

طريقة جديدة لدراسة المقاومة البينية بين  
السليكون المطاطى وقضيب الفيبر المقوى  
بالبلاستيك للعازلات المترابطة

A novel method to study the  
interface resistivity between silicone  
rubber housing and FRP rod of  
composite insulator

**CHINA**  
**D1 315**

1

1

<https://cigre.moere.gov.eg/>

2

2

