٍ. في المجالات الكهربائية المتباعدة أو التباعد الكبير، وجد أنه عندما يزداد التكامل إلى حوالي 18.4 (108 إلكترون)، تتطور شحنة فراغية كافية لإنتاج نوع من الانهيار. يبدو أنه من الواضح أن الخطوة الأخيرة في تفكك الغاز قبل تطور القوس هي تطوير تيار خيطي متفرع يتقدم بسهولة أكبر من القطب الموجب نحو القطب السالب.



الشكل (5-2) مميزة الفولت-أمبير



الشكل (6-2) الانهيار الحرج للجهد (منحني باشن)

الفصل الثالث: الاختبارات المعيارية المعتمدة للزيوت العازلة المعدنية

3-1 مقدمة:

ان اختبار عازلية التجهيزات التي سيتم استخدامها للعمل بتوترات عالية هو جزء من اختبارات الجودة التي يتم إجراؤها على نطاق واسع والموصى بها دولياً، وتخضع للمعايير التي وضعتها مؤسسات دولية مثل الجمعية الأمريكية للمواد /ASTM/ واللجنة الكهروتقنية الدولية /IEC/، حيث أكدت التوصيات الصادرة عنهما ضرورة إجراء الفحوص المخبرية لهذا النوع من التجهيزات قبل وضعها في الخدمة للتأكد من قدرتها على تحمل الجهود العالية والارتفاعات المفاجئة بالتوتر عليها، وبين الكثير من الباحثين بهذا المجال (هندسة التوتر العالي) كلما زادت جودة العازل المستخدم في تلك التجهيزات سيؤدي ذلك إلى تحسن أدائها بالعمل وبالتالي ينعكس ذلك إيجاباً على المنظومة الكهربائية بشكل عام. يعد تقييم حالة الزيت العازل أمر ضرورياً للغاية. حيث أنه يعطي مؤشرات عن كل من الحالة العامة للمحول وجودة الزيت المستخدم فيه يتم تحديد خصائص الزيت من قبل الشركة المصنعة أو المستخدم عند استلامه ويكون التقييم بناءً على دراسة خصائصه وتقييمها وفقاً للمعايير العالمية المعتمدة، للتعرف على خصائص الزيت العازل، لا بد من إجراء دراسة تفصيلية عن الزيت العازل المستخدم في التجهيزات قيد العمل، وهناك طلب كبير على مثل هذه الدراسات أو الفحوصات. سنستعرض في هذا الفصل اختبارات الزيت ودلالاتها بشكل مفصل وخصائصها وحدود الاختبار لها.

3-2 اختبارات الزيت ودلالاتها:

يمكن تطبيق عدة اختبارات مهمة وضعتها (ASTM) و (IEC) على زيوت العزل. بعض هذه الاختبارات أكثر قابلية للتطبيق على زيوت جديدة منه على زيوت متقدمة، وبعضها أكثر فائدة في تحليل الزيوت المستهلكة منه للزيوت الموردة في ظروف جديدة، وخاصة أثر التلوث بين الزيوت (السوائل) النفطية وغير النفطية.

3-3 الإختبارات الفيزيائية:

3-3-1 نقطة الأنيلين ASTM D611 - [18]:

تعرف بأنها أقل درجة حرارة يكون فيها المذيب قابل للإمتزاج. تشير نقطة الأنيلين إلى زيت العزل المعدني المذيب القابل لإذابة بعض المواد التي يكون على إتصال معها. ويشير إرتفاع هذه النقطة إلى درجة عطرية أقل وإنخفاض نسبة الإنحلال لبعض مواد المطاط على سبيل المثال.

3-3-2 اللون - ASTM D1500 [19]:

يجب أن يكون لون الزيت فاتح وصافي بالنسبة للعين المجردة، ويسمح ذلك بإمكانية إجراء فحص بصري للأجهزة المجهزة بداخل خزان التجهيزات. إن حدوث أي تغير في لون الزيت مع مرور الزمن هو مؤشر على تدهور أو تلوث هذا الزيت.

3-3-3 نقاط الوميض وإحتراق الزيت - ASTM D92 [20]:

نقطة الوميض للزيت وهي درجة الحرارة التي يجب أن تسخن لها المادة (عند ظروف إختبار محددة) لتعطي كمية بخار كافية، بحيث تصبح مع الهواء مزيج قابل للإشتعال، أما نقطة الإحتراق فهي درجة الحرارة التي تؤمن بخار زيت كافى بحيث يشتعل ويستمر بذلك لمدة 5 ثواني (عند نفس الشروط)، تشير نقطة الوميض المنخفضة إلى وجود ملوثات طيارة قابلة للإشتعال مع زيت العزل.

3-3-4 الإجهاد السطحي أو البيني ASTM D971، ASTM D2285 [22-22] :

تغطي هذه الطريقة قياسات عند ظروف عدم توازن للإجهاد السطحي، والذي يحافظ عليه عازل سائل ضد الماء. الإجهاد السطحي أو البيني هو قياس قوى تجاذب بين جزيئات سائلين ويعبر عنه ب(mN/m). ويعد الإختبار وسيلة ممتازة لكشف قطبية الملوثات المنحلة بالزيت ونواتج الأكسدة في زيوت العزل.

3-3-5 نقطة الإنسكاب ASTM D97 [23]:

وهي درجة الحرارة التي يتوقف فيها الزيت عن التدفق عند شروط الإختبار المحددة. لهذه النقطة أهمية بسيطة عند إختبار التلوث أو تدهور حالة الزيت، وقد تكون مفيدة في مطابقة الزيت وتحديد إذا كان مناسباً عند ظروف مناخية معينة.

3-3-6 الكثافة النسبية (الوزن النوعي) ASTM D1298 [24]:

إن الكثافة النسبية للزيت هي أوزان من حجوم متساوية من الزيت والماء، تختبر عند درجة حرارة C° 15. وتعتبر الكثافة النسبية هامة في تحديد فيما إذا كان الزيت مناسباً لإستخدامات محددة في الظروف الجوية الباردة، حيث من الممكن أن يتشكل الجليد في التجهيزات المعرضة لدرجات حرارة تحت درجة التجمد عند الأخذ بعين الإعتبار الخصائص الأخرى للزيت يمكن أن تكون الرطوبة النسبية مؤشراً عن جودة الزيت.

3-3-7 اللزوجة ASTM D2161، ASTM D88, ASTM D445 [25-26]:

تقاس لزوجة الزيت العازل بالزمن اللازم ليتدفق حجم معروف من الزيت ضمن أنبوب معايرة، لا تتأثر اللزوجة بشكل كبير بملوثات الزيت أو وضعه المتدهور، ومن الممكن أن تكون مفيدة في تحديد أنواع معينة من زيوت العزل المتقدمة. تمتلك اللزوجة تأثيراً هاماً على خصائص الانتقال الحراري للزيت بحيث تخفض اللزوجة العالية من فعالية تبريد الزيت كما تؤثر اللزوجة العالية أيضاً على الأجزاء المتحركة في التجهيزات الكهربائية مثل القواطع الآلية والقواطع ومبدل الوضعيات في المحول والمفاعلات والمنظمات. تعد اللزوجة عاملاً هاماً في تحديد ظروف عملية تجهيز الزيت ووقت تشريب السيليلوز.

3-3-8 الفحص البصري - ASTM D1524 [27]:

يشير إختبار الفحص البصري إلى لون ودرجة تعكر الزيت، والتي يتشير بدورها إلى وجود جزيئات الماء الحرة أو جزيئات صلبة ملوثة. يمكن تحديد مصدر الملوثات الصلبة غير المنحلة عن طريق ترشيح هذه

الجزئيات وفحصها يمكن إستخدام هذا الإختبار أيضا لإقتراح الحاجة إلى إختبارات مخبرية إضافية، كما يمكن أن يسمح بتحديد إذا كان لابد من إرسال العينة إلى مخبر مركزي لإجراء تقييم كامل.

3-4 الإختبارات الكهربائية:

3-4-1 توتر إنهييار العازلية ASTM D877، ASTM D1816 [28-29]:

يقاس توتر إنهييار العازلية، والذي يعبر عن مدى قدرة الزيت على تحمل إجهادات التوتر بدون حدوث خرق. وتوتر الانهييار هو التوتر الذي يحدث عنده الإنهييار بين قطبي التوتر عند ظروف إختبار محددة. يفيد هذا الإختبار بشكل مبدئي بالإشارة إلى وجود ملوثات ناقلة كهربائيا ضمن الزيت مثل الماء والأوساخ والخيوط السيلولوزية الرطبة أو جزئيات ناقلة. لا يشير توتر الإنهييار العالي إلى غياب الملوثات. تبين المواصفة (ASTM D877)وصفاً للأقطاب وهي عبارة عن أقراص مسطحة ناعمة ولا تمثل الأقطاب الموجودة بالمحول. وعلى الرغم من أن الأقطاب الدائرة المبينة بالمواصفة (ASTM D1816)، لا تطابق خصائص الأقطاب المعزولة في المحول إنما هي أقرب إلى تطبيقات المحول. ومع ذلك فإن الأقطاب الموضحة بالمواصفة السابقة أكثر استجابة للجسيمات والمواد المنحلة بالزيت، والأقطاب السابقة ضارة للمتانة الكهربائية للمحول بناء على ذلك، تزود نتائج الاختبار وفق المواصفة السابقة بتقييم أفضل لتلك التغيرات الممكن حدوثها على الزيت بسبب المحول.

يوجد طريقتان لقياس توتر الانهييار لزيوت العزل وهما:

توصي المواصفة (ASTM D877) [28] بإجراء اختبار قبول روتيني للزيت غير المعالج المأخوذ من المورد والمستخدم في القواطع الآلية. تستخدم طريقة الإختبار أقطاب أسطوانية مسطحة الوجه المسافة بينهما 2.5mm تتناقص حساسية أي عندما تصبح قيمته الفعالة أكبر من (25 kVr.m.s.).

توصي المواصفة (ASTM D1816) [29] بالنسبة لإختبارات السوائل والتي تمت معالجتها لإستخدامها في المحول أو الواردة في المحولات أو مبدلات الوضعيات.

3-4-2 توتر الإنهيار النبضي ASTM D3300 [30] :

يجرى الإختبار وفق هذه الطريقة على الأغلب بإستخدام توتر نبضي سالب للقطب المؤرض (NBS). إن توتر الانهيار النبضي السالب المقاس للعينات لزيت غير مستخدمة جديدة يكون متغير ضمن مجالات متباينة بشكل كبير في هذه الحالة وهو معتمد على تركيب الزيت. و الذي يتناقص مع زيادة تركيز المواد العطرية وخاصة الجزيئات الهيدروكربونية متعددة الأقطاب. يمكن إستخدام هذه الطريقة لتقييم إستمرارية تركيب الزيت من شحنة إلى شحنة (عمليات النقل)، يمكن أن يكون توتر الانهيار النبضي السالب أصغر بسبب التماس مع المواد أو بسبب التقادم أو شوائب أخرى، قد تشير نتائج الإختبار الأقل من القيم المتوقعة لزيت نقي على أنه ملوث أو مستخدم بالرغم من أنه قطبية التوتر لها تأثير بسيط أو معدوم على توتر الإنهيار في الحقول المتجانسة، أما بالنسبة للحقول الغير المتجانسة فتؤثر الشوائب بشكل كبير على توتر الإنهيار، بالنسبة للزيت تختلف تأثيرات التوترات العابرة ضمن مجال كبير بالنسبة لزمن الوصول للقيمة العظمى وكذلك بالنسبة لزمن نصف الظهر (زمن جبهى، زمن نصف الظهر) عن توتر الاختبار النبضي البرقي الوارد بالمواصفة (IEEE Std C57.12.90TM-1999 له الأزمنة $1.2/50 \mu s$) بقطبية سالبة.

3-4-3 عامل الفقد (عامل القدرة) ASTM D924 [31] :

إن عامل الفقد هو قياس ضياعات الطاقة في المواد العازلة السائلة الخاضعة لحقول كهربائية متناوبة AC، إن ضياعات الطاقة تكون حرارية ضمن السائل. يعني عامل الفقد المنخفض أن السائل سوف يسبب ضياعات قدرة صغيرة، يستخدم هذا الإختبار للتأكد من فحص حالة تدهور الزيت أو إحتوائه على ملوثات بسبب حساسيته إلى الملوثات المتأينة.

3-4-4 إنحلال الغاز في زيوت العزل المعرضة لإجهادات كهربائية وعمليات التأين ASTM D2300

: [32]

يقيس هذا الاختبار فيما إذا كانت زيوت العزل ماصة للغازات أو قابلية انحلال الغازات فيها عندما تكون خاضعة للتوتر الكهربائي، بالنسبة لبعض التطبيقات الخاصة، عندما تتعرض زيوت العزل لإجهادات التوتر العالي يحدث فيها تدرج. من المرغوب فيه معرفة نسبة إمتصاص أو انحلال الغاز من قبل الزيت. إن إمتصاص أو نشوء الغاز في السوائل العازلة المعرضة لإجهادات كهربائية تابع للخصائص العطرية لجزيئات السائل، بالنسبة لخصائص السوائل العطرية بشكل فعال فإنها قادرة على امتصاص الغاز عندما تتعرض للإجهاد الكهربائي. أما بالنسبة للسوائل غير العطرية فسوف ينشأ فيها غاز الهيدروجين عند تطبيق التوتر الكهربائي عليها. ومع ذلك إن إرتباط نتائج هذه الاختبارات مع أداء التجهيزات محدوداً، قد تختلف النتائج العددية التي يتم الحصول عليها من مخبر لآخر عند استخدام إجرائين مختلفين من ناحية المطال، ويجب الأخذ بعين الاعتبار أن نتائج هذه الطريقة ذات طبيعة نوعية.

3-5 الاختبارات الكيميائية:

3-5-1 محتوى الغاز ASTM D2945، ASTM D3284، ASTM D3612 [35-34-33]:

يعرف محتوى الغاز للمواد العازلة السائلة بأنه حجم الغاز المنحل لكل 100 ملغ من الزيت، عند درجة حرارة وضغط نظاميين. تتطلب بعض أنواع التجهيزات الكهربائية استخدام سوائل عازلة ذات محتوى غازي صغير أو منخفض. عند ملء التجهيزات بالزيت العازل، يخفف المحتوى الغازي المنخفض من الرغبة ويخفف من الأوكسجين المتاح، وعليه يزداد العمر الزمني للزيت العازل. يمكن استخدام كمية ونوع محدد من الغاز المنحل في الزيت العازل كأداة مساعدة للكشف وتشخيص الأعطال وظروف التشغيل غير الطبيعية في التجهيزات. ليس الهدف من هذا الاختبار استخدامه في مواصفات الشراء، لأن الزيت يتم استخلاص الغاز منه قبل استخدامه مباشرة. يمكن استخدام هذا الاختبار كاختبار مراقبة في المصنع وهو أكثر فائدة في تقييم سلامة تجهيزات المحولة. إن إرتفاع حرارة الزيت أو حدوث أقواس كهربائية داخل المحول سوف يولد مواد غازية قابلة للإحتراق وتتحل ضمن الزيت، من أجل تحليل الغاز المنحل بالزيت يمكن الإطلاع على المواصفة IEEE Std C57.104 لمزيد من التوصيات.

3-5-2 المركبات ثنائية الفلور متعددة الكلور ASTM D4059 [36]:

تتطلب ASTM D4059 أن يتم معاملة التجهيزات الكهربائية والسوائل العازلة الحاوية على هذه المركبات (PCBs) للتخلص منها خلال استخدام إجراءات محددة. يتحدد الإجراء المراد استخدامه لجهاز معين أو كمية سائل عازل معينة وفقاً لكمية المركبات المحتواة فيه، تفيد نتائج التحليل في إختيار إجراءات المعاملة والتخلص المناسبة.

3-5-3 الكبريت المسبب للتآكل ASTM D1275 [37] :

تم تصميم هذا الاختبار لكشف وجود الكبريت الحر أو مركباته المسببة للتآكل جنباً إلى جنب عن طريق تأثير السائل على شرائح نحاسية مصقولة ضمن شروط معينة. يشير هذا الاختبار لإمكانية حدوث التآكل داخل التجهيزات الكهربائية الناتج عن وجود مركبات حاوية على الكبريت. يكون مصدر وجود الكبريت في زيت العزل هو النفط الخام الذي تم تكريره. وقد يأتي الكبريت من الأنابيب المطاطية المستخدمة في معالجة الزيت أو مواد الحشو البديلة.

3-5-4 رقم التكافؤ أو الحموضة ASTM D974, ASTM D664 [38-39] :

إن رقم التكافؤ أو الحموضة للمواد العازلة الكهربائية هو قياس مركبات الحمضية في هذه المادة. بالنسبة للزيت الجديد من المحتمل وجود حمض متبقي ناتج عن عملية التكرير بالنسبة للسوائل المتقدمة، يقاس رقم التكافؤ من المنتجات الحمضية الناتجة عن عمليات الأكسدة في الزيت. ويمكن استخدام رقم التكافؤ كدليل عام لتحديد متى ينبغي معالجة الزيت أو إستبداله وفقاً للمواصفة (ASTM D974). توجد طريقة تؤثر لتغيير لون الزيت التقليدي لمعايرة الأحماض بمحلول خفيف KOH (0.1N). تعطي المواصفة ASTM D664 طريقة المعايرة. وهي تقنية معايرة مشابهة للمعايرة المباشرة لردة فعل الأكسدة، ووسيلة مفيدة لتحديد خصائص الحموضة. في بعض السوائل المتقدمة وقد يكون اللون معتماً ويضعف من مقدرة الفني على تحديد تغيرات

مؤشر اللون كما في المواصفة ASTM D974، لذلك تستبدل بالمواصفة ASTM D664، ولكن لم يثبت حتى الآن وجود ترابط أو علاقة بين الطريقتين.

3-5-5 الماء والمركبات العضوية الحلقية في الزيوت العازلة ASTM D5837 [40]:

قد يتواجد الماء في الزيوت العازلة بعدة أشكال، ممكن كشف وجود الماء بشكل حر عن طريق تكون كمية كبيرة من خلال الفحص البصري، حيث يظهر الزيت بشكل غير واضح، وقد يكون الماء على شكل قطرات منفصلة، أو قد يلاحظ على السطح السفلي. يمكن معالجة وجود الماء عن طريق الترشيح أو بوسائل أخرى. لا يمكن كشف الماء المنحل عن طريق الفحص البصري، ولن يتم تحديده بوسائل فيزيائية أو كيميائية. قد يؤثر هذا الماء المنحل على متانة زيت العزل وعلى أية حال، يكفي تحديده بعدة عوامل بما فيها نسبة تشبع الرطوبة وكمية ونوع الملوثات، إن هذه الطريقة مناسبة لتحديد الماء بالزيت العازل، وتعتمد على ظروف التعامل مع العينة وطرائق تحليل أخرى.

كما يمكن استخدامها لتقدير الماء الكلي وأيضاً المنحل بزيت العزل. إن وحدة قياس الماء هي mg/kg، يحتوي الزيت الجديد المستقبل من المصنعين عادة على نسبة رطوبة أقل من 25 mg/kg، يجب أن تختبر هذه الزيوت لمحتوى الرطوبة، إذا كان ضرورياً سوف تتخذ تدابير قياس لتجنب محتوى الرطوبة في التجهيزات المعزولة بالزيت. أما المواد العضوية الحلقية فانها تنتج عادة عن تحلل المواد السيلولوزية المستخدمة في أنظمة العزل الصلبة للتجهيزات الكهربائية، وهذه المركبات قابلة للإنحلال في الزيت لدرجة ملحوظة وسوف تنتقل إلى المادة العازلة السائلة. إن وجود هذه المواد بتركيز عالي هي مؤشر كافي على تدهور حالة السيلولوز بسبب التقادم أو بسبب الظروف أخطاء أولية. قد يستخدم اختبار هذه المركبات بواسطة الأداء اللوني عالي أما المواد العضوية الحلقية فانها تنتج عادة عن تحلل المواد السيلولوزية المستخدمة في أنظمة العزل الصلبة للتجهيزات الكهربائية، وهذه المركبات قابلة للإنحلال في الزيت لدرجة ملحوظة وسوف تنتقل إلى المادة العازلة السائلة. إن وجود هذه المواد بتركيز عالي هي مؤشر كافي على تدهور حالة السيلولوز بسبب التقادم أو بسبب الظروف أخطاء أولية. قد

يستخدم اختبار هذه المركبات بواسطة الأداء اللوني عالي الأداء (HPLC) لتحديد كمية الغاز المنحل في الزيت الذي تم تحليله بما يتوافق مع طريقة الإختبار وفق المواصفة ASTM D3612 .

الفصل الرابع: التقنيات الحديثة لتقييم حالة الزيوت العازلة المعدنية

4-1 مقدمة:

شهدت السنوات الأخيرة تطورًا ملحوظًا في التقنيات والطرائق المستخدمة لتقييم حالة الزيوت العازلة المعدنية، نتيجة للتقدم السريع في مجالات التكنولوجيا، وازدياد الحاجة إلى تحسين موثوقية وكفاءة أنظمة الطاقة الكهربائية. ففي الوقت الذي كانت تعتمد فيه الطرق التقليدية على مجموعة من التحاليل الفيزيائية والكيميائية الأساسية، مثل قياس اللزوجة، درجة الحموضة، محتوى الرطوبة، وتوتر الانهيار، فإن تلك الأساليب على الرغم من أهميتها لم تكن كافية للكشف المبكر عن حالات التدهور المعقدة أو التطورات المفاجئة التي قد تطرأ على نظام العزل داخل المحولات والمعدات الكهربائية الأخرى.

في هذا السياق، ظهرت مجموعة من التقنيات الحديثة والمتقدمة التي تمثل نقلة نوعية في مجال تقييم الزيوت العازلة. من أبرز هذه التقنيات:

تحليل الغازات المذابة (Dissolved Gas Analysis - DGA)، الذي يُعد من أكثر الأدوات فعالية في الكشف عن الأعطال الداخلية، حيث تُعد تراكيز الغازات الناتجة عن التفاعلات الحرارية والكهربائية داخل الزيت مؤشرًا حساسًا لحالة العزل.

التحليل الطيفي، مثل التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FT-IR) أو التحليل الطيفي للكتلة (MS)، والذي يُستخدم لتحديد المركبات الكيميائية الناتجة عن تدهور الزيت أو الورق العازل، مما يساعد في تقييم درجة التقدم في التدهور.

تقنيات الاستشعار الذكي، التي تُمكن من القياس اللحظي والمستمر لمجموعة من الخصائص الهامة مثل درجة الحرارة، الرطوبة، والناقلية، والتي يمكن أن تؤثر بشكل مباشر على أداء الزيت ونظام العزل بالكامل.

إن الهدف الأساسي من هذا الفصل هو تقديم استعراض شامل وممنهج لأبرز هذه التقنيات الحديثة، مع التركيز على المبادئ النظرية التي تستند إليها، وآليات عملها، والمزايا التي تقدمها مقارنة بالطرق التقليدية، إلى جانب مناقشة القيود والتحديات المرتبطة بتطبيقها في البيئات الصناعية الحقيقية. كما يتناول الفصل دور هذه التقنيات في تحسين برامج الصيانة الوقائية والتنبؤية، من خلال تعزيز القدرة على الاكتشاف المبكر للأعطال، وتقديم حلول استباقية تساهم في إطالة العمر التشغيلي للمعدات وتقليل تكاليف الصيانة غير المخططة. وعليه فإن هذا الفصل يُعد لفهم أعمق لتكامل هذه التقنيات مع منظومات المراقبة الذكية الحديثة، ويضع الأساس لمناقشة الاتجاهات المستقبلية في تقييم نظام العزل ودمج التحليلات الذكية في بيئة التشغيل الفعلية لمعدات الطاقة الكهربائية.

4-2 تقنية تحليل الغازات الذائبة (Dissolved Gasses Analysis):

عندما تتعرض معدات الطاقة الكهربائية التي تستخدم السوائل العازلة (الزيوت العازلة) كمادة عزل رئيسية لإجهادات حرارية وكهربائية، تنطلق الغازات الناتجة عن تحلل الزيوت العازلة. عندما يحدث القصر، يزداد إنتاج هذه الغازات وتتجمع في حاكمة بوخولز. أما عندما يكون العطل بسيطاً ويكون تركيز الغاز منخفضاً، فيكون لديها وقت كافٍ للذوبان في زيت المحول. لذلك، يصعب التنبؤ بحالة تجهيزات الطاقة الكهربائية من خلال مراقبة حماية بوخولز فقط. لذلك من المهم إجراء تحليل دوري لكميات الغازات المختلفة المذابة في زيت المحول أثناء التشغيل. باستخدام تحليل الغازات المذابة في زيت المحول، يمكن معرفة الحالة الفعلية للمحول. يُنصح بإجراء اختبار DGA لزيت المحول بشكل دوري للحصول على معلومات مبكرة حول اتجاه تدهور حالة المحول وعمره الافتراضي. في الواقع، في اختبار DGA، تُستخرج الغازات المذابة في الزيت ويُفحص كمياتها بكمية محددة [41]. من خلال ملاحظة كميات الغازات المختلفة المذابة في زيت المحول، يمكننا معرفة حالة المحول. بشكل عام، الغازات الموجودة في زيت المحول هي الهيدروجين (H_2)، والميثان (CH_4)، والإيثان (C_2H_6)، والإيثيلين (C_2H_4)، والأسيتيلين (C_2H_2)، وأول أكسيد الكربون (CO)، وثاني أكسيد الكربون (CO_2)، والنيتروجين (N_2)، والأكسجين (O_2) [42].

هناك طريقتان رئيسيتان مستخدمتان لتحديد تركيبة هذه الغازات في زيت المحولات هما استخدام مستخرج الغاز الفراغي وكروموتوغراف الغاز. باستخدام هذه الأجهزة، يتم استخراج الغازات أولاً من الزيت عن طريق تحريكه تحت الفراغ. ثم يتم تغذية هذه الغازات في كروموتوغراف الغاز لقياس كمية كل غاز ناتج. بشكل عام، وجد أن الهيدروجين والميثان يتم إنتاجهما بكميات كبيرة إذا ارتفعت درجة الحرارة الداخلية لمحول الطاقة من 150 درجة مئوية إلى 300 درجة مئوية بسبب الضغوط الحرارية غير الطبيعية. إذا تجاوزت درجة الحرارة 300 درجة مئوية، يُنتج الإيثيلين (C_2H_4) بكميات كبيرة. عند درجات حرارة أعلى من 700 درجة مئوية، تُنتج كميات كبيرة من الهيدروجين (H_2) والإيثيلين (C_2H_4). يشير وجود الإيثيلين (C_2H_4) إلى وجود بقعة ساخنة عالية الحرارة داخل المحول. في حال وجود أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون بكميات كبيرة في اختبار DGA، يُتوقع تحليل العازل السليم. يوضح الجدول (1-4) الغازات الناتجة حسب نوع العطل، كما يوضح الجدول (1-5) تصنيف الاعطال الشائعة وفقاً للمعيار IEC60599 والمعيار IEEE StdC57.104 [43]

الجدول (1-4) الغازات الناتجة حسب نوع العطل

Key gas	Fault type	Typical proportions
C_2H_4	Overheating, oil	Mainly C_2H_4 ; Smaller proportions of C_2H_6 , CH_4 , and H_2 ; Traces of C_2H_2 at very high fault temperature
CO	Overheating, paper and oil	Mainly CO; much smaller quantities of hydrocarbon gases (predominantly C_2H_4 with smaller proportions of C_2H_6 , CH_4 , and H_2)
H_2	Partial discharge	Mainly H_2 ; small quantities of CH_4 ; Traces of C_2H_4 and C_2H_6
H_2 & C_2H_2	Arcing	Mainly H_2 and C_2H_2 ; minor traces of CH_4 , C_2H_4 , and C_2H_6 ; also, CO if cellulose is involved

الجدول (2-4) تصنيف الاعطال وفقا للمعيار IEC60599 والمعيار IEEE StdC57.104

Acronyms	Faults
PD	Partial discharge
D ₁	Low-energy discharge
D ₂	High-energy discharge
T ₁	Thermal fault, $T < 300^{\circ}\text{C}$
T ₂	Thermal fault, $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$
T ₃	Thermal fault, $T > 700^{\circ}\text{C}$

3-4 كروماتوغرافيا الغاز/قياس الطيف الكتلي (GC-MS)

Combined Gas Chromatograph-Mass Spectrometry

كروماتوغرافيا الغاز/مطياف الكتلة (GC-MS) هي تقنية آلية، تتكون من كروماتوغرافيا غاز (GC) متصلة بمطياف كتلة (MS)، حيث يمكن فصل محاليل معقدة من المواد الكيميائية وتحديد كميتها. يتطلب تحليل كروماتوغرافيا الغاز/مطياف الكتلة محللين مدربين تدريباً عالياً ومعدات باهظة الثمن [44]. هذا يجعلها مثالية لتحليل مئات المركبات ذات الوزن الجزيئي المنخفض نسبياً الموجودة في المواد البيئية. يعمل كروماتوغرافيا الغاز على مبدأ أن الخليط سينفصل إلى مواد فردية عند تسخينه. تُحمل الغازات المسخنة عبر عمود يحتوي على غاز خامل (مثل الهيليوم). عندما تخرج المواد المنفصلة من فتحة العمود، تتدفق إلى مطياف الكتلة. يحدد مطياف الكتلة المركبات من خلال كتلة الجزيء المحلل. تُخزن مكتبة من أطياف الكتلة المعروفة، تغطي عدة آلاف من المركبات، على جهاز كمبيوتر. لكل مركب طيف كتلة فريد أو شبه فريد يمكن مقارنته بقاعدة بيانات أطياف الكتلة وبالتالي تحديده [45.46].

4-4 تقنية التحليل بمطيافية الأشعة تحت الحمراء:

Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy

يُعدّ مطياف تحويل فورييه بالأشعة تحت الحمراء (FT-IR) أداة فعالة للغاية لمراقبة حالة زيوت التشحيم، إذ يُمكنه تحديد تركيبة المُركَّب والعينة. ولأنّ لكل نوع رابطة بصمة رقم موجي فريدة، يُمكن تحديدها بسهولة. يُمكن استخدام هذه الحساسية لمكونات الزيت لتتبع جميع نواتج التقادم تقريباً. يختلف هذا المفهوم عن

تقنيات مطياف الأشعة فوق البنفسجية المرئية. يشير مطياف الأشعة فوق البنفسجية المرئية أو مطياف الأشعة فوق البنفسجية/المرئية أو مطياف الأشعة فوق البنفسجية المرئية إلى مطياف الامتصاص أو مطياف الانعكاس في المنطقة الطيفية فوق البنفسجية المرئية. يقوم هذا المبدأ على استخدام الضوء في النطاقين المرئي والمجاور (الأشعة فوق البنفسجية القريبة والأشعة تحت الحمراء القريبة). يؤثر الامتصاص أو الانعكاس في النطاق المرئي بشكل مباشر على اللون المُدرَك للمادة الكيميائية قيد الدراسة. يستخدم مطياف الأشعة تحت الحمراء شريطاً متوهجاً مُسخَّناً كهربائياً كمصدر للأشعة تحت الحمراء؛ ويُمَرَّر هذا الإشعاع عبر العينة إلى الكاشف. تمتص المكونات الكيميائية للعينة بعضاً من الأشعة تحت الحمراء عند أرقام موجية قابلة للتكرار ومحددة. تستخدم تقنية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR) ما يُسمى مقياس تداخل ميكلسون. يستخدم هذا الجهاز مرآة متحركة، تُرصد سرعتها بواسطة ليزر، والذي يعمل أيضاً كمرجع للطول الموجي. يقيس الكاشف بعد ذلك مجموع جميع الترددات بمرور الوقت، مما ينتج عنه نمط تداخل يعتمد على الزمن يُسمى مخطط التداخل. تُستخدم بعد ذلك خوارزمية حاسوبية تُسمى تحويل فورييه السريع لتحويل هذه الإشارة إلى طيف امتصاص أو انتقال.

يُحدد تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR) المواد غير المعروفة؛ ويحدد جودة أو قوام العينة وكمية المكونات في الخليط. يتكون زيت العزل المستخدم في محولات الطاقة من هيدروكربونات مشبعة مثل البارافين والنفثين، ولا يمكنه توصيل التيار الكهربائي ولا الماء المذاب. تعتمد موصلية الزيت على نوعه، وتزداد مع مرور الوقت. تُمكن الملوثات، مثل بقايا المصافي والتلوث، وخاصةً نواتج التقادم/الأكسدة، الزيت من توصيل التيار الأيوني. تنقسم نواتج أكسدة/تحلل الزيت إلى نواتج قابلة للذوبان (مذابة) وغير قابلة للذوبان (معلقة) [47].

تعتمد فائدة تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR) في تحديد الأكسدة على نوع الزيت الأساسي المستخدم في تركيب السائل. غالباً ما تحتوي السوائل الاصطناعية على مركبات إستيرية ذات ذروة ملحوظة في منطقة أطواف الأشعة تحت الحمراء حيث يُقاس مستوى أكسدة الزيوت المعدنية. لهذا السبب، من المهم عدم استخدام نتائج تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء وحدها للتشخيص، بل دراسة اتجاه هذه النتائج وعرضها بالتزامن مع معايير أخرى متعلقة بالزيت مثل اللزوجة [48]. في الآونة الأخيرة، طور بعض الباحثين أجهزة

كشف تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء تسمح باكتشاف معظم الغازات ذات الأهمية وتحديد كمياتها. هذه الطرق قادرة على توفير فهم أفضل لتبعيات الحمل ودرجة الحرارة والوقت للغازات المتولدة [49]. يُفضل استخدام مطيافية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء على طرق التشتت أو الترشيح لتحليل أطياف الأشعة تحت الحمراء لعدة أسباب:

- إنها تقنية غير مدمرة.
 - توفر طريقة قياس دقيقة لا تتطلب معايرة خارجية.
 - يمكنها زيادة السرعة، وجمع مسح كل ثانية.
 - يمكن أن يزيد من الحساسية - يمكن جمع عمليات المسح التي تستغرق ثانية واحدة معًا لتوزيع الضوضاء العشوائية؛
 - يتميز بإنتاجية بصرية أكبر.
 - وبسيط ميكانيكيًا مع جزء متحرك واحد فقط.
- مؤخرًا، تم اقتراح بديل لتحديد محتوى الرطوبة في عينات الزيوت العازلة المعدنية القديمة وغير القديمة باستخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء لتحويل فورييه (FTIR) [50].

4-5 تقنية مطيافية الأشعة فوق البنفسجية/المرئية UV/Visible Spectroscopy

مطيافية الأشعة فوق البنفسجية/المرئية هي تقنية تُمكن بسهولة من تحديد تراكيز المواد أو إجراء تحليل كمي لجميع الجزيئات التي تمتص الأشعة فوق البنفسجية والإشعاع الكهرومغناطيسي المرئي [51]. يمكن استخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية/المرئية لقياس امتصاص العينة للأشعة فوق البنفسجية أو المرئية، إما عند طول موجي واحد أو بإجراء مسح على نطاق من الطيف. يتراوح نطاق الأشعة فوق البنفسجية بين ١٩٠ و ٤٠٠ نانومتر، بينما يتراوح نطاق الأشعة المرئية بين ٤٠٠ و ٨٠٠ نانومتر. يوفر مصدر الضوء (مزيغ من مصابيح التنغستن/الهالوجين والديوتيريوم) الأشعة المرئية وشبه فوق البنفسجية التي تغطي نطاق ٢٠٠-٨٠٠ نانومتر. بالنسبة للسوائل، تُحفظ العينة في وعاء شفاف مسطح بصريًا يُسمى خلية أو كوفيت. تحتوي الخلية المرجعية أو الكوفيت على المذيب الذي تُذاب فيه العينة، ويُشار إليه عادةً باسم العينة الفارغة. يمكن استخدام هذه التقنية كمياً ونوعياً.

ان أبرز الاتجاهات المستقبلية في هذا المجال هو تطوير نماذج تنبؤية ذكية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة، والتي تتيح تحليل كميات ضخمة من البيانات المجمعة من المستشعرات المثبتة داخل المحولات ومعدات التوتر العالي. هذه النماذج قادرة على التعرف على الأنماط غير الطبيعية في خصائص الزيت مثل تركيز الغازات الذائبة، التوصيلية، فقد العزلي، ونواتج التدهور الكيميائي، ومن ثم التنبؤ بحالة العزل وتحديد المخاطر المحتملة قبل وقوع الأعطال.

4-6 تقنية تحديد رطوبة الزيت : Moisture in Oil Determination

من المعروف أن وجود الرطوبة في العازل الصلب والسائل يلعب دورًا هامًا في عمر المحول [52.53]. تتولد الرطوبة في المحول من عدة مصادر [54]: الرطوبة المتبقية في العازل أثناء التصنيع، والهواء الرطب من الخارج أثناء النقل و/أو التجميع في محطة فرعية، والهواء الرطب من الخارج عبر جهاز تنفس (غير المحكم)، ودخول الرطوبة من خلال الحشوة، والتحلل الكيميائي للسليولوز، وامتصاص الرطوبة من الخارج أثناء بعض عمليات الصيانة مثل التحكم في الموقع في استبدال الجزء الفعال، وتعبئة مستوى الزيت المصنوع من زيت رطب (غير مجفف). تُعد تقنية معايرة كارل فيشر طريقة دقيقة لقياس كمية صغيرة جدًا من الرطوبة في الزيت. يمكن أن تشير هذه التقنية إلى محتوى رطوبة منخفض يصل إلى 1-2 جزء في المليون [55.56]. عندما تصبح الزيوت شديدة التأكسد مع زيادة كميات نواتج الشيخوخة القطبية، تزداد أيضًا خصائص ذوبانها في الماء. عند درجات الحرارة المرتفعة، قد تنتقل بعض كمية المركبات المائية إلى الماء المذاب. لا يُمكن الكشف عن الماء المرتبط بمعايرة كارل فيشر (KF). لذا، يُمكن لطريقة KF المبالغة في تقدير محتوى الماء، نظرًا لتفاعل اليود مع البيروكسيدات والأحماض والشوائب الأخرى التي قد تكون موجودة نتيجة لتحلل الزيت [57.58]. لذا، فإن معايرة KF ليست دقيقة جدًا للزيوت القديمة حيث تتراكم الملوثات النشطة القادرة على تكوين هيدرات مع الماء المرتبط [59].

الفصل الخامس: عمليات التشعيع

5-1 مقدمة:

يُعرف التشعيع بأنه (Irradiation) عملية تعريض المادة لمصادر طاقة عالية تُحدث تغيرات في بنيتها الذرية أو الجزيئية، مما يُكسبها خصائص جديدة. تُشكل هذه التقنية حجر الزاوية في تطبيقات علمية وصناعية متعددة، بدءاً من الطب النووي وحتى هندسة المواد. تعتمد آلية التشعيع على تفاعل الأشعة المؤينة (Ionizing Radiation) مع المادة، حيث تنقل طاقة كافية لإزالة الإلكترونات من الذرات أو الجزيئات، مُولدةً أيونات وجذوراً حرة تُحفز التفاعلات الكيميائية والفيزيائية.

تكمُن أهمية هذا الفصل في كونه يُقدِّم إطاراً نظرياً لأنواع الأشعة واستخداماتها في المجالات المختلفة.

5-2 تعريف الإشعاع:

يتم تعريف الإشعاع بشكل أساسي على أنه انبعاث أو نقل الطاقة في شكل موجات أو جسيمات عبر الفضاء أو وسط مادي. الإشعاع الكهرومغناطيسي يتكون من موجات الراديو والميكروويف والأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وإشعاع جاما (γ)، ويوجد إشعاع الجسيمات على شكل إشعاع ألفا (α) وإشعاع بيتا (β) وإشعاع البروتون وإشعاع النيوترون [60].

غالبًا ما يُعتبر الإشعاع مؤيّنًا أو غير مؤيّن اعتمادًا على طاقة الجسيمات المشعة. يصدر الإشعاع المؤيّن أكثر من 10 إلكترون فولت لتأين الذرات والجزيئات وكسر الروابط الكيميائية. الإشعاع المؤيّن هو مواد مشعة تنبعث منها إشعاعات α أو β أو γ ، تتكون من نوى الهيليوم والإلكترونات أو البوزيترونات والفوتونات على التوالي. تشمل المصادر الأخرى الأشعة السينية من فحوصات التصوير الطبي بالأشعة السينية للميزونات والبوزيترونات والنيوترونات والجسيمات الأخرى التي تشكل الأشعة الكونية الثانوية التي يتم إنتاجها بعد تفاعل الأشعة الكونية الأولية مع الغلاف الجوي للأرض [61].

5-3 اشعاع ألفا:

جسيمات ألفا، المعروفة أيضًا بأشعة ألفا أو إشعاع ألفا، تتكون من بروتونين ونيوترونين مرتبطين معًا لتكوين جسيم مماثل لنواة الهيليوم-4. تتكون هذه الجسيمات عادةً أثناء اضمحلال ألفا، ولكن يمكن إنتاجها أيضًا بطرق أخرى. سُميت نسبةً إلى الحرف الأول من الأبجدية اليونانية. ولأنها مماثلة لنواة الهيليوم، يُشار إليها أيضًا باسم He^2+ أو He^{242+} ، مما يدل على أيون هيليوم بشحنة $+2$. يتحول جسيم ألفا إلى ذرة هيليوم عادية He^{42} عن طريق اكتساب إلكترونات من المصدر الخارجي. الدوران المغزلي لجسيم ألفا يساوي صفرًا. باتباع آلية إنتاجها في اضمحلال ألفا الإشعاعي القياسي، تُشحن جسيمات ألفا تلقائيًا بطاقة حركية تبلغ حوالي 5 ميجا إلكترون فولت، وسرعة قريبة من 4% مقارنةً بسرعة الضوء. على الرغم من أنها شكل شديد التأين من إشعاع الجسيمات، إلا أن عمق اختراقها منخفض. ومع ذلك، تُعتبر جسيمات ألفا طويلة المدى الناتجة عن الانشطار الثلاثي ذات طاقة أعلى بثلاث مرات، وتخترق مسافةً أبعد بثلاث مرات. عادةً ما تكون نوى الهيليوم التي تُشكل 10-12% من الأشعة الكونية ذات طاقة أعلى بكثير من تلك الناتجة عن عمليات الاضمحلال النووي، وبالتالي قد تتمتع بنفاذية عالية وقادرة على عبور جسم الإنسان، بالإضافة إلى أمتار عديدة من الدروع الصلبة الكثيفة، وذلك حسب طاقتها. وينطبق هذا أيضًا، بدرجة أقل، على نوى الهيليوم عالية الطاقة جدًا الناتجة عن مسرعات الجسيمات [62].

5-4 اشعاع بيتا:

جسيم بيتا هو إما إلكترون أو بوزيترون يُقذف من النواة في عملية الاضمحلال النووي. جسيم بيتا هو عادةً إلكترون يتكون من اضمحلال نيوترون (منتجًا كلاً من إلكترون وبروتون). يمكن لجسيم بيتا أيضًا أن يكون بوزيترون (إلكترون موجب الشحنة)، ولكن عمر البوزيترون (وهو في الأساس مضاد للإلكترون) قصير جدًا. جسيمات بيتا لها كتلة منخفضة جدًا. يؤدي انبعاث جسيم بيتا إلى تحول الذرة الأم التي تبعث بيتا إلى ذرة ابنة، يكون عددها الذري أكبر بمقدار واحد؛ وتبقى الكتلة الذرية دون تغيير (لأن النيوترون والبروتون لهما كتلة متطابقة تقريبًا). على سبيل المثال، يتحلل $Sr\ 90$ عبر انبعاث جسيم بيتا إلى $Y90$ ، الذي يكون عدده الذري

أكبر بمقدار واحد ولكن كتلته الذرية هي نفسها. تُظهر جسيمات بيتا المنبعثة من النظائر المشعة نطاقًا من الطاقات يمتد من الصفر تقريبًا إلى الحد الأقصى، وهو ما يميز هذا النظير المشع. وتتراوح هذه الطاقات القصوى من عدة كيلو فولت إلكترون (keV) إلى عدة MeV [63]. إشعاع بيتا هو إشعاع جزيئي يتكون من إلكترونات عالية السرعة، والتي يتم إضعافها بسرعة بواسطة الأنسجة البيولوجية (جسيمات بيتا 2 ميغا فولت لها نطاق 1 سم فقط في الماء). وهذا يجعلها مفيدة جدًا في العلاجات الإشعاعية السطحية حيث يكون اختراق الأنسجة العميقة غير مرغوب فيه. وله تاريخ طويل كطريقة علاج في طب العيون. إنها طريقة مريحة وعملية لتطبيق الإشعاع وتتميز بميزة اختراق الأنسجة الضئيلة. كان هناك انتعاش حديث في استخدام إشعاع بيتا في مجالات أخرى في الطب، مثل الوقاية من إعادة التضيق بعد دعامة الشريان التاجي. لقد ثبت أن إشعاع بيتا، في المختبر وفي الجسم الحي، يثبط تكاثر الخلايا الليفية البشرية "تينون"، والتي تدخل في فترة توقف نموها لكنها لا تموت. وقد ثبت أن تأثيراته على مُتحكم دورة الخلية p53 مهمة في هذه العملية. في طب العيون، استُخدم إشعاع بيتا على نطاق واسع لعلاج الظفرة، وهو قيد التقييم لعلاج الضمور البقعي المرتبط بالعمر وللتحكم في التثام الجروح بعد جراحة تصريف الجلوكوما. استُخدم إشعاع بيتا من الراديوم والرادون والرااديوم D-E في علاج بعض الحالات العينية الخارجية لحوالي 40 عامًا نظرًا لتأثيراته السطحية نسبيًا ودقة تحديد موقع الإشعاع. وفي الآونة الأخيرة، أصبحت أجهزة تطبيق السترونشيوم المشع (Sr90)-الإيتريوم (Y90) متاحة كمصدر لجسيمات بيتا أو الإلكترونات للاستخدام العيني. وُجد أن السترونشيوم-90 (Sr90)، وهو ناتج انشطاري غير مستقر لليورانيوم-235 (U235)، مصدرٌ مفيدٌ سريريًا لإشعاع بيتا، إذ يتميز بعمر نصف طويل (28.7 سنة) ولا يُصدر إلا جسيمات بيتا عالية الطاقة أثناء تحلله. أما الروثينيوم-106 (Ru106)، فيُصدر بشكل رئيسي إشعاع بيتا، ولكنه يُصدر أيضًا مُركّب جاما صغيرًا ولكنه مهم. وقد استُخدم الروثينيوم-106 Ru106 بشكل رئيسي في علاج الورم الميلانيني المشيمي [64-65].

5-5 اشعاع غاما:

تنتقل إشعاعات جاما من النويدات المشعة على هيئة فوتونات وليس جسيمات؛ وهذا يعني أنها لا تحتوي

على كتلة أو شحنة. تتحلل النويدات المشعة في هيئة إشعاعات جاما، ولا يصاحب هذه العملية أي تغيير في العدد الذري أو الكتلة الذرية. ولأن أشعة جاما إشعاعية، فإنها لا تحتوي على كتلة، وبالتالي تتمتع بقوة اختراق عالية أكثر من جسيمات بيتا [66].

كما يشار إلى أشعة غاما أيضًا باسم "الفوتونات" وهي تنتقل بسرعة الضوء. تمتلك أشعة جاما طاقة كافية لتأين المادة. تعد نظائر العناصر التي تصدر الأشعة نويدات مشعة مهمة في منتجات الانشطار من التجارب النووية أو كوارث محطات الطاقة النووية أو النفايات. تنبعث أشعة جاما في طاقات منفصلة تتوافق مع انتقالات حالة الطاقة التي قد يخضع لها النوية عندما تكون في حالة مثارة. يمكن وصف طاقة شعاع جاما E_γ حسب المعادلة:

$$E_\gamma = h\nu = E_1 - E_2 \quad (1-5)$$

E_γ : تمثل طاقة فوتون جاما المنبعث (بوحدة الإلكترون فولت أو جول).

h : ثابت بلانك (6.626×10^{-34} جول.ثانية). بين طاقة الفوتون وتردده.

ν : تمثل تردد فوتون جاما (بوحدة هرتز). وهو عدد الموجات التي تمر بنقطة معينة في الثانية.

E_1 : طاقة النواة في حالتها المثارة.

E_2 : طاقة النواة في حالتها الأقل طاقة [67].

تُستخدم وحدات الجيجا بيكريل (GBq) والجراي (Gy) والرونجن (R) لقياس الإشعاع. تقيس الجيجا بيكريل عدد أشعة جاما المنبعثة من مصدر الإشعاع وهي وحدة قياس النشاط الإشعاعي التي تُعرّف بأنها 1.37×10^{12} اضمحلال ذري في الثانية. وحدة القياس الثانية للإشعاع هي الغراي. تعني الجرعة الممتصة التي تبلغ 1 جراي امتصاص 1 جول من طاقة الإشعاع لكل كيلوجرام. أما الوحدة الثالثة، وهي الرونجن، فهي تقريبًا نفس الغراي، وتُستخدم كوحدة قياس للتعرض لأشعة جاما والأشعة السينية [68].

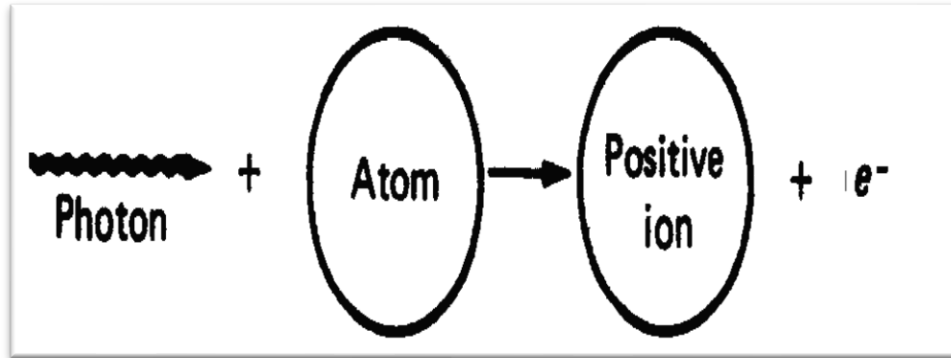
تتفاعل أشعة غاما مع المادة بطرق متعددة الا أن الآليات الرئيسية الثلاثة التي تستقطب الإهتمام تتمثل بالظاهرة الكهروضوئية وتبعثر كومبتون وإنتاج الأزواج وذلك بسبب احتمالية حدوثها العالية مقارنة بالتفاعلات الأخرى للفوتونات، ويمكن تصنيف هذه التفاعلات إلى:

5-5-1 التأثير الكهروضوئي:

في هذه الظاهرة تمتص طاقة الفوتون (أشعة غاما) الساقط كلياً من قبل إلكترون مرتبط بالمدارات الداخلية للذرة، وبهذا سوف يختفي الفوتون وينفصل الإلكترون عن الذرة تاركا إياها أيوناً موجباً، وإن الطاقة الحركية التي سينطلق بها الإلكترون المتحرر هي حسب المعادلة (1):

$$E_e = E_\gamma - B.E \quad (2-5)$$

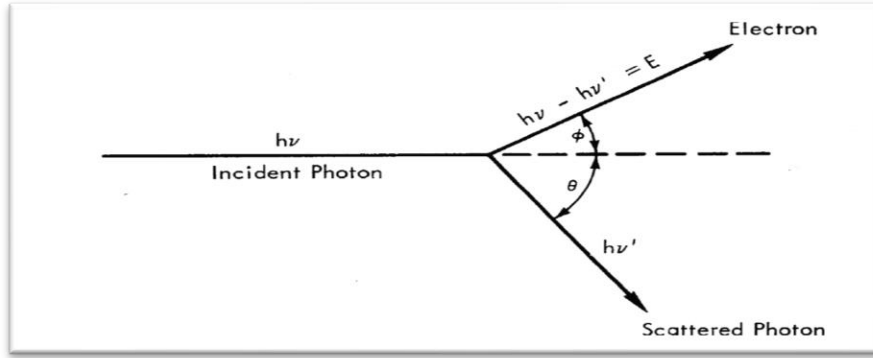
E_e : طاقة الإلكترون الخارج , E_γ : طاقة الفوتون الساقط , $B.E$: طاقة ارتباط الإلكترون بالذرة. [67]



الشكل (5-1) التأثير الضوئي

5-5-2 تبعثر كومبتون:

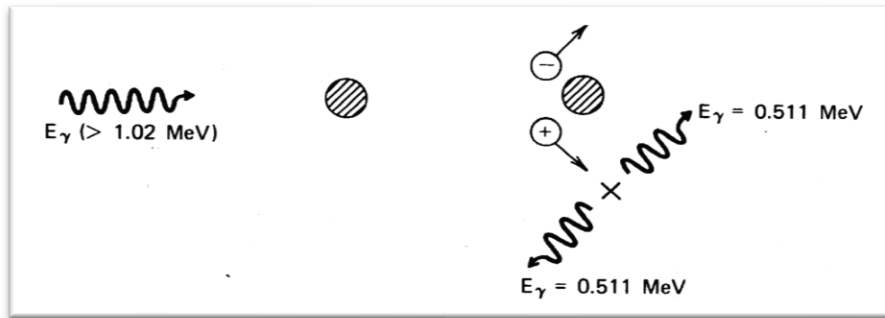
و هو تفاعل يحدث بين الفوتون الساقط والإلكترونات المدارات الخارجية للذرات اذ تكون تلك الإلكترونات ضعيفة لارتباط بالنواة مما يسبب فقدان جزء من طاقة الفوتون حيث تعطى إلى الإلكترون مسبباً انبعائه خارج حيز الذرة. حيث يوضح الشكل (1) الية تبعثر كومبتون [68].



الشكل (5-2) آلية تبعثر كومبتون

5-5-3 توليد الأزواج:

وهي ظاهرة تلاشي فوتون الأشعة الساقطة على المادة في مجال النواة الكولومي متحولاً إلى زوج إلكترون - بوزترون عندما تكون طاقة الفوتون مساوية أو أكبر من 1.022 MeV. يوضح الشكل (3) هذه العملية.



الشكل (5-3) توليد الأزواج [69]

الفصل السادس: التجهيزات المستخدمة في الدراسة العملية

1-6 مقدمة:

لإجراء الاختبارات المطلوبة للخصائص المدروسة يتطلب استخدام تجهيزات مخبرية مختلفة حسب

الخاصية المدروسة. سيتم تنظيم هذا الفصل وفق التسلسل التالي:

- مكان اجراء الدراسة والوصف التفصيلي للمواد والتجهيزات
- البروتوكولات التجريبية الكاملة
- المنهجية التحليلية للبيانات

2-6 مكان اجراء الدراسة والوصف التفصيلي للمواد والتجهيزات

تم اجراء الدراسات المخبرية لهذه الرسالة في كلا من:

- (a) مخبر الكيمياء الفيزيائية واللاعضوية للدراسات العليا – كلية العلوم بجامعة دمشق.
- (b) المخبر المركزي للتحاليل الكيميائية – كلية العلوم بجامعة دمشق.
- (c) مخبر المحولات في الشركة العامة لكهرباء محافظة دمشق – وزارة الكهرباء – دمشق.
- (d) هيئة الطاقة الذرية السورية – قسم تكنولوجيا الاشعاع
- (e) مخبر التوتر العالي – كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية بجامعة دمشق

3-6 المواد المستخدمة في الدراسة

تم اجراء التجارب العملية في هذه الدراسة على عينات زيت عازل منشأ معدني من شركات انتاج مختلفة وبمواصفات فنية مختلفة حيث يوضح الشكل (1-6) العينات المدروسة والجدول (1-6) المواصفات الفنية لتلك العينات.



الشكل (1-6) العينات المدروسة

الجدول (1) مواصفات العينات المدروسة

النوع والمصدر	بلد المنشأ	الشركة المصنعة
زيت عزل منشأ معدني / وزارة الكهرباء دمشق	الصين	Kelamayi 45
زيت عزل منشأ معدني / وزارة الكهرباء دمشق	الهند	SVITA Ltd.
زيت عزل منشأ معدني / وزارة الكهرباء دمشق	السويد	NYNAS

4-5 التجهيزات المستخدمة في هذه الدراسة:

1-4-5 ميزان الكتروني

موضح في الشكل (2-6) النوع: ميزان إلكتروني تحليلي دقيق (Analytical Balance), الطراز:

Prosche (الرقم التسلسلي: 1002997), السعة القصوى: 220 جم, الدقة: 0.0001 جم (0.1 ملجم), وحدات

القياس: متعددة (جرام، ملليجرام، أوقية، قيراط), منصة الوزن: من الفولاذ المقاوم للصدأ (قطر 90 مم).

التشغيل: انتظار استقرار المؤشر (± 0.0001 جم). تسجيل القراءة بعد 3 ثوانٍ من الثبات.



الشكل (2-6) ميزان الكتروني

5-4-2 فرن تجفيف كهربائي

موضح في الشكل (3-6) النوع: فرن تجفيف كهربائي حراري، نطاق درجة الحرارة: من $+5^{\circ}\text{C}$ إلى $+300^{\circ}\text{C}$ ، الدقة الحرارية: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ عند 100°C ، السعة: 70 لتر (أبعاد الحجرة الداخلية $350 \times 450 \times 450$ مم)، مصدر التسخين: عناصر تسخين خزفية مع توزيع حراري موحد، التحكم: لوحة تحكم رقمية PID مع شاشة LCD.

الأمان: نظام حماية من ارتفاع درجة الحرارة (Over-temperature protection)



الشكل (3-6) فرن تجفيف كهربائي

5-4-3 دورق عياري

موضح في الشكل (4-6) أداة دقيقة لقياس الكثافة في الدراسات المخبرية، وقد استُخدم في هذه الدراسة لتحديد الكثافة الدقيقة للزيت العازل المعدني قبل وبعد التعرض للإشعاع. المواصفات الفنية للدورق المستخدم: النوع: دورق عياري زجاجي، السعة: 25 مل (± 0.03 مل عند 20°C)، المادة: زجاج بوروسيليكات (درجة حرارة عمل تصل إلى 400°C)، الدقة: ± 0.0001 جم/سم³، التصميم: غطاء شعري بفتحة ضيقة (قطر 1.5 مم) لضبط مستوى السائل، علامة معايرة دقيقة محفورة بالليزر، غطاء زجاجي أرضي لضمان إحكام الإغلاق.



الشكل (4-6) دورق عياري

5-4-4 جهاز الموجات فوق الصوتية

موضح في الشكل (5-6) تم استخدام جهاز التنظيف الرقمي بالموجات فوق الصوتية (Digital Ultrasonic Cleaner) في هذه الدراسة حيث يلعب هذا الجهاز دوراً هاماً في:

إزالة الشوائب العالقة على أسطح العينات، ضمان نقاوة الأوعية المستخدمة في القياسات، تحسين دقة نتائج الاختبارات الفيزيائية والكيميائية. المواصفات الفنية الرئيسية:

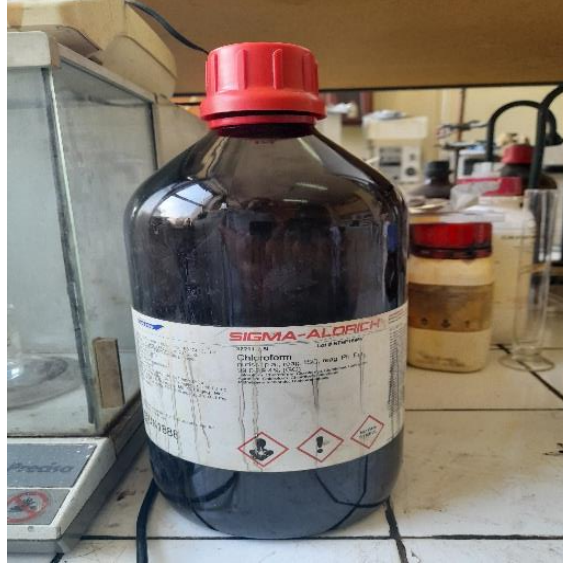
النوع: جهاز تنظيف بالموجات فوق الصوتية رقمي، السعة: 10 لتر (أبعاد الحوض: 150×240×300 مم) تردد الموجات: 40 كيلوهرتز ($\pm 5\%$)، نطاق درجة الحرارة: 20-80°C (قابلة للضبط)، الطاقة: 300 واط زمن التشغيل: قابل للضبط من 1 إلى 30 دقيقة، لوحة التحكم: شاشة LCD رقمية مع ضوابط لضبط: الزمن، درجة الحرارة، شدة الموجات. 3. التصميم والتركيب: حوض التنظيف: من الفولاذ المقاوم للصدأ (grade 304)، عناصر توليد الموجات: 4 محولات طاقة مثبتة في القاعدة، نظام التسخين: عنصر تسخين كهربائي معزول



الشكل (5-6) جهاز الموجات فوق الصوتية

5-4-5 الكلوروفورم

كما موضح في الشكل (6-6). يستخدم محلول الكلوروفورم في هذه الدراسة كمذيب رئيسي لإعداد العينات الزيتية لاختبار الحموضة وفقاً للمعايير القياسية (ASTM D974). يعمل الكلوروفورم على إذابة الزيت العازل المعدني بشكل كامل، تسهيل عملية المعايرة الحمضية-القاعدية، منع التداخلات الكيميائية أثناء التفاعل. تركيب المحلول 95% كلوروفورم (CHCl_3) نقاوة $\geq 99.8\%$ ، 5% إيثانول مطلق (كمواد حافظة) الخصائص الفيزيائية: الكثافة: 1.48 جم/سم³ عند 25°C، نقطة الغليان: 61.2°C، معامل الانكسار: 1.445 عند 20°C، درجة النقاوة: خالي من المواد المانعة للأكسدة (اختبار بيكربونات الصوديوم سلبى)، محتوى الماء >0.01% (طريقة Karl Fischer). إجراءات التحضير، اختيار المادة الأولية: كلوروفورم HPLC grade، تخزين في عبوات زجاجية معتمدة. عملية الخلط: 950 مل كلوروفورم + 50 مل إيثانول، خلط في قارورة زجاجية ذات سداد زجاجي تخضير لمدة 10 دقائق. التخزين: في درجة حرارة 4°C، بعيداً عن الضوء المباشر، مدة الصلاحية: 3 أشهر.



الشكل (6-6) محلول الكلوروفورم

5-4-6 جهاز قياس توتر الانهيار

كما هو موضح في الشكل (5-7) الوصف التفصيلي لجهاز ميجر OTS.60PB لقياس جهد الانهيار

(MEGGER OTS.60PB Breakdown Voltage Tester)

يُعد جهاز ميجر OTS.60PB أداة متخصصة لقياس جهد الانهيار في العوازل السائلة وفق المعايير الدولية (IEC 60156, ASTM D1816). تم استخدامه في هذه الدراسة لتقييم أداء الزيت العازل المعدني تحت ظروف التشغيل المختلفة، ولرصد التغيرات في خصائصه العازلة بعد التعرض للإشعاع. المواصفات الفنية الرئيسية: النوع: جهاز قياس جهد الانهيار الرقمي المحمول، الموديل: OTS.60PB ، الدقة: $\pm 1\%$ من القراءة، زيادة الجهد: 0.5-3 كيلوفولت/ثانية (قابلة للضبط)، الخلية الكهربائية: قطبين كرويين من الفولاذ المقاوم للصدأ (قطر 12.5-13 مم)، فجوة قابلة للتعديل (2.5 مم حسب المعيار المعتمد في دراستنا هو IEC 60156). واجهة المستخدم: شاشة LCD رقمية، أزرار تحكم مادية، منفذ USB لنقل البيانات. مكونات الجهاز الرئيسية:

- وحدة توليد الجهد العالي: محول عالي الجهد مع نظام حماية متكامل، دائرة تحكم دقيقة في معدل زيادة الجهد. خلية القياس: وعاء زجاجي مقاوم للكسر (سعة 400 مل)، نظام تحكم في درجة الحرارة (مدمج)، مغناطيس للتحريك الميكانيكي.



الشكل (7-5) جهاز قياس توتر الانهيار

7-4-5 جهاز التحليل الطيفي FT-IR

كما هو موضح في الشكل (8-5) الوصف التفصيلي لجهاز التحليل الطيفي JASCO المستخدم في الدراسة: تم استخدام جهاز التحليل الطيفي من شركة JASCO (الموديل: V-770) في هذه الدراسة لإجراء التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء (FT-IR) والتحليل الطيفي للأشعة المرئية وفوق البنفسجية (UV-Vis) للزيت العازل المعدني قبل وبعد التعرض للإشعاع. يعد هذا الجهاز أداة هامة في: تحديد التغيرات البنيوية الجزيئية، الكشف عن مركبات الأكسدة والتحلل، دراسة الخصائص الامتصاصية للزيت. المواصفات الفنية الرئيسية: النوع: مطياف ثنائي الحزمة (Double-beam)

الموديل: JASCO V-770 نطاق الطول الموجي: UV-Vis: 190-1100 nm , NIR: 1100- 2500 nm , FT-IR: 4000-400 cm^{-1} , مصادر الضوء: مصباح ديوتيريوم (UV), مصباح تنغستن (Vis/NIR), مصدر الأشعة تحت الحمراء (Globar). الكاشف: PMT (للأشعة فوق البنفسجية/المرئية), DTGS (للأشعة تحت الحمراء)



الشكل (8-5) جهاز التحليل الطيفي

5-4-8 التشعيع بأشعة غاما:

حيث يوضح الشكل (9) العينات ضمن محطة التشعيع تتم تنفيذ عملية تشعيع عينات زيت العزل المعدني في محطة التشعيع من طراز ROBO، وهي محطة روسية الصنع مخصصة لأغراض البحث والتطبيقات الصناعية، وتعمل باستخدام مصادر إشعاعية مؤينة، غالبًا من نوع الكوبالت (Co^{60})، المعروف بقدرته العالية على اختراق المواد وتأثيره المستقر على المستوى الإشعاعي. المكونات الأساسية للمحطة:

غرفة التشعيع: حجرة محمية بشكل كامل بجدران سميكة من الخرسانة والرصاص، تحتوي على المصدر الإشعاعي وتُستخدم لوضع العينات المراد تشعيها. مصدر الإشعاع: تستخدم محطة ROBO نظير الكوبالت-60 المشع، بطاقة إشعاعية تصل إلى عدة كيلوكيوري (kCi)، مما يوفر جرعات إشعاعية دقيقة وقابلة للتحكم. نظام التحكم: يحتوي على وحدة تحكم إلكترونية تُستخدم لضبط زمن التشعيع، معدل الجرعة، وحركة العينات داخل الحجرة. نظام الأمان: مزود بآليات حماية متعددة تضمن عدم تعرض المشغلين لأي خطر إشعاعي، بما في ذلك أقفال أوتوماتيكية، أجهزة استشعار إشعاعي، وإنذارات صوتية ومرئية.

التطبيقات العلمية لمحطة ROBO تُستخدم محطة ROBO لتطبيقات متعددة تشمل:

تعقيم المواد الطبية والغذائية، تعديل الخواص الفيزيائية والكيميائية للمواد، دراسة تأثير الإشعاع على المواد العازلة، البوليمرات، والزيوت الصناعية، محاكاة الظروف الإشعاعية في البيئات النووية أو الفضاء.



الشكل (9) العينات ضمن محطة التشيع

5-5 البروتوكولات التجريبية الكاملة:

5-5-1 قياس محتوى الماء:

الأدوات المطلوبة: ميزان إلكتروني دقيق (دقة 0.0001 جم) , فرن تجفيف مُعاير درجة حرارة تصل إلى $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, أوعية زجاجية مقاومة للحرارة, عينة الزيت العازل المعدني. نقوم بتنظيف الأوعية الزجاجية بالمذيب العضوي (مثل الهكسان) ونجففها في الفرن عند 105°C لمدة 30 دقيقة ثم اترك الأوعية تبرد في مجفف السيليكا جل قبل الاستخدام. نضع الوعاء الزجاجي (مع الغطاء) على الميزان الإلكتروني ونسجل وزنه (وعاء W)

نضيف وزن محدد من الزيت العازل إلى الوعاء باستخدام ماصة دقيقة. نغلق الوعاء بغطائه لتجنب فقدان العينة أو تلوثها. نسجل الوزن الكلي قبل التجفيف (W قبل التجفيف), نضع الوعاء في الفرن المسخن مسبقًا إلى 105°C نترك العينة تجف لمدة (24 ساعة) أو حتى يثبت الوزن. نسجل الوزن النهائي بعد التجفيف (W بعد التجفيف). من خلال العلاقة الآتية يتم حساب النسبة المئوية للرطوبة في عينة الزيت المدروسة:

$$\% \text{ نسبة الرطوبة} = \frac{\text{التجفيف بعد } W - \text{التجفيف قبل } W}{\text{التجفيف قبل } W} * 100 \quad (1 - 5)$$

5-5-2 قياس الكثافة:

يتم قياس كثافة السائل المدروس تجريبياً باستخدام بيشر ودورق عياري حيث يتم وزن الدورق بدقة M1 يملأ الدورق بالسائل العازل حتى نقطة محددة منه بدقة M2 ثم يتم حساب وزن السائل من فرق الوزنين ثم نقوم بقسمة هذا الفرق على حجم الدورق المحدد 25 ml الناتج يكون معبراً عن الكتلة الحجمية أو كثافة السائل العازل المدروس. من خلال العلاقة الآتية يتم حساب كثافة عينة الزيت المدروسة:

$$\text{الكثافة (Density)} = \frac{M2 - M1}{V} (mg/cm^3) \quad (2 - 5)$$

5-5-3 قياس الحموضة:

يتم تحضير محلول من KOH بتركيز 0.01 N يتم تحضير محلول من الزيت العازل المعدني المراد معايرته بتركيز 95% في الكلوروفورم حيث يستخدم هذه الدراسة كمذيب رئيسي لإعداد العينات الزيتية لاختبار الحموضة وفقاً للمعايير القياسية (ASTM D974) يعمل الكلوروفورم على:

- إذابة الزيت العازل المعدني بشكل كامل
 - تسهيل عملية المعايرة الحمضية-القاعدية
 - منع التداخلات الكيميائية أثناء التفاعل
- يتم تحريك المزيج باستخدام جهاز الموجات فوق الصوتية بحيث يتم ضبطه عند درجة حرارة محددة ولمدة محددة حتى تمام الانحلال، حيث يلعب هذا الجهاز دوراً هاماً يلعب هذا الجهاز دوراً هاماً في:
- إزالة الشوائب العالقة على أسطح العينات
 - ضمان نقاوة الأوعية المستخدمة في القياسات
 - تحسين دقة نتائج الاختبارات الفيزيائية والكيميائية

ويتم معايرة محلول الزيت بمحلول قلوي KOH ويستعمل الفينول فتالين كمشرع / حيث يؤخذ الحجم اللازم لحظة انقلاب لون المشعر الى اللون الزهري/.

من خلال العلاقة الاتية يتم حساب قرينة حموضة عينة الزيت المدروسة:

$$\text{(Acidity) الحموضة} = \frac{N * V * 56.1}{W} \text{ (mgKOH/g)} \quad (3 - 5)$$

4-5-5 قياس توتر الانهيار:

تحضير العينة:

- ترشيح الزيت عبر مرشح 0.45 ميكرون
- إزالة الغازات الذائبة بالتفريغ لمدة 15 دقيقة
- استقرار العينة عند $1 \pm 25^\circ \text{C}$ لمدة ساعة

تؤخذ العينة المحضرة من الزيت وتوضع في كوب خماسي الأبعاد بين إلكترودين داخل جهاز الفحص بينهما مسافة قياسية أيضا وبعد سكون حركة الزيت في الوعاء الفاحص يطبق على الكرتين الجهد الكهربائي تدريجيا بمعدل 2-5 Kv/sec مع ملاحظة القيم من خلال جهاز الفولتميتر ويستمر رفع الجهد حتى إنهيار عزل الزيت وعندها تفصل الدارة الكهربائية تلقائيا ويسجل جهد انهيار العزل ويعاد الاختبار أكثر من مرة بعد تغيير الكوب ووضع كمية أخرى من الزيت المأخوذ من نفس العينة (العينة تكفي لعدة أكواب). تسجيل متوسط القيم الذي يعبر عن قيمة توتر الانهيار للعينة المدروسة.

من خلال العلاقة الاتية يتم حساب توتر انهيار عينة الزيت المدروسة:

$$V = \sum_{n=1}^6 \frac{V_m}{6} \text{ (Kv)} \quad (4 - 5)$$

5-5-5 التحليل بمطيافية الأشعة تحت الحمراء FT-IR:

أ) تحضير العينات:

1. طبقة رقيقة بين ألواح KBr , مسح خلفية باستخدام KBr النقي

ب) إجراءات القياس:

2. معايرة الجهاز باستخدام معايير NIST

3. ضبط دقة المسح 4 cm^{-1} FT-IR

4. عدد المسحات: 64 مسحة لـ FT-IR

توضع كمية 1 ml من العينة المراد تحليلها باستخدام جهاز تحليل طيفي (JASCO) الذي يوفر دقة

تحليلية عالية لاكتشاف التغيرات الجزيئية الدقيقة في الزيت العازل المعدني المدروس.

5-5-6 التشعيع بأشعة غاما:

تم باستخدام مصدر إشعاعي CO^{60} بنشاط إشعاعي 70 كيلوكوري.

شععت العينة بوضعها على بعد مسافة 10 سم من حامل المنبع عند معدل جرعة (8,9

كيلوغراي/ساعة).

يتألف حامل المنبع من أنابيب أسطوانية بقطر 12 مم وطول 1 م توضع ضمنها منابع الكوبالت المشعة

بحيث يمكن اعتبار المنبع بشكل تقريبي على شكل مستطيل وبالتالي لا ينطبق عليه قانون حساب الجرعة

الممتصة المذكور أعلاه لذلك تم استخدام الطريقة التجريبية لحساب معدل الجرعة الممتصة حيث تمت المعايرة

باستخدام مقاييس جرعة كيميائية مثل كلورو البنزين الايتانولي والمعتمد بالمواصفة الدولية

ISO/ASTM:51538.2017. تم وضع العينات بأكياس من البولي ايثيلين محكمة الاغلاق حيث أخذت العينة

شكل متوازي المستطيلات (2*10*10 سم) عند درجة حرارة الغرفة وفي الهواء عند معدل جرعة (8,9

كيلوغراي/ساعة) بجرعات متتالية على الشكل التالي (50, 100, 150, 200, 250) kGy.

5-6 المنهجية التحليلية للبيانات:

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج التجريبي التحليلي القائم على جمع البيانات الكهربائية و الفيزيائية

والكيميائية من عينات زيت عازل معدني مستخدم وتحليلها إحصائيًا ومقارنًا بهدف تقييم كفاءة الزيت وتحديد مدى تدهوره. تم تطبيق المنهج وفق الخطوات التالية:

5-6-1 جمع البيانات التجريبية (Empirical Data Collection)

تم إجراء سلسلة من الاختبارات المخبرية على عينات من زيت العزل باستخدام أجهزة ومعايير معتمدة، شملت قياس الخصائص التالية: محتوى الرطوبة، الكثافة، الحموضة (رقم التعادل)، جهد الانهيار الكهربائي، التحليل الطيفي (FT-IR).

5-6-2 المعالجة الإحصائية للبيانات (Statistical Data Processing)

تم استخدام أدوات التحليل الإحصائي لتحويل البيانات إلى مؤشرات كمية قابلة للتفسير، وذلك من خلال: حساب المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية، إجراء تحليل ترابطي (Correlation Analysis) لتحديد العلاقات بين المتغيرات.

5-6-3 التقييم القياسي (Benchmarking against Standards)

تمت مقارنة نتائج التحاليل بالمعايير الفنية المعتمدة دوليًا مثل: (جهد الانهيار) IEC 60156 , (الرطوبة) ASTM D6304-20 , (الحموضة) IEC 62021 , (الكثافة) ISO 3675 , (التحليل الطيفي) ASTM D2144 / FTIR.

5-6-4 التفسير العلمي (Scientific Interpretation)

استُخدم التحليل النوعي للنتائج وربطها بالخلفية النظرية لميكانيكيات تدهور زيت العزل مثل:

1. الأكسدة
2. التحلل الحراري
3. التلوث بالرطوبة أو الجزيئات

الفصل السابع: النتائج ومناقشتها

7-1 مقدمة:

يُمثِّل هذا الفصل محطةً هامةً لربط العمل النظري والتجريبي الذي بُذل عبر فصول الدراسة، بهدف الإجابة عن الأسئلة البحثية الأساسية وتقديم رؤيةٍ شاملةٍ حول تأثير التشعيع المؤين (أشعة غاما) على خصائص الزيوت العازلة المعدنية. ومن خلال توظيف تقنية التشعيع، تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف آليات التفاعل الإشعاعي مع المكونات الهيدروكربونية للزيوت، وتقييم أثر الجرعات التي تُحقق توازنًا بين التحسين الوظيفي والاستقرار الكيميائي.

يُقسَّم هذا الفصل إلى قسمين رئيسيين، يعكس الأول عرض النتائج وتحليلها بعمقٍ منهجي، بينما يُقدِّم الثاني توصياتٍ عمليةً وبحثيةً مستمدةً من الدلائل التجريبية:

عرض النتائج: تُعرض البيانات المُستخلصة من التجارب المخبرية (كقياس الرطوبة، الحموضة، الكثافة، جهد الانهيار، والتحليل الطيف (FT-IR) في جداول ورسوم بيانية مُفصَّلة، مع تسليط الضوء على العلاقة بين جرعات التشعيع المُختلفة (0-250 كيلوغرام) والتغيرات الطارئة على الخصائص الكهربائية والفيزيائية والكيميائية للزيت.

الإسهامات العلمية: تكمن أهمية هذا الفصل في كونه يُقدِّم إطارًا عمليًا لأثر استخدام التشعيع كتقنيةٍ حديثة على أداء الزيوت العازلة، مع تجنب المخاطر الناجمة عن الجرعات الزائدة. كما تُسهم النتائج في سدِّ فجوة معرفية حول الآليات الجزيئية لتفاعلات التشعيع، مما يفتح آفاقًا جديدةً لتصميم زيوت عازلة مُتخصِّصة قادرة على مواكبة متطلبات الشبكات الكهربائية الحديثة.

الخاتمة: يُقدِّم هذا الفصل خريطةً طريقٍ لدمج تقنية التشعيع في الصناعات الكهربائية، مع التأكيد على ضرورة التوازن بين الابتكار العلمي والاعتبارات العملية. ومن خلال الربط بين النتائج والتوصيات، تُرسي هذه

الدراسة أساسًا متينًا لبحوث مستقبلية تهدف إلى تطوير عوازل كهربائية فائقة الأداء، تُسهم في رفع كفاءة أنظمة الطاقة العالمية وتعزيز استدامتها.

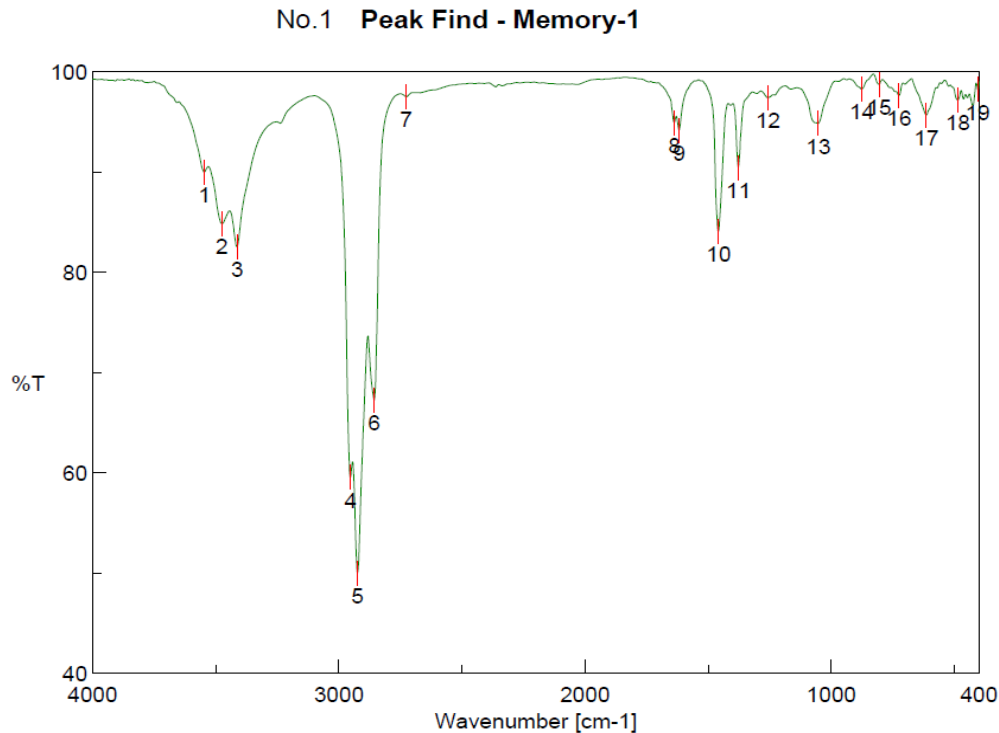
7-2 نتائج اختبارات العينات قبل التشعيع:

7-2-1 نتائج اختبارات العينة الأولى قبل التشعيع ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-1) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص المدروسة، والشكل (7-1) التحليل الطيفي للعينة المدروسة قبل التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-1) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص المدروسة

العامل المدروس Factor	العينة الأولى Sample.1
Moisture %Content محتوى الرطوبة	0.927
Density g/ml الكثافة 20°C	0.869
Acidity الحموضة mgKOH/g	0.0561
Breakdown Voltage توتر الانهيار KV	36



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 5/23/2024 1:50 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 5/22/2024 12:51 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (2)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (7-1) التحليل الطيفي للعينة الاولى قبل التشعيع بأشعة غاما

7-2-1-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: سجلت العينة محتوى رطوبة بنسبة 0.927% ، وهو مرتفع مقارنة بالمعايير المعتدة

دوليا" (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور قمم واضحة عند طول موجي (3546.45 cm^{-1}) بشدة (%T) 90.0 والذي

يشير الى وجود رطوبة حرة (O-H) , ظهور قمم واضحة عند طول موجي (3413.39 cm^{-1}) بشدة (%T) 82.6 والذي يشير الى وجود رطوبة مرتبطة (H-bonded)

7-2-1-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: الحموضة المقاسة 0.0561 mgKOH/g مرتفعة مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (IEC62021)، مما يشير إلى تقدم الأكسدة.

التحليل الطيفي: وجود قمة (C=O) (C=C) 1637 cm^{-1} وقمة (C-O) 1257 cm^{-1} يدل على بدء عمليات أكسدة. غياب قمة (1700 cm^{-1}) والتي تشير الى وجود (أحماض كربوكسيلية) يؤكد أن الأكسدة في مراحلها الأولية.

التفسير: تتشكل الحموضة في المراحل الأولى للأكسدة، حيث تتراكم المركبات الوسيطة (كالكتونات أو الإيثرات) قبل تكوين الأحماض. هذا يتوافق مع النتائج الطيفية والمخبرية.

7-2-1-3 البنية الهيدروكربونية:

التحليل الطيفي: قمم (2923 cm^{-1}) و (2856 cm^{-1}) تمدد (C-H) في (CH_3/CH_2) نموذجية للزيوت المعدنية غير المؤكسدة. قمم تحت (1000 cm^{-1}) اهتزازات الحلقات الهيدروكربونية تدعم بنية الزيت العازل التقليدي.

النتائج المخبرية: الكثافة 0.869 g/ml ضمن النطاق الطبيعي للزيوت العازلة (ISO 3675)، مما يعزز استقرار البنية الهيدروكربونية.

7-2-1-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية 36 KV : وهي قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156) ويعزى انخفاضها الى ارتفاع الرطوبة (كما في القياس العملي) قد يقلل من توتر الانهيار مع الوقت بسبب تكوين شوائب موصلة.

5-1-2-7 المقارنة مع المعايير المعتمدة للتحليل الطيفي (ASTM D2144) :

موضع القمة 2923.56 cm^{-1} (C-H stretching) ضمن المدى الطبيعي ($2950-2850 \text{ cm}^{-1}$),

مما يدل على تطابق البنية الهيدروكربونية مع المعيار.

محتوى الماء :القمم عند ($3413-3546 \text{ cm}^{-1}$) تشير إلى انحراف سلبي عن المعيار المتوقع (

3300 cm^{-1} <ضعيف)، مما يؤكد وجود رطوبة زائدة.

ظهور قمة 1637 cm^{-1} (C=O) مقابل غيابها في العينات الجديدة يدعم فرضية أكسدة مبكرة.

2-2-7 نتائج اختبارات العينة الثانية قبل التشعيع ومناقشتها:

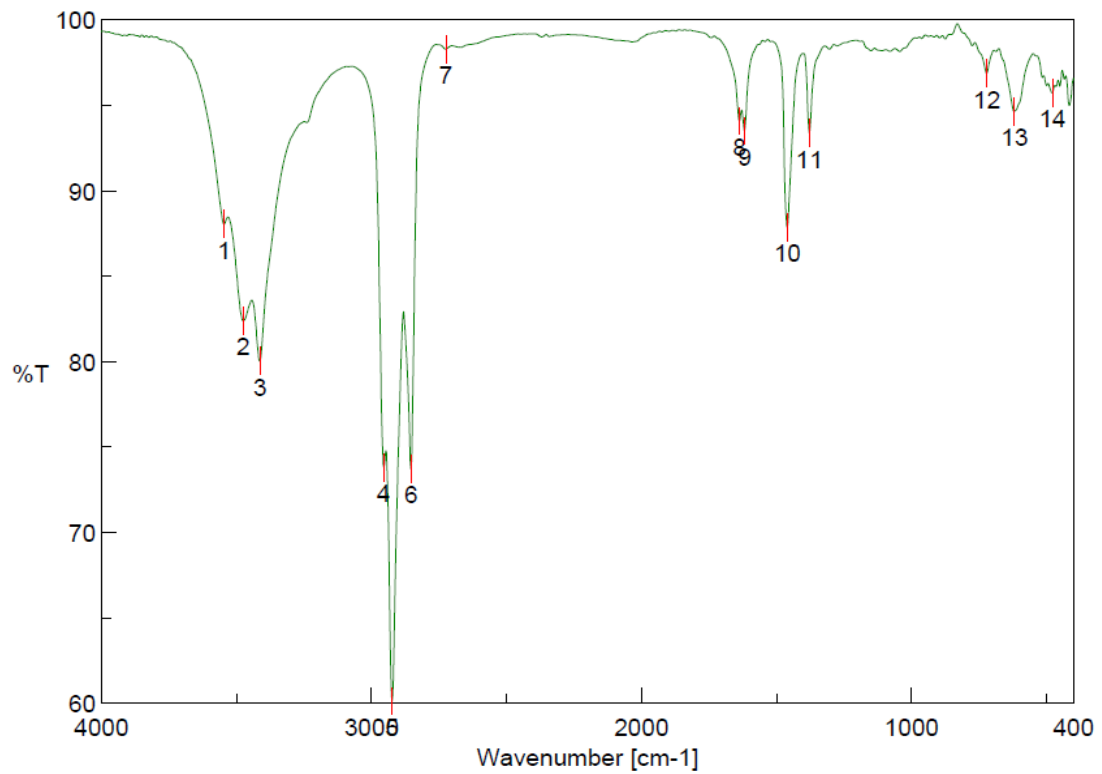
يمثل الجدول (2-6) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة, والشكل (2-6) التحليل

الطيفي للعينة المدروسة قبل التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (2-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة

العامل المدروس Factor	العينة الثانية Sample.2
محتوى الرطوبة Content%Moisture	0.230
الكثافة g/ml Density 20°C	0.829
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.0314
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	55

No.2 Peak Find - Memory-2



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 5/23/2024 1:57 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 5/22/2024 1:06 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (2)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (7-2) التحليل الطيفي للعينة الثانية قبل التشعيع بأشعة غاما

7-2-2-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية : سجلت العينة محتوى رطوبة 0.230% ، وهو مرتفع نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً" (ASTM D6304-20)

التحليل الطيفي : ظهور قمم واضحة عند طول موجي (3546.45 cm^{-1}) بشدة (%T) 88.0 والذي يشير الى وجود رطوبة حرة (O-H) , ظهور قمم واضحة عند طول موجي (3413.39 cm^{-1}) بشدة (%T) 82.4 والذي يشير الى وجود رطوبة مرتبطة (H-bonded) .

7-2-2-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية :الحموضة 0.0314 mgKOH/g منخفضة مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً" (IEC62021).

التحليل الطيفي: وجود قمم (C=O/C=C) 1637 cm^{-1} و 2724 cm^{-1} (الألدهيدات) ناتجة عن بداية تشكل للأكسدة الضعيفة.

غياب قمة 1700 cm^{-1} (أحماض كربوكسيلية) يؤكد عدم تقدم الأكسدة.

التفسير: تنخفض الحموضة في المراحل الأولى للأكسدة، حيث تظهر مركبات وسيطة مثل الألدهيدات والكيونات. هذا يتوافق مع النتائج الطيفية والمخبرية.

7-2-2-3 البنية الهيدروكربونية:

التحليل الطيفي: قمم (2923 cm^{-1}) و (2856 cm^{-1}) تمديد (C-H) في (CH_3/CH_2) نموذجية للزيوت المعدنية لكن شدة القمة (60.1%) 2923 cm^{-1} تدل على فقدان 25% من الهيدروكربونات الأصلية.

قمم 1459 cm^{-1} و 1378 cm^{-1} انحناءات (CH_3/CH_2) تدعم استقرار البنية مع بعض التدهور الطفيف.

النتائج المخبرية: الكثافة 0.829 g/ml أقل من نطاق الزيوت العازلة التقليدية حسب المعيار (ISO 3675)، مما قد يعكس فقداناً في الهيدروكربونات الخفيفة.

7-2-2-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية 55 KV : وهي قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

7-2-1-5 المقارنة مع المعايير المعتمدة للتحليل الطيفي (ASTM D2144) :

موضع القمة 2923.56 cm^{-1} (C-H stretching) ضمن المدى الطبيعي ($2850-2950 \text{ cm}^{-1}$)

مما يدل على تطابق البنية الهيدروكربونية مع المعيار لكن الشدة المنخفضة (60.1%) تشير إلى تدهور طفيف في الهيدروكربونات.

محتوى الماء: القمم عند $3546-3413 \text{ cm}^{-1}$ تشير إلى انحراف سلبي عن المعيار المتوقع (<3300

cm^{-1} ضعيف)، مما يؤكد وجود رطوبة.

ظهور قمة 1637 cm^{-1} (C=O) مقابل غيابها في العينات الجديدة يدعم فرضية قابلية العينة أكسدة مبكرة.

7-2-3 نتائج اختبارات العينة الثالثة قبل التشعيع ومناقشتها:

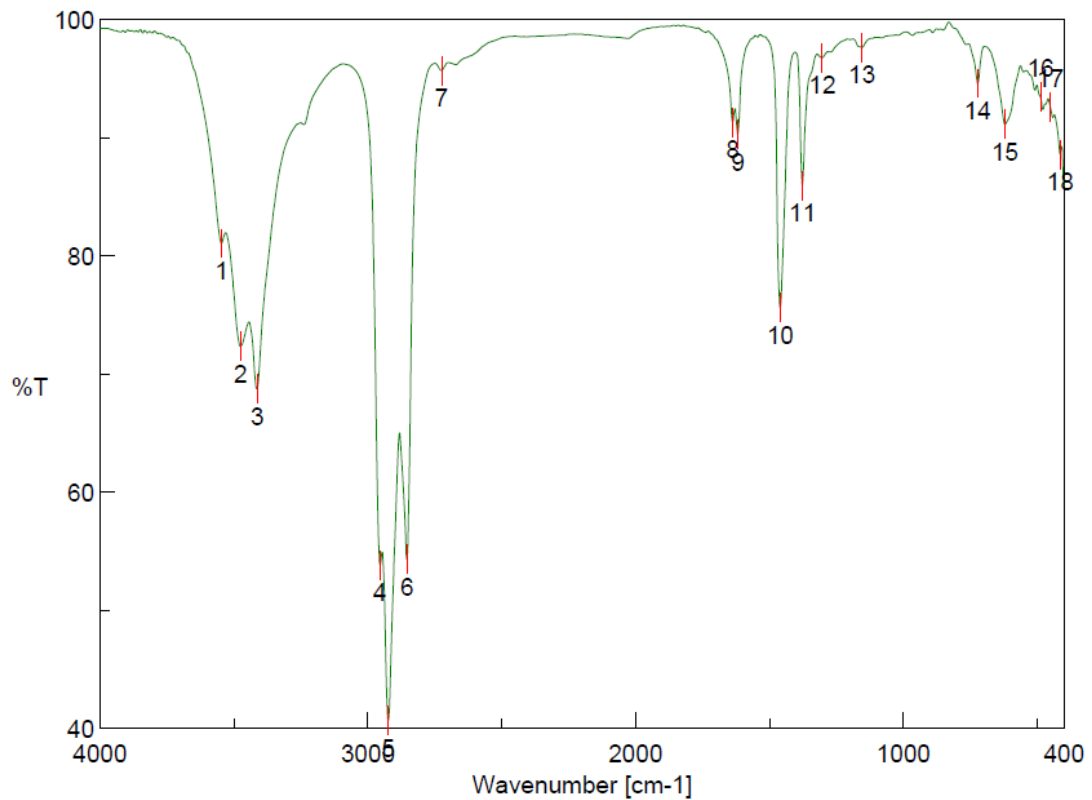
يمثل الجدول (3-6) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص المدروسة، والشكل (3-6) التحليل

الطيفي للعينة المدروسة قبل التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (3-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة

العامل المدروس Factor	العينة الثالثة Sample. 3
Moisture %Content محتوى الرطوبة	0.294
Density g/ml 20°C الكثافة	0.837
Acidity mgKOH/g الحموضة	0.0056
Breakdown Voltage KV توتر الانهيار	60

No.3 Peak Find - Memory-4



[Comments]
 Sample name
 Comment
 User
 Division
 Company

Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 5/23/2024 1:59 PM
 Data array type Linear data array
 Horizontal axis Wavenumber [cm-1]
 Vertical axis %T
 Start 399.193 cm-1
 End 4001.57 cm-1
 Data interval 1.92847 cm-1
 Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA
 Serial Number C077661018
 Measurement Date 5/22/2024 1:17 PM
 Light Source Standard
 Detector TGS
 Accumulation 8
 Resolution 8 cm-1
 Zero Filling On
 Apodization Cosine
 Gain Auto (2)
 Aperture Auto (7.1 mm)
 Scanning Speed Auto (2 mm/sec)
 Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (7-3) التحليل الطيفي للعينة الثالثة قبل التشعيع بأشعة غاما

7-2-3-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: سجلت العينة محتوى رطوبة بنسبة 0.294% ، وهو مرتفع نسبياً مقارنة بالمعايير المعتدة دولياً" (ASTM D6304-20)

التحليل الطيفي: ظهور قمم واضحة عند طول موجي (3546.45 cm^{-1}) بشدة (%T) 81.1 والذي يشير الى وجود رطوبة حرة (O-H) , ظهور قمم واضحة عند طول موجي (3413.39 cm^{-1}) بشدة (%T) 68.7 والذي يشير الى وجود رطوبة مرتبطة (H-bonded) .

ظهور قمة (N-H) 3475 cm^{-1} يدل على تلوث طفيف بالأمينات، مما قد يؤثر على الخواص العازلة.

7-2-3-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: الحموضة 0.0056 mgKOH/g منخفضة جداً، مما يشير إلى غياب أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار (IEC62021).

التحليل الطيفي: قمة (1637 cm^{-1} و 2724 cm^{-1}) (C=O) ألدهيدات تدل على أكسدة ضعيفة. غياب قمة 1700 cm^{-1} (أحماض كربوكسيلية) يؤكد أن الأكسدة لم تصل إلى مرحلة تكوين الأحماض. انخفاض الحموضة رغم وجود قمم أكسدة يُعزى إلى أن المركبات الوسيطة (كالألدهيدات) لا تساهم بشكل كبير في الرقم الحمضي (TAN) .

7-2-3-3 البنية الهيدروكربونية:

التحليل الطيفي: قمم (2923 cm^{-1}) و (2856 cm^{-1}) تمديد (C-H) في (CH_2/CH_3) نموذجية للزيوت المعدنية ، لكن شدة القمة (40.6%) 2923 cm^{-1} تدل على فقدان 30% من الهيدروكربونات الأصلية. قمم (1376 cm^{-1}) , (1459 cm^{-1}) انحناءات (CH_3/CH_2) تؤكد استقراراً جزئياً مع تدهور في التفرعات.

النتائج المخبرية: الكثافة 0.837 g/ml أقل قليلاً من نطاق الزيوت العازلة التقليدية حسب المعيار (ISO 3675)، مما قد يعكس فقداناً في الهيدروكربونات الخفيفة.

7-3-2-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية 60 KV : وهي قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

7-3-2-5 المقارنة مع المعايير المعتمدة للتحليل الطيفي (ASTM D2144) :

موضع القمة 2923.56 cm^{-1} (C-H stretching) ضمن المدى الطبيعي ($2850-2950 \text{ cm}^{-1}$) ، لكن الشدة المنخفضة (40.6%) تشير إلى تدهور هيدروكربوني ملحوظ.

محتوى الماء: القمم عند ($3546-3413 \text{ cm}^{-1}$) تشير إلى رطوبة أعلى من المعيار ($<3300 \text{ cm}^{-1}$) (ضعيف)، مما يؤكد الحاجة إلى تجفيف.

ظهور قمة 1637 cm^{-1} (C=O) بشدة (91.3%) يدعم فرضية أكسدة، رغم انخفاض الحموضة المخبرية.

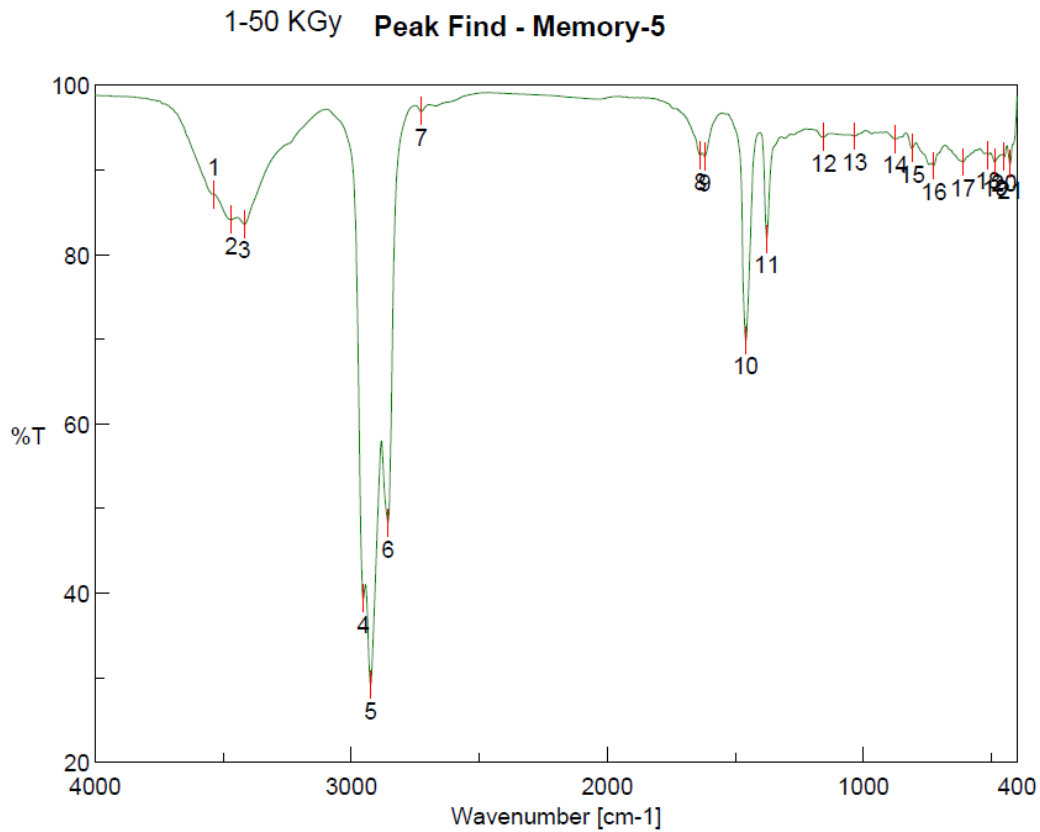
7-3-3 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 50KGy:

7-3-1 نتائج اختبارات العينة الأولى التشعيع عند جرعة 50KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (5-6) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص المدروسة، والشكل (5-6) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (5-7) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغراي

العامل المقاس Factor	العينة الأولى 50 KGy الجرعة
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.118
الكثافة Density g/ml 20 °C	0.853
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.130
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	35



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 12:47 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 12:47 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (5-7) التحليل الطيفي للعينة الأولى بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغرام

7-3-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفاض محتوى الرطوبة من 0.927% إلى 0.118% بعد التشعيع، وهو تحسن

ملحوظ لكنها بقيت مرتفعة مقارنة وهو مرتفع نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً" (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور قمم O-H عند 3536 cm^{-1} و 3417 cm^{-1} (رطوبة مرتبطة) مع انخفاض شدة القمم من 90% إلى 87.1% يشير إلى تغير في طبيعة الرطوبة (تحولت إلى مركبات ثانوية).

التشيع قد حفز تفاعلات تحلل للماء الموجود في الزيت، مما قلل من الرطوبة الحرة ولكن زاد من تكوين مركبات قطبية (كالكحولات أو الأحماض).

7-3-1-2 الأوكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0561 mgKOH/g إلى 0.130 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1637 cm^{-1} (كيتونات/ألدهيدات) و C-O عند 1155 cm^{-1} (إيثرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة. قمة 2726.85 cm^{-1} (ألدهيدات) تدعم فرضية تفاعلات أكسدة إشعاعية.

التفسير: التشيع يولد جذورًا حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة.

7-3-1-3 البنية الهيدروكربونية:

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923 cm^{-1} من يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). تغيرات في قمم 1459 cm^{-1} و 1376 cm^{-1} انحناءات (CH_3/CH_2) تشير إلى اضطراب في التفرعات الهيدروكربونية.

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.869 g/ml إلى 0.853 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

7-3-1-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (36 KV) إلى (35 KV) انخفاض طفيف وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

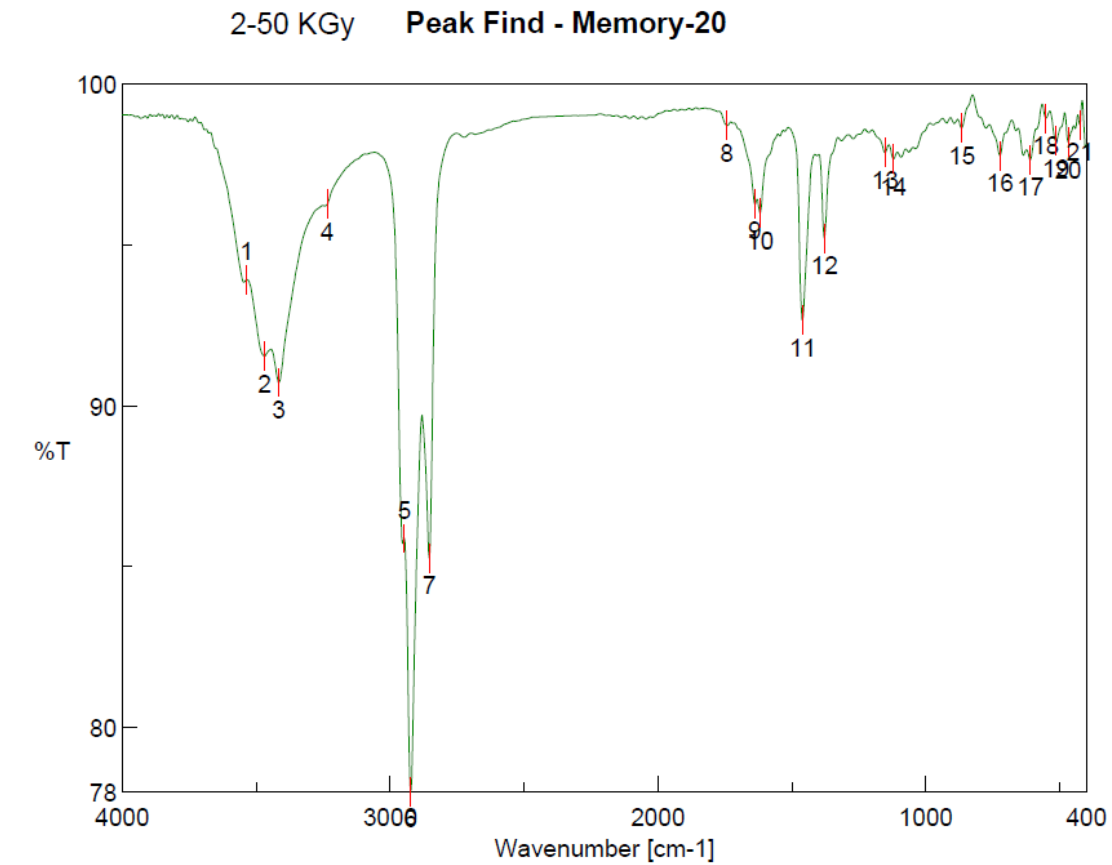
التفسير: على الرغم من انخفاض الرطوبة، فإن تراكم الشوائب القطبية (الكحولات والألدهيدات) الناتجة عن الأكسدة يُقلل من كفاءة العزل الكهربائي. التغيرات الهيكلية في الجزيئات قد تؤدي إلى تكوين مسارات موصلة دقيقة.

7-3-2 نتائج اختبارات العينة الثانية التشعيع عند جرعة 50KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (6-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة، والشكل (6-7) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (6-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغراي

العامل المقاس Factor	العينة الثانية الجرعة 50 KGy
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.068
الكثافة Density g/ml 20 C	0.821
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.222
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	53



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:13 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:11 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (6-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 50 كيلو غراي

7-3-2-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.230% إلى 0.068% ، وهو تحسن ملحوظ لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً " (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: زيادة شدة قمم (O-H) عند 3536.81 cm^{-1} و 3469.31 cm^{-1} من (90-94%) تشير إلى تحول الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مرتبطة (الكحولات أو الأحماض).

التفسير: التشيع قد حفز تفاعلات أكسدة حولت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية، مما يفسر ارتفاع الشدة الطيفية رغم انخفاض الرطوبة المقاس.

7-3-2-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0314 mgKOH/g إلى 0.222 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1743.33 cm^{-1} (استرات/أحماض) و C-O عند 1151.29 cm^{-1} (إيثرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة.

7-3-2-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.829 g/ml إلى 0.821 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} ، يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH₃/CH₂) .

ظهور قمة C=C عند 1617.98 cm^{-1} يشير إلى تكوين ألكينات غير مشبعة نتيجة تفكك الروابط المشبعة.

7-3-2-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (55 KV) إلى (53 KV) انخفاض ملحوظ رغم تحسن الرطوبة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: على الرغم من انخفاض الرطوبة، فإن تراكم الشوائب القطبية (كالكحولات وكالإثيرات) الناتجة عن الأكسدة يُقلل من كفاءة العزل الكهربائي.

التغيرات الهيكلية (مثل تكوين الألكينات) في الجزيئات قد تؤدي إلى تكوين مسارات موصلة دقيقة.

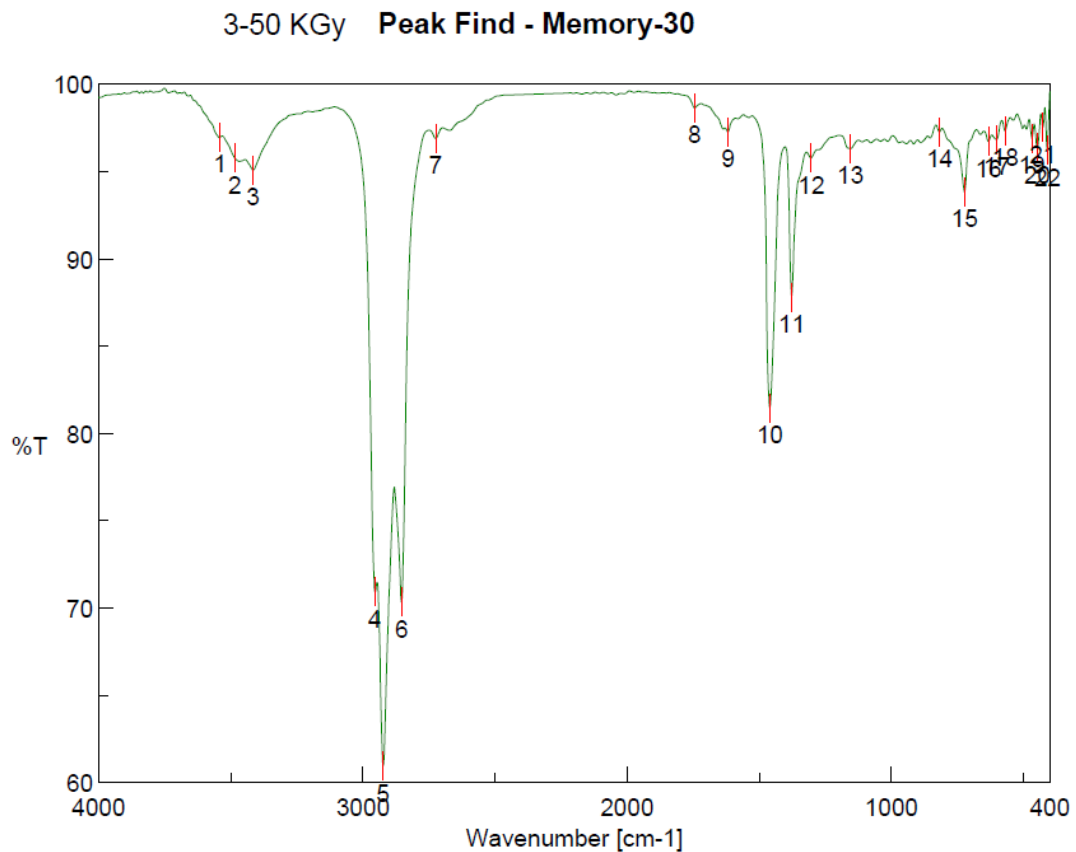
يلاحظ: ظهور قمة N-H عند 3234.04 cm^{-1} (أمينات) غير متوقع وقد يكون ناتجًا عن تفاعلات إشعاعية مع مكونات الزيت أو تلوث خارجي.

7-3-2 نتائج اختبارات العينة الثالثة التشعيع عند جرعة 50KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (6-7) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص المدروسة، والشكل (7-7) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-7) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغراي

العامل المقاس Factor	العينة الثالثة الجرعة 50 KGy
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.053
الكثافة Density g/ml 20 C	0.814
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.07
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	56



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:41 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:40 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (7-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 50 كيلوغرام

7-3-3-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.294% إلى 0.053% بعد التشعيع، وهو انخفاض كبير يشير إلى تقليل الرطوبة الحرة لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304) (20).

التحليل الطيفي: زيادة شدة قمم (O-H) عند 3540.67 cm^{-1} و 3484.74 cm^{-1} من (95-97%) تشير إلى تحول الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مرتبطة (الكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية) التفسير: التشعيع حفز تفاعلات أكسدة حولت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية، مما يفسر ارتفاع شدة الذروات الطيفية رغم انخفاض الرطوبة المُقاس.

7-3-3-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0056 mgKOH/g إلى 0.07 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1745.26 cm^{-1} (كيتونات/أحماض) و C-O عند 1155.15 cm^{-1} (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشعيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة.

7-3-3-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.837 g/ml إلى 0.814 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH₃/CH₂) .

ظهور قمة C=C عند 1617.98 cm^{-1} يشير إلى تكوين ألكينات غير مشبعة نتيجة تفكك الروابط المشبعة.

7-3-3-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (60 KV) إلى (56 KV) انخفاض ملحوظ رغم تحسن الرطوبة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: على الرغم من انخفاض الرطوبة، فإن تراكم الشوائب القطبية (كالكحولات وكالإثيرات) الناتجة عن الأكسدة يُقلل من كفاءة العزل الكهربائي. التغيرات الهيكلية (مثل تكوين الألكينات) في الجزيئات قد تؤدي إلى تكوين مسارات موصلة دقيقة.

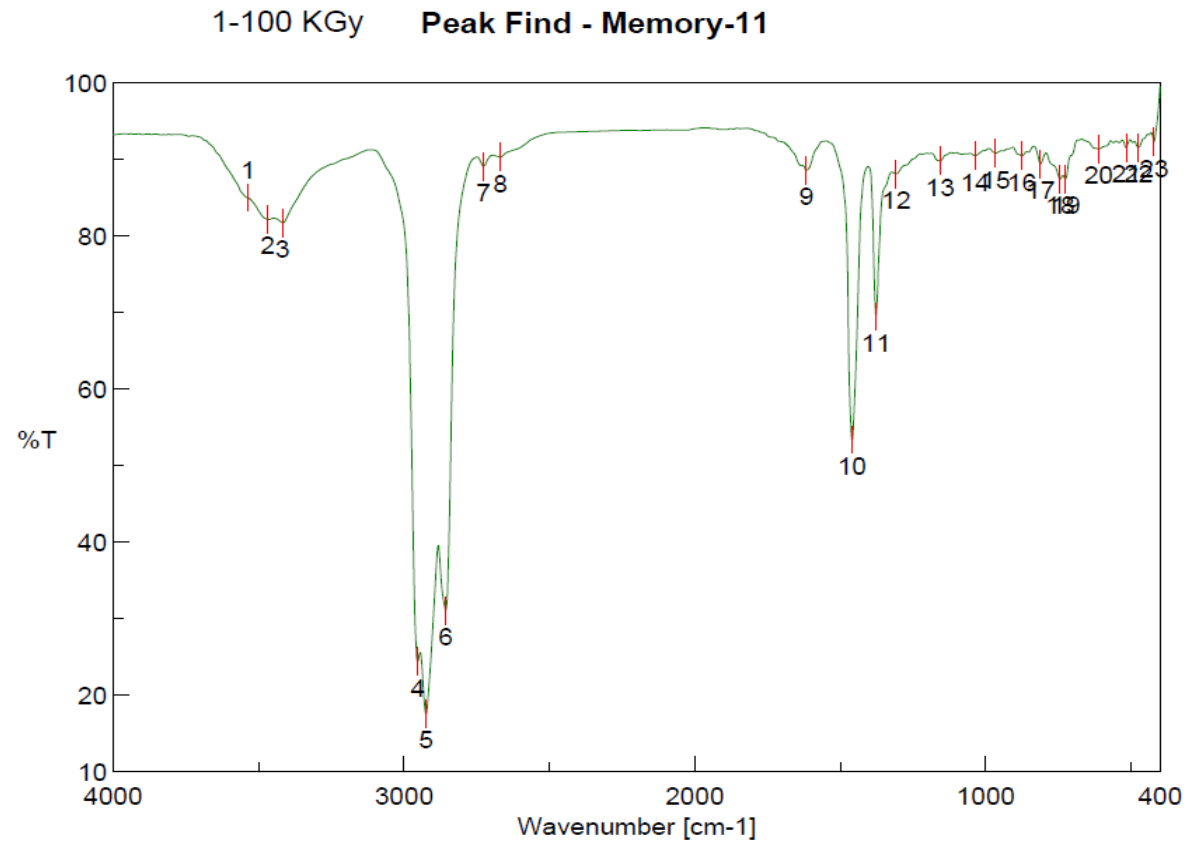
7-4 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 100KGy:

7-4-1 نتائج اختبارات العينة الأولى التشعيع عند جرعة 100KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-8) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص المدروسة، والشكل (7-8) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-8) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغرام

العامل المقاس Factor	العينة الأولى 100 KGy الجرعة
محتوى الرطوبة Content%Moisture	0.116
الكثافة g/ml Density 20°C	0.855
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.116
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	33



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 12:58 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 12:57 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (8-7) التحليل الطيفي للعينة الأولى بعد التشعيع جرعة 100 كيلو غرام

7-4-1-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.927% إلى 0.116% ، وهو تحسن كبير يشير إلى تقليل الرطوبة الحرة ، لكنها بقيت مرتفعة نسبيًا مقارنة بالمعايير المعتمدة دوليًا (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور قمم (O-H) عند 3536.81 cm^{-1} و 3469.31 cm^{-1} شدة (81-85%) يدل على تحول الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مرتبطة (كالكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية).

التفسير: التشيع حفز تفاعلات أكسدة حولت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية، مما يفسر ارتفاع الشدة الطيفية رغم انخفاض الرطوبة المقاس.

7-4-1-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0561 mgKOH/g إلى 0.116 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1616.06 cm^{-1} (كيتونات/أحماض) و C-O عند 1157.08 cm^{-1} (إيثرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشيع يولد جذورًا حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة.

7-4-1-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.869 g/ml إلى 0.855 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH₂/CH₃). ظهور قمة C≡C عند 2669 cm^{-1} (أسيتيلين) يشير إلى تفكك الروابط المشبعة وتكوين مركبات غير مشبعة عالية التفاعلية.

7-4-1-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (36 KV) إلى (33 KV) انخفاض ملحوظ رغم تحسن الرطوبة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

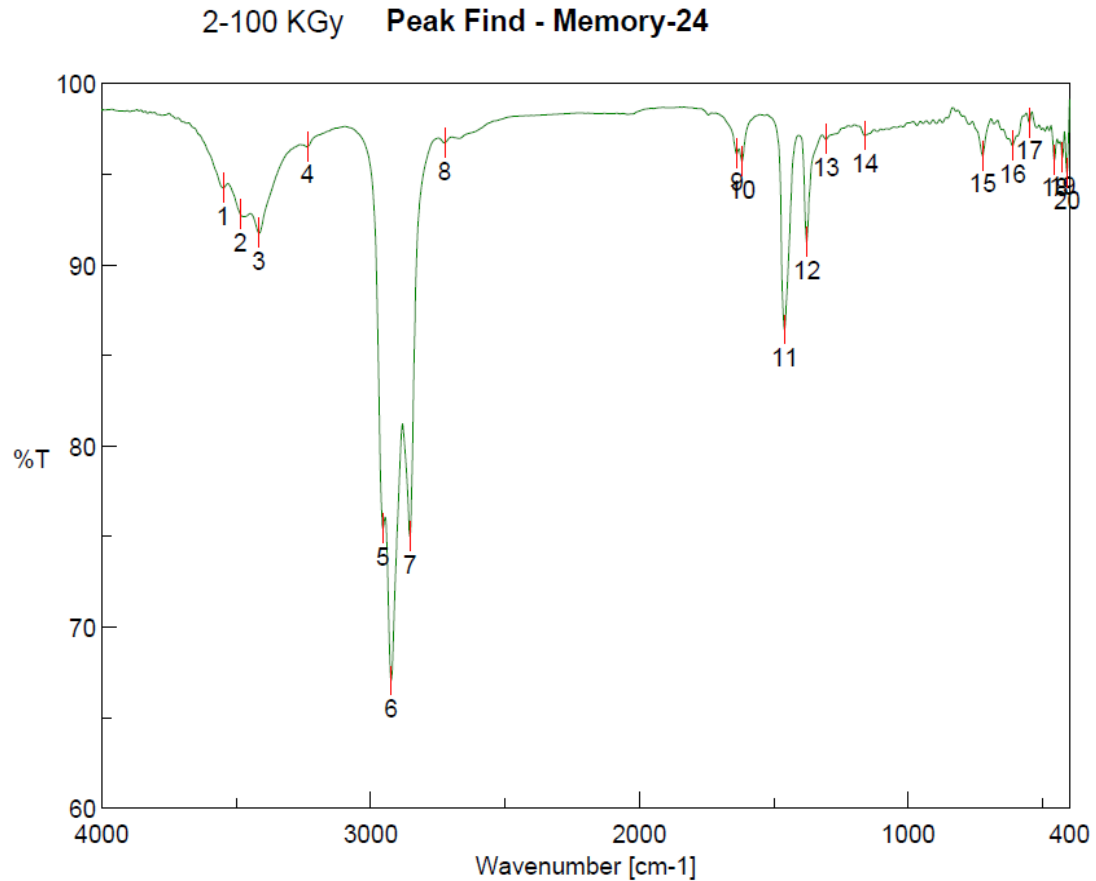
التفسير: على الرغم من انخفاض الرطوبة، فإن تراكم الشوائب القطبية (كالكحولات والاحماض) وتكوين مركبات غير مشبعة (مثل الأسيتيلين) تُضعف الخواص العازلة للزيت. التغيرات الهيكلية مثل تكوين حلقات كربونية صغيرة عند (966 cm^{-1}) قد تخلق مسارات موصلة دقيقة.

7-4-2 نتائج اختبارات العينة الثانية التشعيع عند جرعة 100KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-9) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة، والشكل (7-9) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-9) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغراي

العامل المقاس Factor	العينة الثانية 100 KGray الجرعة
محتوى الرطوبة Moisture Content%	0.038
الكثافة g/ml Density 20°C	0.812
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.168
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	51



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:22 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:21 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (9-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 100 كيلو غراي

7-4-2-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.294% إلى 0.038% ، وهو انخفاض كبير يشير إلى تقليل الرطوبة الحرة، لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H عند 3548.38 cm^{-1} و 3484.74 cm^{-1} شدة (92-94%) يدل على تحول الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مرتبطة (كالكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية).

التفسير: التشعيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُرتبطة كيميائياً، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H هذه المركبات تُثَبِّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من الرطوبة الحرة ولكن يزيد من القطبية.

7-4-2-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0314 mgKOH/g إلى 0.168 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1637.27 cm^{-1} (كيتونات/أحماض) و C-O عند 1160.94 cm^{-1} (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشعيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة.

7-4-2-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.829 g/ml إلى 0.812 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور قمة $\text{C}\equiv\text{C}$ عند 2724.92 cm^{-1} (أسيتيلين) يشير إلى تفكك الروابط المشبعة وتكوين مركبات غير مشبعة عالية التفاعلية، فقدان الهيدروكربونات يقلل من الاستقرار الحراري والكهربائي للزيت.

7-4-2-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (55 KV) إلى (51 KV) انخفاض ملحوظ رغم تحسن الرطوبة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: على الرغم من انخفاض الرطوبة، فإن تراكم الشوائب القطبية (الكحولات والاحماض) تُضعف الخواص العازلة للزيت. تكوين مركبات غير مشبعة (مثل الأسيتيلين) قد تخلق مسارات موصلة دقيقة.

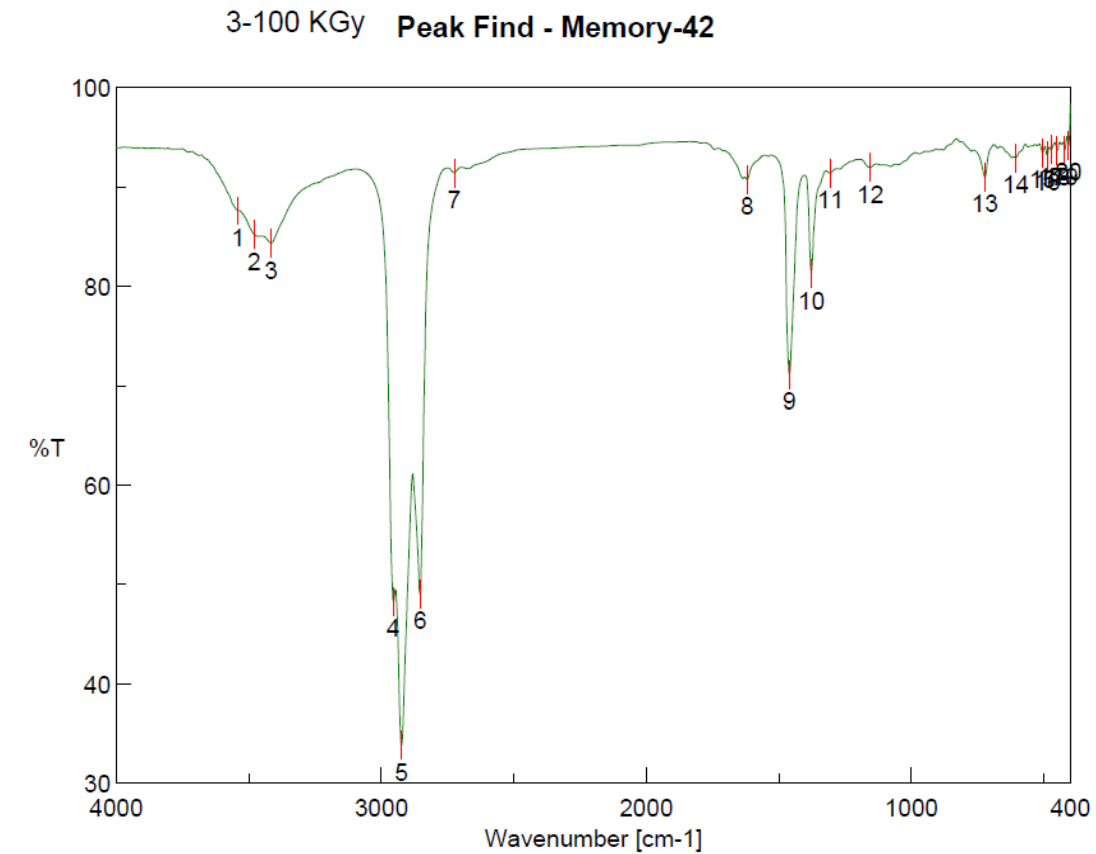
يلاحظ: قمة N-H عند 3234.04 cm^{-1} (أminات) قد تكون ناتجة عن تفاعلات إشعاعية مع النيتروجين الجوي أو تلوث خارجي.

7-4-3 نتائج اختبارات العينة الثالثة التشعيع عند جرعة 100KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (10-7) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص المدروسة، والشكل (10-7) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-10) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص بعد التشعيع جرعة 100 كيلوغراي

العامل المقاس Factor	العينة الثالثة الجرعة 100 KGray
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.048
الكثافة Density g/ml 20°C	0.825
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.04
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	53



[Comments]
 Sample name
 Comment
 User
 Division
 Company

Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 2:06 PM
 Data array type Linear data array
 Horizontal axis Wavenumber [cm-1]
 Vertical axis %T
 Start 399.193 cm-1
 End 4001.57 cm-1
 Data interval 1.92847 cm-1
 Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA
 Serial Number C077661018
 Measurement Date 8/25/2024 2:06 PM
 Light Source Standard
 Detector TGS
 Accumulation 8
 Resolution 8 cm-1
 Zero Filling On
 Apodization Cosine
 Gain Auto (1)
 Aperture Auto (7.1 mm)
 Scanning Speed Auto (2 mm/sec)
 Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (10-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 100 كيلو غراي

7-4-3-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.294% إلى 0.048% ، وهو انخفاض كبير يشير إلى تقليل الرطوبة الحرة، لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H عند 3540.67 cm^{-1} و 3478.95 cm^{-1} (شدة 87.6%) (85.2% يدل على تحول الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مرتبطة (كالكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية)).

التفسير: التشيع حفز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُرتبطة كيميائياً، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H هذه المركبات تُثَبِّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من الرطوبة الحرة ولكن يزيد من القطبية.

7-4-3-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0056 mgKOH/g إلى 0.04 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1619.91 cm^{-1} (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و C-O عند $1305.57, 1155.15 \text{ cm}^{-1}$ (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة.

7-4-3-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.837 g/ml إلى 0.825 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة C=C عند 1619.91 cm^{-1} يؤكد تكوين ألكينات غير مشبعة أو مركبات أروماتية.

4-3-4-7 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (60 KV) إلى (53 KV) انخفاض ملحوظ رغم تحسن الرطوبة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: على الرغم من انخفاض الرطوبة، فإن تراكم الشوائب القطبية (الاسترات والاحماض) تُضعف الخواص العازلة للزيت. تكوين مركبات غير مشبعة (C=C) يرفع التفاعلية مع الرطوبة أو الأكسجين، مما يخلق مسارات موصلة. التغيرات الهيكلية في منطقة ($<1000 \text{ cm}^{-1}$) مثل ذروة C-Cl عند 723.175 cm^{-1} تعكس تشوهات جزيئية تزيد من عدم تجانس المادة.

5-7 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 150KGy:

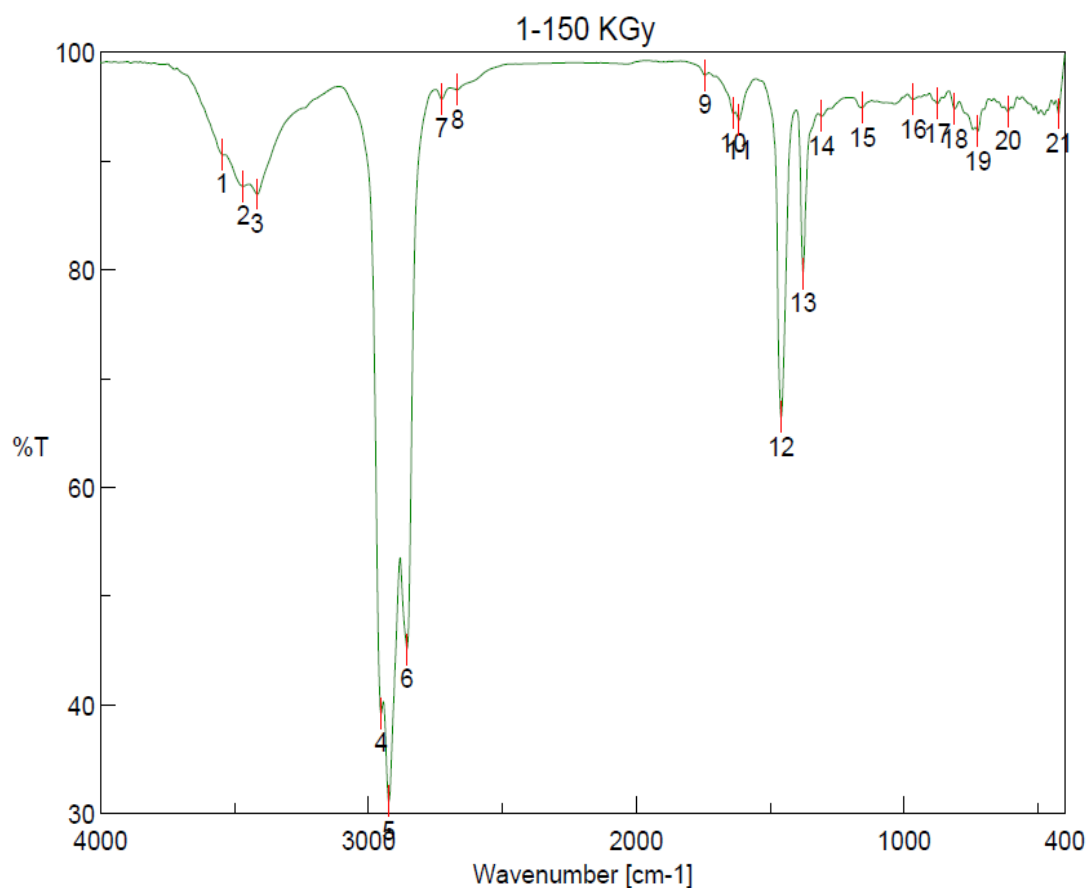
1-5-7 نتائج اختبارات العينة الأولى التشعيع عند جرعة 150KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (11-7) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص المدروسة، والشكل (11-7) التحليل

الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-11) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغراي

العامل المقاس Factor	العينة الأولى الجرعة 150 KGray
محتوى الرطوبة Content%Moisture	0.115
الكثافة g/ml Density 20°C	0.858
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.224
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	28



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:02 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:02 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (10-7) التحليل الطيفي للعينة الأولى بعد التشعيع جرعة 150 كيلو غراي

7-5-1-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.927% إلى 0.115% ، وهو انخفاض كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة، لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H قوية عند 3546.45 cm^{-1} ، 3467.38 cm^{-1} ، و 3415.31 cm^{-1} شدة (90.6% - 86.9%) يدل على تحوّل الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مُرتبطة (كالكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية)

التفسير: التشيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُستقرة، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H. هذه المركبات تُثبّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من التوصيلية السطحية.

7-5-1-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0561 mgKOH/g إلى 0.224 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1743.33 cm^{-1} (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و C-O عند 1155.15 cm^{-1} (إيثرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشيع يولد جذورًا حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة يُضعف الخصائص العازلة.

7-5-1-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.869 g/ml إلى 0.858 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة $\text{C}\equiv\text{C}$ عند 2667.07 cm^{-1} (أسيثيلين) يؤكد تكوين مركبات غير مشبعة عالية النفاذية.

7-5-1-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (36 KV) إلى (28 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ليست ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: زيادة المركبات القطبية مثل (الإسترات والأحماض) تزيد من التوصيلية الكهربائية.

تكوين مركبات غير مشبعة ($\text{C}\equiv\text{C}$) وحلقات أروماتية يخلق مسارات موصلة دقيقة.

التشوهات الهيكلية تُضعف التماسك الجزيئي وتزيد من عدم تجانس المادة.

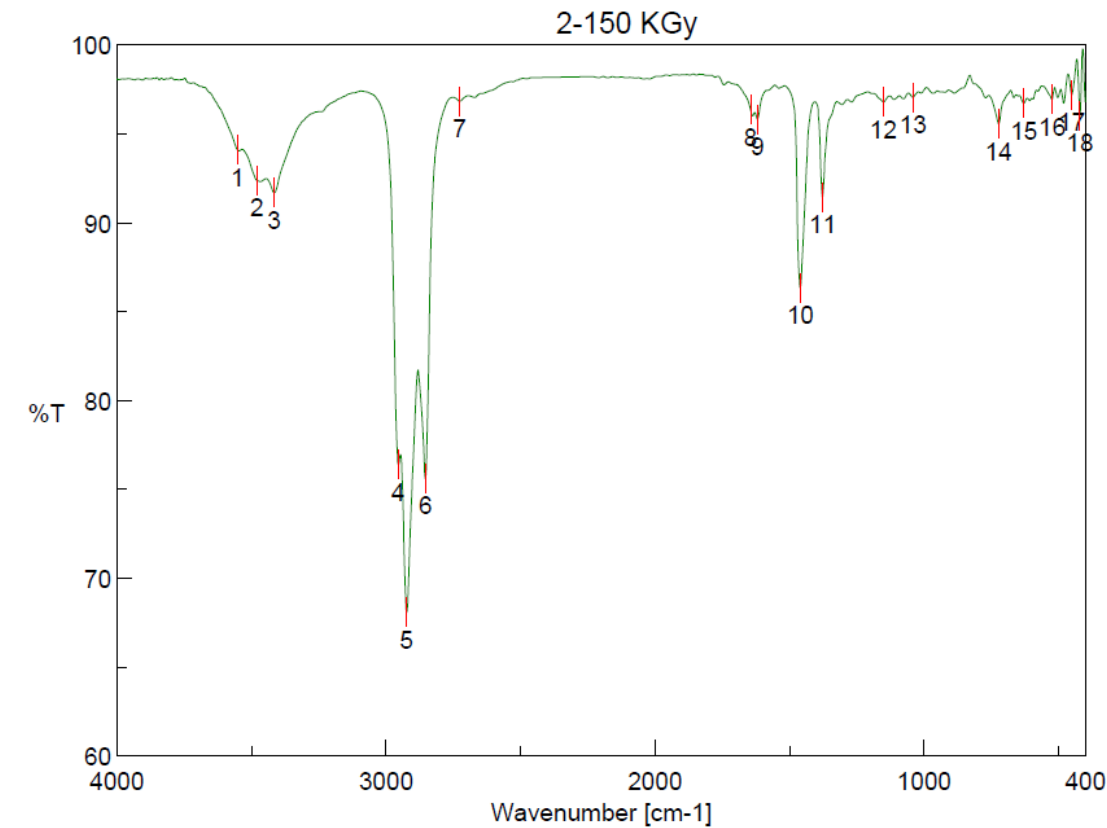
7-5-2 نتائج اختبارات العينة الثانية التشعيع عند جرعة 150Kgy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-12) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة، والشكل (7-12) التحليل

الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-12) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغرام

العامل المدروس Factor	العينة الثانية الجرعة 150KGray
محتوى الرطوبة Content%Moisture	0.059
الكثافة g/ml Density 20°C	0.808
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.112
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	34



[Comments]

Sample name
Comment
User
Division
Company

Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:07 PM
Data array type Linear data array
Horizontal axis Wavenumber [cm-1]
Vertical axis %T
Start 399.193 cm-1
End 4001.57 cm-1
Data interval 1.92847 cm-1
Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA
Serial Number C077661018
Measurement Date 8/25/2024 1:07 PM
Light Source Standard
Detector TGS
Accumulation 8
Resolution 8 cm-1
Zero Filling On
Apodization Cosine
Gain Auto (1)
Aperture Auto (7.1 mm)
Scanning Speed Auto (2 mm/sec)
Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (12-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 150 كيلو غراي

7-5-2-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.230% إلى 0.059% ، وهو تحسن كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة، لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروة O-H عند 3552.24 cm^{-1} شدة (94.1%) وذروة أخرى عند 3415.31 cm^{-1} شدة (91.7%) يدل على تحوّل الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مُرتبطة (كالكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية).

التفسير: التشعيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُستقرة، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H. هذه المركبات تُثبّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من التوصيلية السطحية ولكن يزيد من القطبية.

7-5-2-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0314 mgKOH/g إلى 0.112 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1644.98 cm^{-1} (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و C-O عند 1151.29 cm^{-1} (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشعيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة يُضعف الخصائص العازلة.

7-5-2-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.829 g/ml إلى 0.808 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_2/CH_3). ظهور ذروة C=O/C=C عند 1644.98 cm^{-1} يؤكد تكوين مركبات أروماتية أو غير مشبعة.

7-5-2-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (55 KV) إلى (34 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: زيادة المركبات القطبية مثل (الإثيرات والأحماض) تزيد من التوصيلية الكهربائية.

تكوين مركبات أروماتية وغير مشبعة (C=C) يخلق مسارات موصلة داخل المادة.

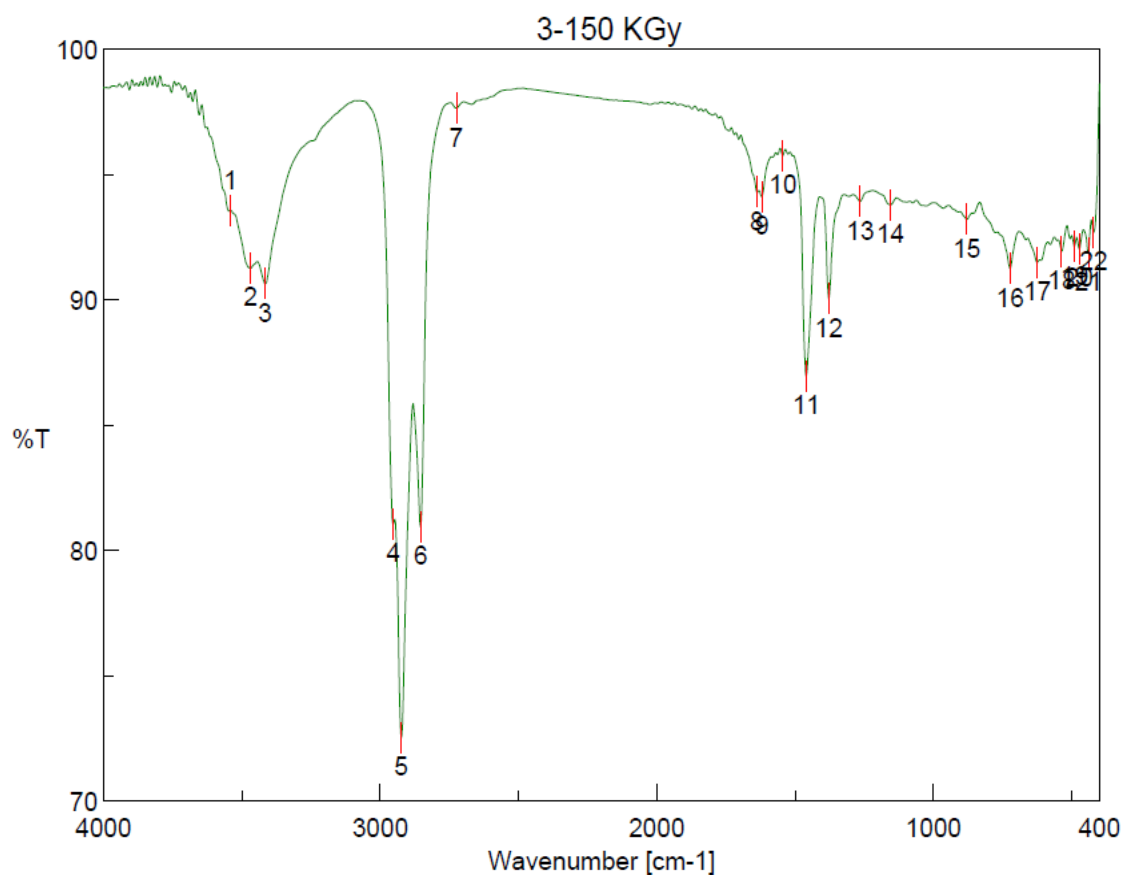
وجود شوائب هالوجينية (C-Cl/C-Br) عند 723.175 cm^{-1} يُضعف الاستقرار الكيميائي والعزل الكهربائي.

7-5-3 نتائج اختبارات العينة الثالثة التشعيع عند جرعة 150KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-13) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص المدروسة، والشكل (7-13) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-12) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص بعد التشعيع جرعة 150 كيلوغرام

العامل المدروس Factor	العينة الثالثة 150 KGray الجرعة
محتوى الرطوبة Content%Moisture	0.061
الكثافة g/ml Density 20°C	0.821
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.05
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	38



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:50 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:49 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (7-12) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 150 كيلو غرام

7-5-3-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.294% إلى 0.061% ، وهو تحسن كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H قوية عند 3540.67 cm^{-1} و 3469.31 cm^{-1} (شدة 93.6%) (91.3% يدل على تحوّل الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مُرتبطة (الكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية)).

التفسير: التشيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُستقرة، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H هذه المركبات تُثبّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من التوصيلية السطحية ولكن يزيد من القطبية.

7-5-3-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.00561 mgKOH/g إلى 0.05 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1639.2 cm^{-1} (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و C-O عند $1155.15, 1265.07 \text{ cm}^{-1}$ (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة يُضعف الخصائص العازلة.

7-5-3-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.837 g/ml إلى 0.821 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة C=C عند 1619.91 cm^{-1} يؤكد تكوين مركبات أروماتية أو غير مشبعة.

7-5-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (60 KV) إلى (38 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: زيادة المركبات القطبية مثل (الإسترات والأحماض) تزيد من التوصيلية الكهربائية.

تكوين مركبات غير مشبعة (C=C) وحلقات أروماتية كما في منطقة ($1700-1500\text{ cm}^{-1}$) يخلق مسارات موصلة دقيقة. التشوهات الهيكلية في منطقة ($<1000\text{ cm}^{-1}$) مثل ذروة C-Cl عند 879.381 cm^{-1} تعكس تشوهات جزيئية تزيد من عدم تجانس المادة.

7-6 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 200K Gy:

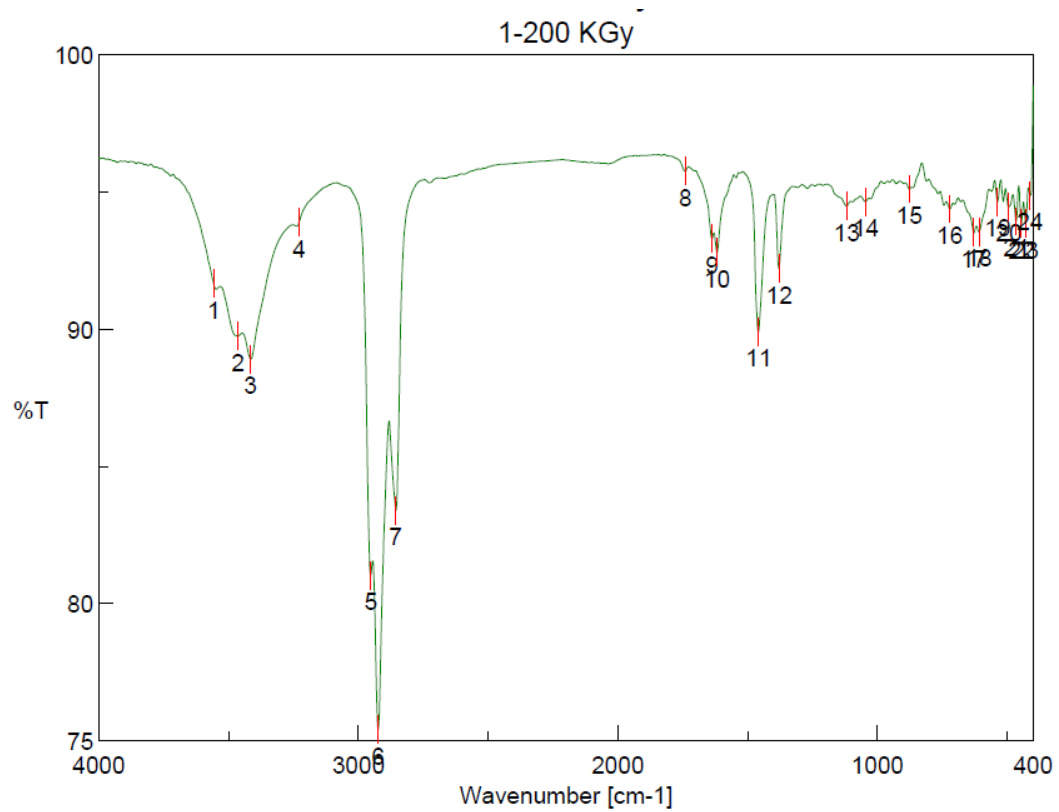
7-6-1 نتائج اختبارات العينة الأولى التشعيع عند جرعة 200K Gy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-14) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص المدروسة، والشكل (7-14) التحليل

الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-14) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغراي

العامل المدروس Factor	العينة الأولى الجرعة 200 KGray
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.112
الكثافة Density g/ml 20°C	0.853
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.214
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	26



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 12:43 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 12:41 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (14-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 200 كيلو غراي

7-6-1-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفضت قيمتها من 0.927% إلى 0.112% وهو تحسن كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور قمم عند 3558.02 ، 3463.53 و 3415.31 cm^{-1} روابط (O-H) يشير إلى وجود مركبات مثل الأحماض الكربوكسيلية أو الكحولات. انخفاض الرطوبة قد يرتبط بتبخر الماء أو تفكك هذه المركبات المؤكسدة تحت تأثير التشعيع، مما يقلل من المحتوى المائي.

التفسير: التشعيع تسبب في أكسدة المركبات العضوية، مما أدى إلى تكوين مركبات قطبية (مثل الأحماض) تتفاعل مع الماء وتقلل من الرطوبة المتبقية.

7-6-1-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0561 mgKOH/g إلى 0.214 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1739.48 cm^{-1} (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و C-O عند 1118.51 cm^{-1} (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشعيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة يُضعف الخصائص العازلة.

7-6-1-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.869 g/ml إلى 0.853 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة C=C عند 1617.98 cm^{-1} يؤكد تكوين مركبات أروماتية أو غير مشبعة.

7-6-1-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (36 KV) إلى (26 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ليست ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: فقدان الهيكل الجزيئي الأصلي وتراكم المركبات القطبية (مثل الأمينات والأحماض) يضعف الخصائص العازلة للزيت، مما يقلل من توتر الانهيار. التغيرات في منطقة بصمة الإصبع ($<1000\text{ cm}^{-1}$) تشير إلى تكوين حلقات أروماتية ومركبات متقارنة، مما يقلل من الاستقرار الكهربائي.

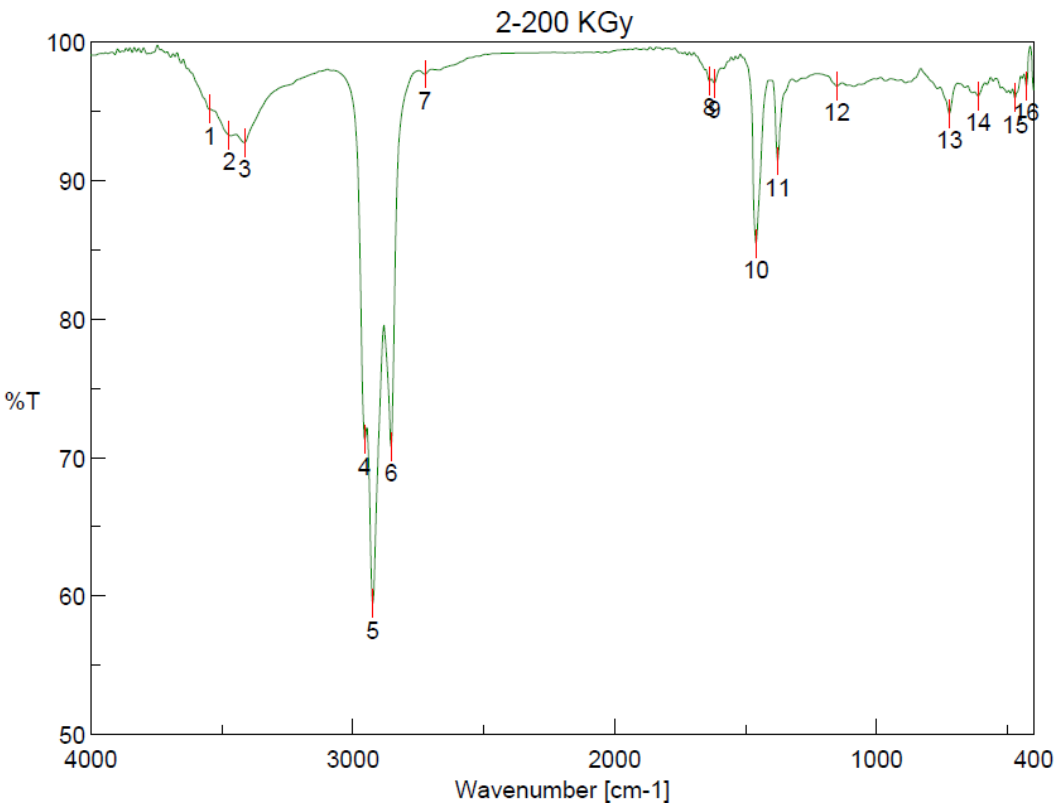
يلاحظ: ظهور ذروة N-H عند 3228.25 cm^{-1} يشير إلى تكوين أمينات أو مركبات نيتروجينية ناتجة عن التنشيط الإشعاعي.

7-6-2 نتائج اختبارات العينة الثانية التشعيع عند جرعة 200KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-15) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة، والشكل (7-15) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-15) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغراي

العامل المقاس Factor	العينة الثانية الجرعة 150KGray
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.063
الكثافة Density g/ml 20°C	0.808
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.112
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	27



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:27 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:27 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (15-7) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 200 كيلو غراي

7-6-2-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.230% إلى 0.059% ، وهو تحسن كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H قوية عند 3552.24 cm^{-1} و 3415.31 cm^{-1} (شدة 91.7%) (94.1% يدل على تحوّل الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مُرتبطة (كالكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية).

التفسير: التشعيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُستقرة، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H هذه المركبات تُثبّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من التوصيلية السطحية ولكن يزيد من القطبية.

7-6-2-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0314 mgKOH/g إلى 0.112 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند 1644.98 cm^{-1} (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و C-O عند 1151.29 cm^{-1} (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشعيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة يُضعف الخصائص العازلة.

7-6-2-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.829 g/ml إلى 0.808 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة $\text{C}=\text{O} / \text{C}=\text{C}$ عند 1644.98 cm^{-1} يؤكد تكوين مركبات أروماتية أو غير مشبعة.

7-6-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (55 KV) إلى (34 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

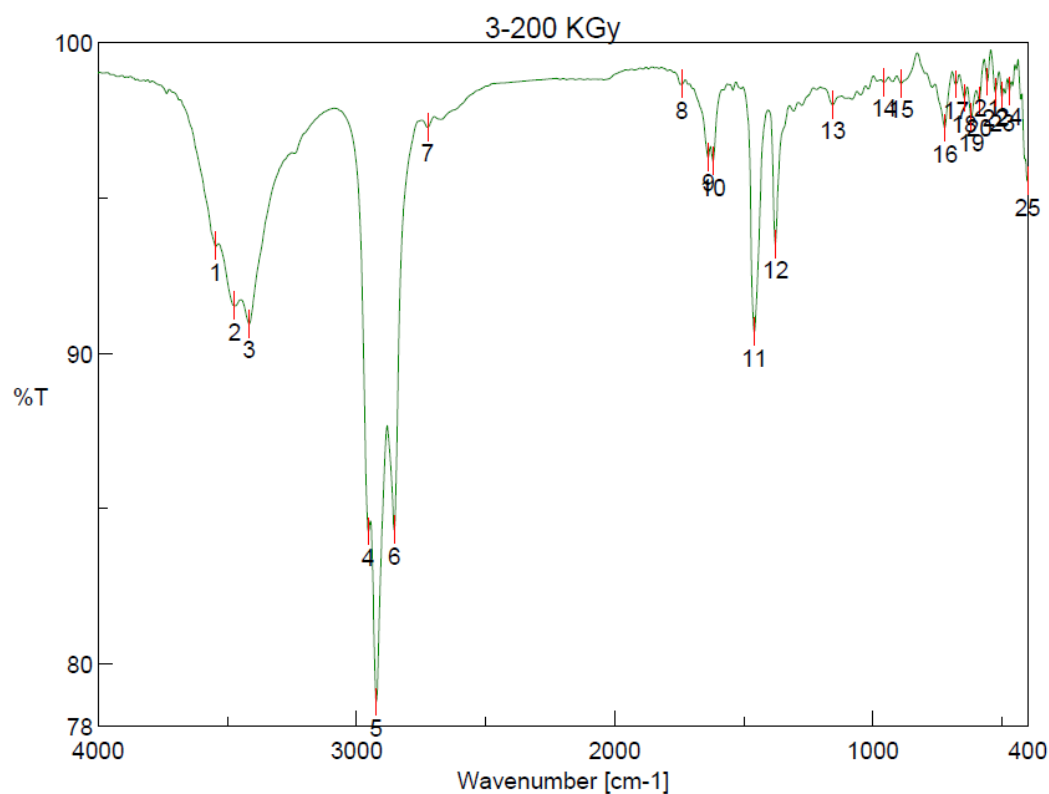
التفسير: الأحماض الكربوكسيلية ($\text{C}=\text{O}$) والإثيرات ($\text{C}-\text{O}$) تزيد من التوصيلية الكهربائية، مما يُضعف العزل. الحلقات الأروماتية ($\text{C}=\text{C}$) تُنشئ مسارات موصلة للإلكترونات داخل المادة. ظهور ذروة $\text{C}-\text{Cl}/\text{C}-\text{Br}$ عند 723.175 cm^{-1} يدل على تكوين مركبات كلورية عضوية مثل (كلوريد الفينيل)، والتي تُضعف الاستقرار الكيميائي والكهربائي.

7-6-3 نتائج اختبارات العينة الثالثة التشعيع عند جرعة 200KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-16) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص المدروسة، والشكل (7-16) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-16) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص بعد التشعيع جرعة 200 كيلوغرام

العامل المدروس Factor	العينة الثالثة الجرعة 200 KGy
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.085
الكثافة Density g/ml 20°C	0.820
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.09
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	34



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:32 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:32 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (16-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 200 كيلو غرامي

7-6-3-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.294% إلى 0.085% ، وهو تحسن كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H قوية عند 3546.45 cm^{-1} و 3415.31 cm^{-1} (شدة 91%) (93.5% يدل على تحوّل الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مُرتبطة (كالكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية).

التفسير: التشعيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُستقرة، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H هذه المركبات تُثبّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من التوصيلية السطحية ولكن يزيد من القطبية.

7-6-3-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.294% إلى 0.085% ، وهو تحسن كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H قوية عند 3546.45 cm^{-1} و 3415.31 cm^{-1} (شدة 91%) (93.5% يدل على تحوّل الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مُرتبطة (كالكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية).

التفسير: التشعيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُستقرة، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H هذه المركبات تُثبّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من التوصيلية السطحية ولكن يزيد من القطبية.

7-3-6-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.837 g/ml إلى 0.820 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة C=C عند 1637.27 cm^{-1} يؤكد تكوين مركبات أروماتية أو غير مشبعة.

7-3-6-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (60 KV) إلى (34 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: ذروة C-Cl عند 956.52 cm^{-1} شدة (99.7%) تُشير إلى تكوين (مركبات كلورية عضوية) مثل كلوريد الفينيل. ذروات C=C و C=O العالية تدل على تراكم مركبات قطبية وغير مشبعة. المركبات القطبية (أحماض، إسترات) تزيد من التوصيلية الكهربائية. الحلقات الأروماتية (C=C) تُنشئ مسارات موصلة للإلكترونات. المركبات الكلورية (C-Cl) تُسبب عدم استقرار كيميائي وتُضعف العزل الكهربائي.

7-7 نتائج اختبارات العينات بعد التشعيع عند الجرعة 250KGy:

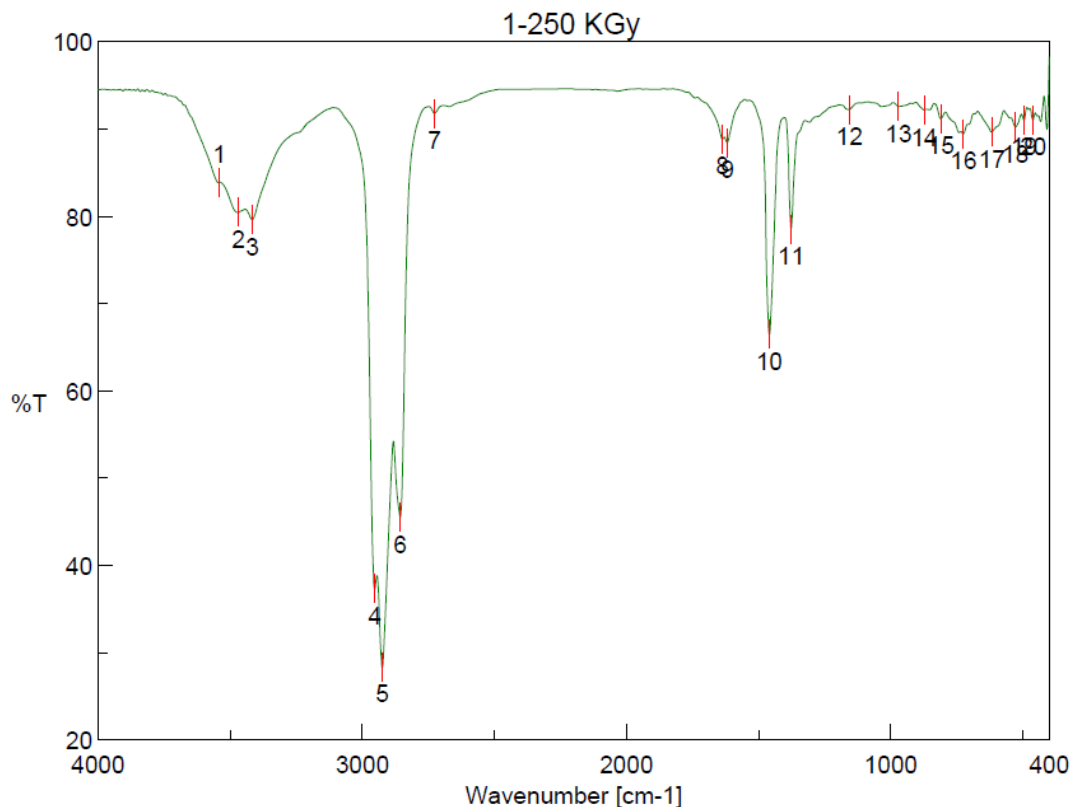
7-7-1 نتائج اختبارات العينة الأولى التشعيع عند جرعة 250KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-17) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص المدروسة، والشكل (7-17) التحليل

الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-17) نتائج اختبارات العينة الأولى للخصائص بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغراي

العامل المدروس Factor	العينة الأولى الجرعة 250 KGray
محتوى الرطوبة Content%Moisture	0.117
الكثافة g/ml Density 20°C	0.857
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.126
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	22



[Comments]

Sample name
Comment
User
Division
Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 12:52 PM

Data array type Linear data array
Horizontal axis Wavenumber [cm-1]
Vertical axis %T
Start 399.193 cm-1
End 4001.57 cm-1
Data interval 1.92847 cm-1
Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA
Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 12:52 PM

Light Source Standard
Detector TGS
Accumulation 8
Resolution 8 cm-1
Zero Filling On
Apodization Cosine
Gain Auto (2)
Aperture Auto (7.1 mm)
Scanning Speed Auto (2 mm/sec)
Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (17-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 250 كيلو غراي

7-1-7-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.927% إلى 0.117% ، وهو تحسن كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H قوية عند cm^{-1} (3469.31, 3415.31 , 3540.67) شدة (83.9-80.4-79.6) % يدل على تحوّل الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مُرتبطة (الكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية).

التفسير: التشعيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُستقرة، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H هذه المركبات تُثبّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من التوصيلية السطحية ولكن يزيد من القطبية.

7-1-7-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0561 mgKOH/g إلى 0.126 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند cm^{-1} 1637.27 (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و C-O عند cm^{-1} 1157.08 (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشعيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة يُضعف الخصائص العازلة.

7-1-7-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.869 g/ml إلى 0.857 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة C-H الدهيدية عند 2726.85 cm^{-1} يدل على تكوين مركبات متطايرة.

7-1-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (36 KV) إلى (22 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ليست ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: ذروات $\text{C}=\text{O}/\text{C}=\text{C}$ عند $1617.98, 1637.27 \text{ cm}^{-1}$ تُشير إلى تراكم مركبات قطبية وغير مشبعة. المركبات الكلورية ($\text{C}-\text{Cl}$) تُضعف الاستقرار الكيميائي والعزل الكهربائي. المركبات القطبية (أحماض، إسترات) تزيد من التوصيلية الكهربائية. الحلقات الأروماتية ($\text{C}=\text{C}$) تُنشئ مسارات موصلة للإلكترونات. المركبات الكلورية ($\text{C}-\text{Cl}$) تُسبب عدم استقرار كيميائي وتُضعف العزل الكهربائي.

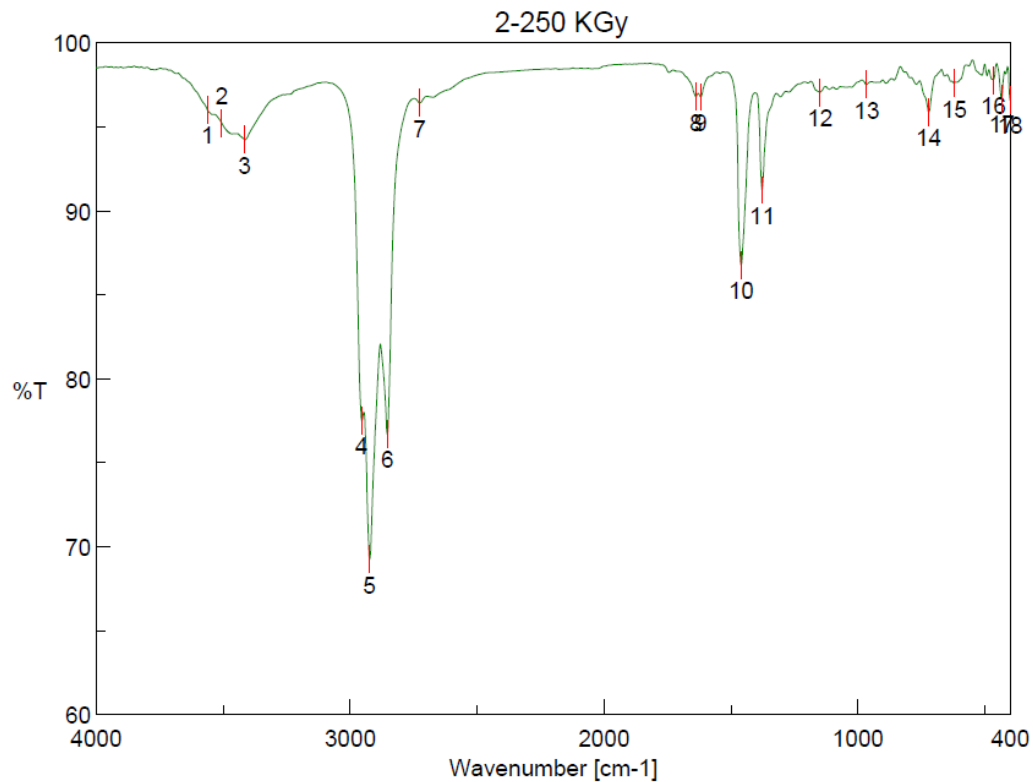
7-2-7 نتائج اختبارات العينة الثانية التشعيع عند جرعة 250KGy ومناقشتها:

يمثل الجدول (7-18) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص المدروسة، والشكل (7-18) التحليل

الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (7-18) نتائج اختبارات العينة الثانية للخصائص بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغراي

العامل المدروس Factor	العينة الثانية 250 KGray الجرعة
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.054
الكثافة Density g/ml 20°C	0.812
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.168
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	25



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:17 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:17 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (7-18) التحليل الطيفي للعينة الثانية بعد التشعيع جرعة 250 كيلو غراي

7-2-1 محتوى الرطوبة:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (36 KV) إلى (22 KV) يُشير إلى تدهور حاد في

الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ليست ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: ذروات $C=O/C=C$ عند $1617.98, 1637.27 \text{ cm}^{-1}$ تُشير الى تراكم مركبات قطبية وغير مشبعة. المركبات الكلورية ($C-Cl$) تُضعف الاستقرار الكيميائي والعزل الكهربائي. المركبات القطبية (أحماض، إسترات) تزيد من التوصيلية الكهربائية. الحلقات الأروماتية ($C=C$) تُنشئ مسارات موصلة للإلكترونات. المركبات الكلورية ($C-Cl$) تُسبب عدم استقرار كيميائي وتُضعف العزل الكهربائي.

2-2-7-7 الأُسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.0314 mgKOH/g إلى 0.168 mgKOH/g ، مما يشير إلى أُسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم $C=O$ عند 1639.2 cm^{-1} (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و $C-O$ عند 1149.37 cm^{-1} (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أُسدة.

التفسير: التشعيع يولد جذورًا حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة يُضعف الخصائص العازلة.

3-2-7-7 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.829 g/ml إلى 0.812 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة $C-H$ عند 2923.56 cm^{-1} يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة $C=C$ عند 1639.2 cm^{-1} يُشير إلى تكوين حلقات أروماتية مثل البنزين.

4-2-7-7 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (55 KV) إلى (25 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ليست ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

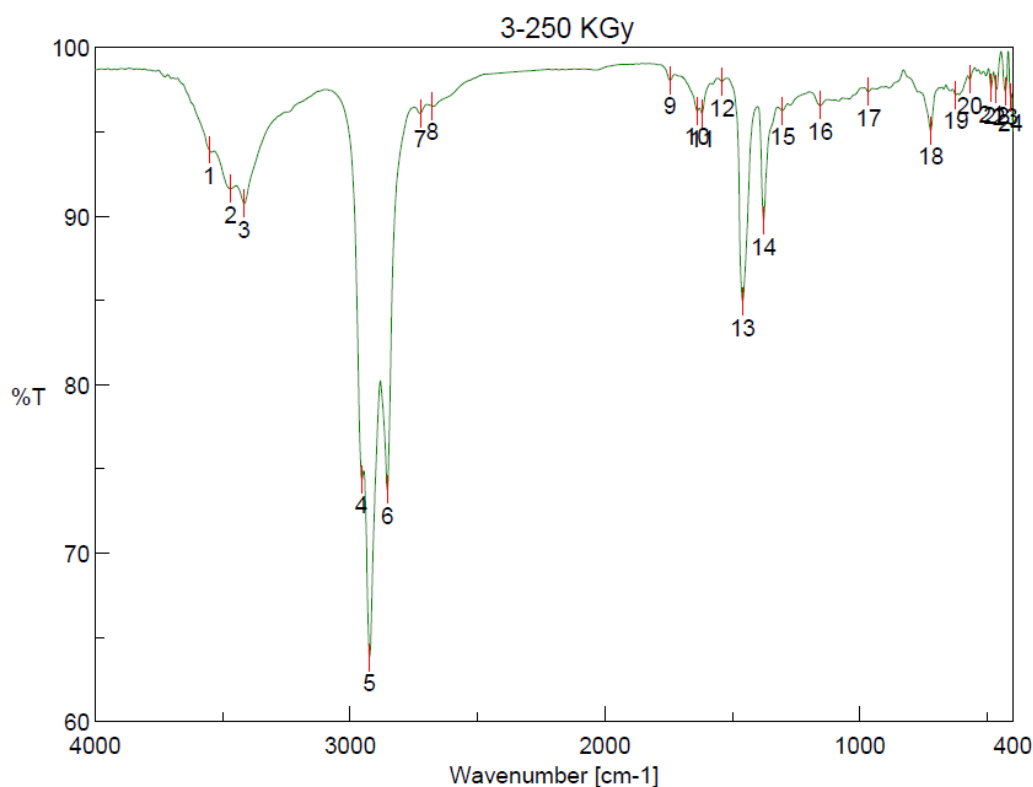
التفسير: ذروة C-X عند 466.689 cm^{-1} تُشير إلى تكوين (مركبات كلورية عضوية) مثل كلوريد الفينيل أو ثنائي الفينيل متعدد الكلور. ذروة C=C العالية (1639.2 cm^{-1}) تدل على تراكم الحلقات الأروماتية. المركبات الكلورية (C-Cl) تُزيد من القطبية وتُضعف الاستقرار الكهربائي. الحلقات الأروماتية (C=C) تُنشئ مسارات موصلة للإلكترونات، مما يسرع من انهيار التوتر الكهربائي.

3-7-7 نتائج اختبارات العينة الثالثة التشعيع عند جرعة 200K Gy ومناقشتها:

يمثل الجدول (19-7) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص المدروسة، والشكل (19-7) التحليل الطيفي للعينة المدروسة بعد التشعيع بأشعة غاما.

الجدول (19-7) نتائج اختبارات العينة الثالثة للخصائص بعد التشعيع جرعة 250 كيلوغراي

العامل المدروس Factor	العينة الثالثة 250 KGray الجرعة
محتوى الرطوبة Moisture %Content	0.059
الكثافة Density g/ml 20°C	0.816
الحموضة Acidity mgKOH/g	0.06
توتر الانهيار Breakdown Voltage KV	30



[Comments]

Sample name

Comment

User

Division

Company Damascus Univ

[Detailed Information]

Creation date 8/25/2024 1:44 PM

Data array type Linear data array

Horizontal axis Wavenumber [cm-1]

Vertical axis %T

Start 399.193 cm-1

End 4001.57 cm-1

Data interval 1.92847 cm-1

Data points 1869

[Measurement Information]

Model Name FT/IR-4200typeA

Serial Number C077661018

Measurement Date 8/25/2024 1:44 PM

Light Source Standard

Detector TGS

Accumulation 8

Resolution 8 cm-1

Zero Filling On

Apodization Cosine

Gain Auto (1)

Aperture Auto (7.1 mm)

Scanning Speed Auto (2 mm/sec)

Filter Auto (30000 Hz)

الشكل (19-7) التحليل الطيفي للعينة الثالثة بعد التشعيع جرعة 250 كيلو غراي

7-3-1 محتوى الرطوبة:

النتائج المخبرية: انخفض محتوى الرطوبة من 0.294% إلى 0.059% ، وهو تحسن كبير يُشير إلى تقليل الرطوبة الحرة لكنها بقيت مرتفعة نسبياً مقارنة بالمعايير المعتمدة دولياً (ASTM D6304-20).

التحليل الطيفي: ظهور ذروات O-H قوية عند cm^{-1} (3415.31 , 3469.31 , 3552.24) شدة (93.9-91.6-90.7) % يدل على تحوّل الرطوبة الحرة إلى مركبات هيدروكسيلية مُرتبطة (الكحولات أو الأحماض الكربوكسيلية).

التفسير: التشعيع حفّز تفاعلات أكسدة حوّلت الرطوبة الحرة إلى مركبات قطبية مُستقرة، مما يفسر انخفاض الرطوبة المُقاس رغم ارتفاع الشدة الطيفية لذروات O-H هذه المركبات تُثبّت الماء في شكل روابط كيميائية، مما يقلل من التوصيلية السطحية ولكن يزيد من القطبية.

7-3-2 الأكسدة:

النتائج المخبرية: ارتفعت الحموضة من 0.005 mgKOH/g إلى 0.06 mgKOH/g ، مما يشير إلى أكسدة متقدمة وذلك مقارنة بالمعيار المعتمد (IEC62021).

التحليل الطيفي: ظهور قمم C=O عند cm^{-1} 1745.26 (كيتونات/أحماض كربوكسيلية) و C-O عند cm^{-1} 1303.64 , 1155.15 (إثيرات/كحولات) يؤكد تكوين نواتج أكسدة.

التفسير: التشعيع يولد جذوراً حرة تُسرّع تفكك الهيدروكربونات وتكوين مركبات قطبية، مما يرفع الحموضة يُضعف الخصائص العازلة.

7-3-3 البنية الهيدروكربونية:

النتائج المخبرية: انخفاض الكثافة من 0.837 g/ml إلى 0.816 g/ml وهو مقبول مقارنة بالمعيار (ISO3675)، مما يعكس فقدان الهيدروكربونات الثقيلة.

التحليل الطيفي: انخفاض شدة قمة C-H عند cm^{-1} (2854.13, 2923.56) يدل على تكسير السلاسل الكربونية الطويلة (CH_3/CH_2). ظهور ذروة C=C عند cm^{-1} (1619.91, 1639.2) يُشير إلى تكوين حلقات أروماتية والكينات غير مشبعة.

7-3-4 توتر الانهيار:

النتيجة المخبرية: انخفاض توتر الانهيار من (60 KV) إلى (30 KV) يُشير إلى تدهور حاد في الخصائص العازلة وهي بالمقارنة قيمة ضمن المقبول حسب المعيار (IEC60156).

التفسير: ذروة C-Cl في منطقة ($<1000 \text{ cm}^{-1}$) تُشير إلى تكوين (مركبات كلورية عضوية) مثل كلوريد الفينيل. ذروات C=C العالية cm^{-1} (1619.91, 1639.2) تدل على تراكم الحلقات الأروماتية. المركبات الكلورية (C-Cl) تزيد من القطبية وتُضعف الاستقرار الكهربائي. الحلقات الأروماتية (C=C) تُنشئ مسارات موصلة للإلكترونات، مما يسرع من انهيار التوتر الكهربائي.

7-8 العلاقة بين جرعات التشعيع ومتانة العينات المدروسة والمنهجية المستخدمة:

يعرف الانحدار على أنه أداة إحصائية تقوم ببناء نموذج لتقدير العلاقة بين متغير كمي واحد وهو المتغير التابع ومتغير آخر أو عدة متغيرات مستقلة، مكونة بذلك معادلة توضح من خلالها طبيعة العلاقة بين هذه المتغيرات.

يعد الانحدار متعدد الحدود مفيدًا بشكل خاص في الحالات التي تكون فيها العلاقة بين المتغيرات غير خطية بطبيعتها.

تكمّن الأهداف الرئيسية لاستخدام نموذج الانحدار في بحثنا:

- ✓ تحديد الشكل الأمثل للعلاقة بين جرعة التشعيع والخصائص الكهربائية الزيت المدروس في بحثنا.
- ✓ من خلال الدراسات المرجعية لم يتطرق الباحثون إلى استخدام نموذج الانحدار متعدد الحدود وهو ما تم العمل عليه في بحثنا.

يعطى الشكل العام للانحدار متعدد الحدود كما يلي:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \beta_2 \cdot X^2 + \dots + \beta_n \cdot X^n + \varepsilon \quad (1-7)$$

:حيث تمثل

Y: المتغير التابع (المستهدف).

X: المتغير المستقل (المتحكم به).

معاملات النموذج $\beta_{0,1,2,\dots,n}$

معامل التحديد (R^2). يُحسب كالتالي:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2-7)$$

هي القيم المتوقعة من النموذج $\hat{y}_i$

$\bar{y}$ هو متوسط القيم الفعلية لـ y

يعد معامل التحديد مقياس يستخدم لتقييم جودة ملائمة النموذج للبيانات، حيث يوضح نسبة التباين في

المتغير التابع التي يمكن تفسيرها بواسطة المتغيرات المستقلة في النموذج.

تتراوح قيمة معامل R^2 دائماً بين صفر وواحد، تُعدّ قيمة معامل R^2 التي تبلغ 0.9 أو أعلى جيدة جداً،

وتُعدّ القيمة التي تزيد عن 0.8 جيدة، وقد تُعدّ قيمة 0.6 أو أعلى مرضية في بعض التطبيقات، مع العلم أنه في

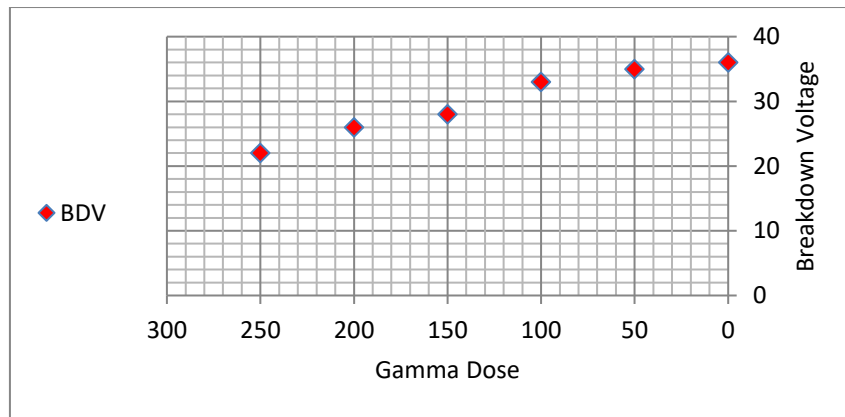
مثل هذه الحالات، قد تكون أخطاء التنبؤ عالية نسبياً. عندما تكون قيمة معامل $R^2 = 0.5$ أو أقل، يُفسّر

الانحدار 50% فقط أو أقل من التباين في البيانات؛ وبالتالي، قد يكون التنبؤ ضعيفاً [70-71].

7-8-1 العينة الأولى :

يمثل الشكل (6-20) تغيرات قيمة جهد الانهيار تبعاً للجرعة المطبقة حتى جرعات تصل الى 250

كيلوغرام.



الشكل (20-6) تغيرات قيمة جهد الانهيار مع الجرعة المطبقة

تشير المعادلة (1) الى العلاقة التي تربط جرعات التشعيع المطبقة مع قيمة جهد انهيار العينة الأولى و

R^2 هي قيمة معامل الارتباط للنموذج المحدد:

$$Y = -0.0001X^2 - 0.0315 X + 36.393 \quad (3-7)$$

$$R^2 = 0.9825$$

حيث تمثل:

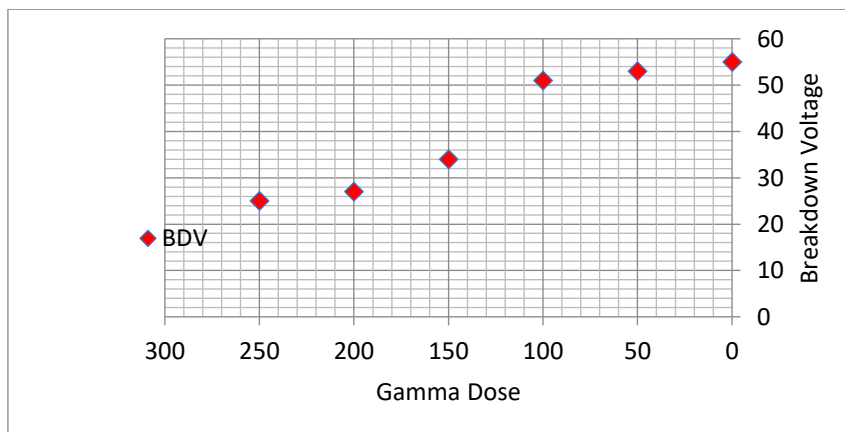
Y : قيمة توتر الانهيار للعينة الاولى كتابع متغير لجرعة الاشعاع.

X : الجرعة الاشعاعية المطبقة كتابع مستقل.

يلاحظ من خلال قيمة معامل الارتباط أن 98.25% من التغير في قيمة توتر الانهيار في الجرعة الاولى هي ناتجة عن الجرعة الاشعاعية المطبقة، مما يشير الى موثوقية النموذج المقترح.

2-8-7 العينة الثانية :

يمثل الشكل (21-6) تغيرات قيمة جهد الانهيار تبعا" للجرعة المطبقة حتى جرعات تصل الى 250 كيلوغراي.



الشكل (21-6) تغيرات قيمة جهد الانهيار مع الجرعة المطبقة

تشير المعادلة (2) الى العلاقة التي تربط جرعات التشعيع المطبقة مع قيمة جهد انهيار العينة الثانية و

R^2 هي قيمة معامل الارتباط للنموذج المحدد:

$$= 7 \cdot 10^{-6} X^3 - 0.0029X^2 + 0.1494X + 54.365 \quad (4-7)Y$$

$$R^2 = 0.9755$$

حيث تمثل:

Y : قيمة توتر الانهيار للعينة الثانية كتابع متغير لجرعة الاشعاع.

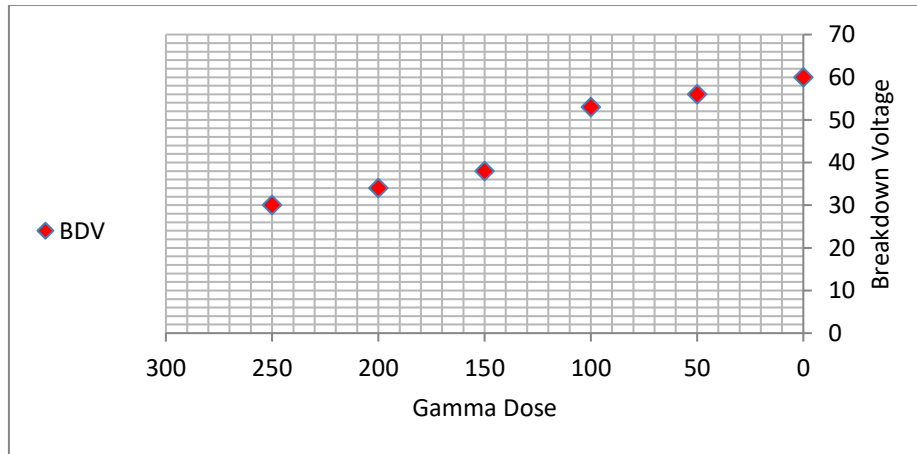
X : الجرعة الاشعاعية المطبقة كتابع مستقل.

يلاحظ من خلال قيمة معامل الارتباط أن 97.55% من التغير في قيمة توتر الانهيار في الجرعة الثانية هي ناتجة عن الجرعة الاشعاعية المطبقة، مما يشير الى موثوقية النموذج المقترح.

7-8-3 العينة الثالثة:

يمثل الشكل (6-21) تغيرات قيمة جهد الانهيار تبعاً للجرعة المطبقة حتى جرعات تصل الى 250

كيلوغراي.



الشكل (6-22) تغيرات قيمة جهد الانهيار مع الجرعة المطبقة

تشير المعادلة (3) الى العلاقة التي تربط جرعات التشعيع المطبقة مع قيمة جهد انهيار العينة الثالثة و

R^2 هي قيمة معامل الارتباط للنموذج المحدد:

$$(5-7)Y = -3 \times 10^{-5} X^2 - 0.1249 X + 61.429$$

$$R^2 = 0.9472$$

حيث تمثل:

Y: قيمة توتر الانهيار للعينة الثالثة كتابع متغير لجرعة الاشعاع.

X: الجرعة الاشعاعية المطبقة كتابع مستقل.

يلاحظ من خلال قيمة معامل الارتباط أن 97.57% من التغير في قيمة توتر الانهيار للجرعة الثالثة

هي ناتجة عن الجرعة الاشعاعية المطبقة، مما يشير الى موثوقية النموذج المقترح.

يبين الجدول (6-20) المقارنة بين النماذج الثلاثة المقترحة باستخدام الانحدار متعدد الحدود للعينات

المدرسة حيث تمت المقارنة من ناحية درجة النموذج وحساسية العينة المدروسة للإشعاع والموثوقية.

الجدول (7-20) مقارنة بين النماذج المقترحة للعينات المدروسة

المعيار	العينة الأولى	العينة الثانية	العينة الثالثة
درجة النموذج	تربيعي	تكعيبي	تكعيبي
جهد الانهيار الابتدائي	36.393 kV	54.365 kV	59.651 kV
حساسية الاشعاع	الأعلى (معاملات كبيرة)	متوسطة	الأقل
موثوقية النموذج	0.9825	0.9755	0.9757

7-9 التنبؤ بقيمة توتر انهيار الزيت العازل المشع باستخدام تقنيات الذكاء الصناعي:

تشير الدراسات المرجعية حديثاً الى انه تم دمج تقنية تحليل الغازات الذائبة (DGA) مع بعض خوارزميات الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence Algorithm) لتشكيل ما يسمى بالتقنيات المركبة التنبؤية المعتمدة على تحليل الغاز الذائب للحصول على فهم دقيق لحالة زيت المحولات. حيث تشير الدراسات الى أن الدقة الإجمالية لهذه التقنيات مقارنة بالتقنيات التقليدية قد بلغت 93.6% [73.72].

في بحثنا وباستخدام تقنيات الذكاء الصناعي (الشبكات العصبونية) تم تدريب النموذج المقترح في المعادلة (1) حيث يلاحظ تطابق بين القيم التجريبية مع التنبؤات مما يشير الى مدى ملاءمة هذا النموذج المقترح للحالة المدروسة.

تكمّن الأهداف الرئيسية لاستخدام الشبكات العصبونية في بحثنا:

- تحسين تفسير النتائج للعلاقة بين جرعة التشعيع والخصائص الكهربائية الزيت المدروس في بحثنا.
- التنبؤ بقيمة توتر الانهيار للزيت المشع ضمن النطاق المدروس في بحثنا بدقة عالية.

7-9-1 كود تدريب النموذج المقترح باستخدام الشبكات العصبونية:

```
% بيانات جرعة التشعيع (المدخلات)
x = 50:1:250;

% حساب بيانات توتر الانهيار لكل نموذج
breakdown1 = -0.0001*x.^2 - 0.0315*x + 36.393;

% تطبيع البيانات لكل نموذج
[input_norm, input_settings] = mapminmax(x);

[breakdown1_norm, breakdown1_settings] =
mapminmax(breakdown1);

% إنشاء ست شبكات عصبية باستخدام newff
net_breakdown1 = newff(input_norm, breakdown1_norm,
[20 10], {'tansig', 'purelin'}, 'trainbr');

% ضبط عدد الدورات التدريبية
nets = { net_breakdown1};
for i = 1:length(nets)
    nets{i}.trainParam.epochs = 1000;
    nets{i}.divideParam.trainRatio = 0.7;
    nets{i}.divideParam.valRatio = 0.15;
    nets{i}.divideParam.testRatio = 0.15;
end

% تدريب الشبكات
net_breakdown1 = train(net_breakdown1, input_norm,
breakdown1_norm);

% اختبار الشبكات على قيم جديدة
x_test = 75:25:225;
x_test_norm = mapminmax('apply', x_test,
input_settings);

y_pred_breakdown1_norm = net_breakdown1(x_test_norm);
```

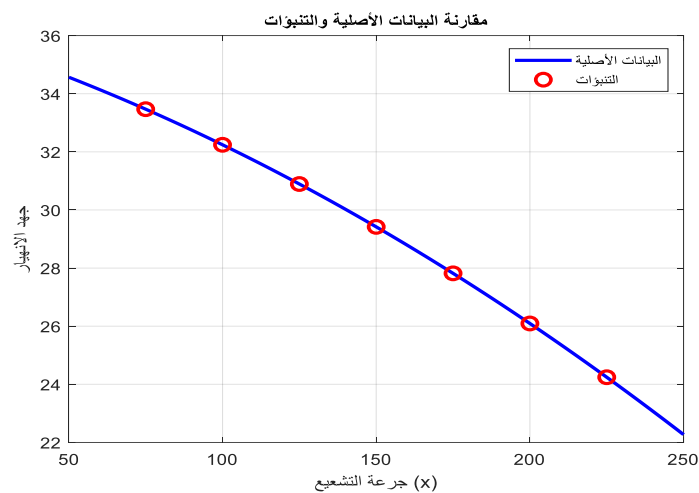
% عكس التطبيع

```
y_pred_breakdown1 = mapminmax('reverse',  
y_pred_breakdown1_norm, breakdown1_settings);
```

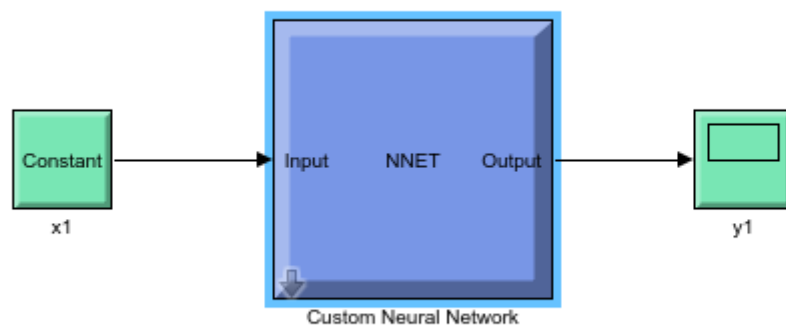
% عرض النتائج

```
fprintf('التوقعات للنموذج الأول - توتر الانهيار');  
disp(' ');  
disp(y_pred_breakdown1);
```

يمثل الشكل (7-23) مقارنة للبيانات الاصلية مع التنبؤات المستقبلية بعد تدريب النموذج باستخدام الشبكات العصبونية.



يمثل الشكل (7-23) مقارنة للبيانات الاصلية مع التنبؤات المستقبلية.



الشكل (7-24) الخلية العصبونية.

7-10 الخاتمة:

هناك اهتمام عالمي كبير بالأبحاث الموجهة لتحسين خصائص المواد العازلة ، وخاصة في تجهيزات التوتر العالي ، حيث تمت دراسات عديدة لتطوير الطرق التصنيعية لهذه المواد العازلة بوسائل شتى وذلك لتحسين الخصائص الكهربائية وغير الكهربائية توكباً مع متطلبات الاستخدام لهذه المواد . ومن هذه الطرق التشعيع بجرعات مختلفة من أشعة غاما وخاصة في المواد البوليمرية .

تعد الزيوت العازلة المعدنية من أكثر السوائل العازلة شيوعاً و الأكثر استخداماً في التجهيزات الكهربائية، تم في هذه الأطروحة إجراء بحث حول أثر التشعيع على خصائص الزيوت العازلة باستخدام عينات جديدة و عينات مستعملة.

تم استخدام تقنية التشعيع (Irradiation) حيث أجريت سلسلة من تجارب التشعيع المُتحكم بها باستخدام الكوبالت-60 كمصدر لأشعة لجاما، مع تطبيق جرعات من أشعة غاما تتراوح بين 50 حتى 250 كيلو جراي ، استخدمت وسائل الكشف و التشخيص بالتحليل الطيفي (FT-IR) لتقييم التغيرات الهيكلية في التركيب الجزيئي للزيت نتيجة التعرض للإشعاع ، وتجهيزات المخبرية أخرى لتقييم مدى التحلل الحاصل في العينات المدروسة ، و التي تم تفصيلها في هذه الأطروحة.

بينت النتائج التي توصلنا إليها الأثر السلبي لهذه التقنية على خصائص الزيوت العازلة و تمثل ذلك في التدهور التدريجي لجودة الزيوت المستخدمة ، لا سيما من حيث متانة العزل الكهربائي، والاستقرار الكيميائي، والبنية الجزيئية. حيث أظهر جهد الانهيار (BDV) في العينات المدروسة انخفاضاً واضحاً في قيمته ، وقد تمت نمذجة هذا التدهور بنجاح باستخدام الانحدار متعدد الحدود ، مما أسفر عن معامل ارتباط مرتفع قريب من الواحد ، مما يؤكد العلاقة التنبؤية القوية بين جرعة الإشعاع وأداء العزل الكهربائي.

نلاحظ في البداية أنه مع ازدياد الجرعات الإشعاعية فإن هذه الخصائص سواء كانت كهربائية أو غير كهربائية تتغير قيمتها أي تبدأ بالتناقص والسبب هو في تكسير و تحطيم الروابط الحرة المتوضعة على الجزيئات و

انطلاقها كزمر حرة قابلة للحركة فإن هذه الخصائص تبدأ في التراجع و نتيجة لذلك يكون هناك تدهوراً في أداء المادة العازلة .

تم تأكيد ذلك من خلال منحنيات التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FT-IR) لعينات الزيت العازل المدروسة ، حيث ظهرت زمر (C-O) و (O-H) التي تساعد على تكسير وتحطيم الروابط في الزيت العازل وكلما زادت الجرعات الإشعاعية يزداد احتمال تكسير الروابط في المادة العازلة والتي تتضمن بشكل رئيسي تفاعلات الأكسدة الناتجة عن التشعيع المتزايد في الجو العادي ، حيث أن الجذور الحرة المتشكلة نتيجة التشعيع السابق تقوم بالتفاعل مع الأكسجين الموجود في الوسط الطبيعي وتشكل بيروكسيدات (Peroxid) فعالة تتفاعل مع المادة العازلة مشكلة زمراً كربونيلية (C-O) و كربوكسيلية (O-H)، مما يؤدي إلى كسر و تحطيم الروابط و بالتالي هذا يؤدي إلى تغيير خصائص الزيت العازل المدروس.

وفي نهاية هذا البحث توصلنا الى نتيجة محورية تتمثل في عدم جدوى استخدام تقنية التشعيع بأشعة غاما بجرعات عالية لتحسين الخصائص المختلفة للزيت العازل المعدني المستخدم في بحثنا ضمن نطاق جرعات تصل حتى 250 كيلوغرام ، على عكس ما أظهرته الدراسات السابقة من فعالية ملحوظة لهذه التقنية في تحسين خصائص المواد البوليمرية .

لقد دُرِس سلوك تحلل زيوت المحولات تحت الضغوط الحرارية والكهربائية على نطاق واسع من قبل الباحثين إلا أن دراسات قليلة نسبياً تناولت تحليلها تحت التعرض لأشعة جاما. وعلى الرغم من أهمية هذا المجال، إلا أنه يواجه العديد من التحديات الرئيسية بسبب النقص الملحوظ في البيانات التجريبية طويلة المدى المتعلقة بسلوك وأداء زيوت العزل تحت تأثير أشعة جاما المستمرة.

تكمن الأهمية العلمية لهذا البحث في اجراء تقييم تجريبي منهجي و تحليل وصفي لأداء الزيوت العازلة في المعدات الكهربائية العاملة في البيئات المشعة ، مما يمثل إضافة نوعية في مجال تشخيص وتقييم حالة العوازل السائلة تحت الظروف الإشعاعية عند الجرعات العالية.

7-11 التوصيات:

من خلال النتائج التي توصلنا اليها في هذا البحث يوصى بما يلي:

- 1- العمل على توسيع نطاق الجرعات المدروسة و خاصة عند الجرعات الصغيرة و دراسة اثرها على الزيوت العزلة
- 2- تطبيق منهجية التشعيع على أنواع اخرى من الزيوت العازلة الصديقة للبيئة (مثل الزيوت النباتية، الاسترات) لتحسين خصائصها البدائية لتتنافس مع الزيوت المعدنية التقليدية.
- 3- العمل على دراسة أثر تفاعل الاشعة مع المواد المثبطة في الزيوت العازلة (كمثبطات الأكسدة) على خصائصها.
- 4- استخدام تقنيات حديثة لتعميق الفهم لآليات التفاعل على المستوى الجزيئي (مطيافية الرنين المغناطيسي النووي NMR، مطيافية الكتلة GC-MS عالية الدقة، وغيرها) لتحديد المسارات الدقيقة لتكسير السلاسل والترابط المتقاطع الناتج عن التشعيع وتأثيره المباشر على الخصائص الكهربائية والفيزيوكيميائية.
- 5- العمل على الجمع بين تقنية التشعيع وتقنيات أخرى مثل المعالجة الحرارية وغيرها ودراسة أثرها على خصائص الزيوت العازلة.

المراجع:

1. C.E. Gherdaoui et al. Advanced treatment of transformer mineral oils contaminated with aroclor mixtures using a combined UV–Visible irradiation and adsorption method: Effects of temperature and oil color according to ASTM D1500. August 2024 Chemical Engineering Journal 497(2024):154614
2. C.E. Gherdaoui et al. Improving transformer oil decontamination: A synergistic approach integrating adsorption and radiative treatment for polychlorinated biphenyls Elsevier, journal of Separation and Purification Technology, April 2024.
3. Z. I. Iskenderova & M. A. Kurbanov .Changes in Performance Characteristics of Transformer Oil by the Action of Ionizing Radiation. November 2019 High Energy Chemistry
4. Z. I. Iskenderova. A COMPARATIVE STUDY OF THE RADIOLYSIS OF USED TRANSFORMER OIL AND OIL CONTAINING 1, 2, 4-TRICHLOROBENZENE UNDER THE INFLUENCE OF GAMMA-RADIATION. October 2019 Problems of Atomic Science and Technology
5. Naoki Tajima and Kazuhiko Horioka. Electrical Breakdown Strength of Gamma-Irradiated Transformer Oils. March 2009 Japanese Journal of Applied Physics 48(3)
6. Abdi, S.; Harid, N.; Safiddine, L.; Boubakeur, A.; Haddad, A. The Correlation of Transformer Oil Electrical Properties with Water Content Using a Regression Approach. Energies 2021.
7. علي السيد. تشعيع المواد البوليميرية في الاستخدامات الكهربائية. أطروحة دكتوراه. جامعة دمشق 2007
8. Rafiq M, Shafique M, Azam A, Ateeq M, Khan IA, Hussain A (2020) Sustainable, renew-able and environmental-friendly insulation systems for high voltages applications. Molecules 25(3901):1–43 .
9. Fofana I (2013) 50 years in the development to insulating liquids. IEEE Electr Insul Mag 29(5):13–25 .
10. CIRGE Brochure 436 (2010) Experiences in service with new insulating liquids. Working Group A2.35, p 95

11. ELEC712: Electrical Insulation Materials and HV Testing,
<https://www.scribd.com/document/465221100/ELEC9712-Lec3-Insulation-Materials-and-HV-Testing-pdf>
12. Lyutikova M, Korobeinikov S, Vohan Rao U, Fofana I (2022) Mixed insulating liquids with mineral oil for high voltage transformer applications: a review. IEEE Trans Dielectr Insul 29(2):1–10. Paper number TDEI – 9938-2022
13. Beyer M, Boeck W, Moller K, Zaengl W (1986) Hochspannungstechnik. Springer Verlag, Theoretische und Praktische Grundlagen
14. حازم محمد الصابوني & نضال محمد الرئيس ,هندسة التوتر العالي , جامعة دمشق ط 1, 1980
15. Warne DF (2005) Newnes electrical power engineers's handbook. 2nd edn. Lincorne House, Burlington, Amsterdam, p 477
16. Fink DG, Beaty HW (2006) Standard handbook for electrical engineers, 15th edn. McGraw-Hill .
17. Wadhwa CL (2007) High voltage engineering, 2nd edn. New Age International Publishers, p 312.
18. ASTM D611, Standard Test Methods for Aniline Point and Mixed Aniline Point of Petroleum Products and Hydrocarbon Solvents.
19. ASTM D1500, Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale).
20. ASTM D92, Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester.
21. ASTM D971, Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil against Water by the Ring Method.
22. ASTM D2285, Standard Test Method for Interfacial Tension of Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin against Water by the Drop-Weight Method.
23. ASTM D97, Standard Test Method for Pour Point of Petroleum products.
24. ASTM D1298, Standard Practice for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer method.
25. ASTM D88, Standard Test Method for Saybolt Viscosity.

26. ASTM D2161, Standard Practice for Conversion of Kinematic Viscosity to Saybolt Universal Viscosity or to Saybolt Furol Viscosity.
27. ASTM D1524, Standard Test Method for Visual Examination of Used Electrical Insulation Oils of Petroleum Origin in the Field.
28. ASTM D1816, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes.
29. ASTM D877, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes. The guide M.G to insulating oil dielectric breakdown testing.
30. ASTM D3300, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin under Impulse Conditions.
31. ASTM D924, Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids.
32. ASTM D2300, Standard Test Method for Gassing of Insulating Liquids Under Electrical Stress and Ionization Modified Pirelli Method.
33. ASTM D2945, Standard Test Method for Gas Content of Insulating Oils.
34. ASTM D3284, Standard Test Method for Combustible Gases in the Gas Space of Electrical Apparatus Using Portable Meters.
35. ASTM D3612, Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography.
36. ASTM D4059, Standard Test Method for Analysis of Polychlorinated Biphenyls in Insulating Liquids by Gas Chromatography.
37. ASTM D1275, Standard Test Method for Corrosive Sulfur in Electrical Insulating Oils.
38. ASTM D664, Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration.
39. ASTM D974, Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration.
40. ASTM D5837, Standard Test Method for Furanic Compounds in Electrical Insulating Liquids by High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

41. Ali Saeed Alghamdi, Nor Asiah Muhamad, Abubakar A. Suleiman, "DGA Interpretation of Oil Filled Transformer Condition Diagnosis", Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 13, No. 5, pp. 229-232, October 25, 2012.
42. Nobuaki Nishimura, Yousuke Takaku, Satoshi Matsumoto, Kaori Fukunaga, Maya Mizuno, "Transmittance characteristic of insulating oil in Terahertz wave-band", National Institute of Information and Communications Technology, Chiko Otani (Riken).
43. M. Meira, C. Verucchi, R. Álvarez, and L. Catalano, (2021) "Dissolved gas analysis in mineral oil and natural ester liquids from thermal faults", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 28, 1317-1325.
44. Gray, I.A.R. Guide for Polychlorinated Biphenyl (PCB) Management of Insulating oil in South Africa. Available online: <http://www.wearcheck.co.za/downloads/PCB%20information%202004.pdf> (accessed on 22 February 2016).
45. McMaster, M. GC/MS: A Practical User's Guide, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2008.
46. Hübschmann, H.-J. Handbook of GC/MS: Fundamentals and Applications; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2015.
47. N'cho, J.S.; Fofana, I.; Beroual, A.; Aka-Ngnui, T.; Sabau, J. Aged Oils Reclamation: Facts and Arguments based on Laboratory Studies. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. (TDEI) 2012, 19, 1583–1592.
48. Lara-Lee Lumley, S. CH₄ can be worth so much more: the role of oil analysis in gas engine reliability (part 2). Wearcheck Technical Bulletin 2015, (Issue 61). Available online: <http://www.wearcheck.co.za/shared/Technical%20Bulletin%2061%20LR.pdf> (accessed on 10 February 2016).
49. Chakravorti, S.; Dey, D.; Chatterjee, B. Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers: Theory, Implementation and Analysis; Springer-Verlag: London, UK, 2013.

50. Hadjadj, Y.; Fofana, I.; van der Voort, F.R.; Bussieres, D. Potential of Determining Moisture Content in Mineral Insulating Oil by FTIR Spectroscopy. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2016, 32, 34–39.
51. Perkampus, H.H. *UV-vis Spectroscopy and Its Applications*; Springer Verlag: Berlin, Germany; London, UK, 1992.
52. Arakelian, V.G.; Fofana, I. Water in Oil Filled High Voltage Equipment. Part I: States, Solubility and Equilibrium in Insulating Materials. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2007, 23, 15–27.
53. Webb, M. Water in oils. In *Proceedings of IEE Colloquium on an Engineering Review of Liquid Insulation*, London, UK, 7 January 1997; pp. 2/1–2/6.
54. CIGRE Working Group A2.34. *Guide for Transformer Maintenance*; CIGRE Report ISBN: 978-2-85873-134-3; CIGRE: Paris, France, 2011.
55. CIGRE Working Group A2.30. *Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems*; CIGRE Report ISBN: 978-2-85873-036-0; CIGRE: Paris, France, 2008.
56. IEC 60814. In *Insulating Liquids Oil-Impregnated Paper and Pressboard: Determination of Water by Automatic Coulometric Karl Fischer Titration*; IEC: Geneva, Switzerland, 1997.
57. Arakelian, V.G.; Fofana, I. Water in Oil Filled High Voltage Equipment. Part I: States, Solubility and Equilibrium in Insulating Materials. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2007, 23, 15–27.
58. Arakelian, V.G.; Fofana, I. Water in Oil Filled High Voltage Equipment. Part II: Water Content as Physico-chemical Tools for Insulation Condition Diagnosis. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2007, 23, 15–24.
59. Sokolov, V.; Laport, J.; Harley, J.; Goosen, P.; Guuinin, P. *CIGRE Technical Brochure 227; Life Management Techniques for Power Transformers, Final Report of CIGRE SC A2 WG 18*; CIGRE: Paris, France, 2002.
60. Ryan JL. Ionizing radiation: the good, the bad, and the ugly. *J Invest Dermatol.* 2012 Mar;132(3 Pt 2): 985-93.
61. Yanagida T. Ionizing radiation induced emission: scintillation and storage-type luminescence. *J. Luminescence.* 2016 Jan ; 169(1): 544-548.

62. Morlat T, Fernandes AC, Felizardo M, Kling A, Girard TA, Marques JG, Carvalho FP. Application of droplet detectors to alpha radiation detection. *Radiation protection dosimetry*. 2018; 180(1-4): 230-234.
63. Thomas A. Lewandowski, Juhi K. Chandalia, Peter A. Valberg. *Ionizing Radiation*; John Wiley & Sons, Inc. Published. 2015; 100: 1055-167 .
64. JF Kirwan, PH Constable, IE Murdoch, PT Khaw. Beta irradiation: New uses for an old treatment: A review, Nature Publishing Group All rights reserved. 2003; 17: 217-225.
65. Lommatzsch PK, Werschnik C, Schuster E. Long-term follow-up of Ru-106/Rh-106 brachytherapy for posterior uveal melanoma. *Graefe's archive for clinical and experimental ophthalmology*. 2000; 238(2): 129-137.
66. Alsharef S, Alanazi M, Alharthi F, Qandil D, Qushawy M. Review about radiopharmaceuticals: preparation, radioactivity, and applications. *Int J App Pharm*. 2020 May; 12(3): 8-15.
67. L'Annunziata, M.F. (2007) 3- γ - and X-Radiation—Photons. In: L'Annunziata, M.F., Ed., *Radioactivity: Introduction and History*, Elsevier Science, Amsterdam, 187-215.
68. Richard Stalter, Dianella G Howarth. *Gamma Radiation*, Gamma Radiation, Prof. Feriz Adrovic (Ed), ISBN: 978-953-51-0316-5, USA. 2012.
69. J.C. Thomas, *Foundations of Nuclear Engineering*, John Wiley and Sons, 1978.
70. Aczel, A. D., 1989. *Complete Business Statistics*. Irwin, p. 1056. ISBN 0-256-05710-8.
71. Ostertagová, E., 2011. *Applied Statistic (in Slovak)*. Elfa Košice, Slovakia, p. 161, ISBN 978-80-8086-171-1.
72. S. A. Ward, A. El-Faraskoury, M. Badawi, S. A. Ibrahim, K. Mahmoud, M. Lehtonen, and M. M. F. Darwish, (2021) "Towards precise interpretation of oil transformers via novel combined techniques based on DGA and partial discharge. *Sensors*, 21,21,2223-2244.
73. M. Badawi, S. A. Ibrahim, DA. Mansour, A. El-Faraskoury, S. A. Ward, K. Mahmoud, M. Lehtonen, and M. M. F. Darwish (2022), "Reliable estimation for health index of transformer oil based on novel combined predictive maintenance techniques", *IEEE Access*, 10, 25954-25972.

Abstract

Power transformers represent one of the most critical components within electrical power transmission systems. They serve as the essential interconnection between generation stations and transmission lines, as well as between transmission networks and distribution grids. Any transformer failure directly impacts the stability and reliability of the entire electrical network. The operational lifespan of a transformer is fundamentally dependent on the design and condition of its electrical insulation system, as insulation degradation can lead to catastrophic transformer failure. During transformer operation, heat generated within the windings is transferred through thermal conduction to the insulating materials and subsequently to the transformer oil. The oil performs multiple essential functions to maintain adequate insulation integrity and ensure continuous operation. This underscores the critical importance of transformer oil as a liquid dielectric medium. Given that transformer reliability is predominantly determined by the properties of the insulating medium used for both cooling and electrical insulation, our research has focused on dielectric liquids by examining the effects of various operational processes on their characteristics. The enhancement of insulation systems for high-voltage equipment remains a subject of significant global research interest, particularly in light of evolving operational and environmental challenges facing modern power systems. This investigation employs gamma irradiation technology to study its effects on the enhancement of electrical, chemical, and physical properties of mineral insulating oils. The primary objective is to improve the performance and sustainability of insulating oils, which is essential for extending their service life and enhancing operational reliability. The experimental study was conducted on three samples of mineral insulating oils currently utilized in high-voltage equipment within the Syrian Ministry of Electricity infrastructure, obtained from different production sources. Comprehensive electrical, chemical, and physical properties were characterized both pre- and post-irradiation under standardized testing conditions (IEC, ASTM, ISO protocols). Analytical comparisons were made against international reference values from established standards. Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy was employed to identify chemical structural modifications induced by irradiation treatment. Furthermore, polynomial

regression modeling was implemented to quantitatively correlate the applied irradiation doses with the measured breakdown voltage characteristics of the insulating oil samples.

Key words: Insulation, High voltage, Insulating oils, Properties, Gamma rays.

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Department of Electrical Power Engineering



Effect of Irradiation in Improving the Properties of Insulating Oil

**A Dissertation Submitted in Fulfilment of the Requirements for
The Degree of PhD in Electrical Power Systems Engineering**

By

Eng. Mothana ALJASSEM

Supervisor

Dr. Ali ALSAYED

Professor in the Department
of Electrical Power Engineering

Co-Supervisor

Dr. Ahmad FALAH

Professor in the
Department of Chemistry

2026-2025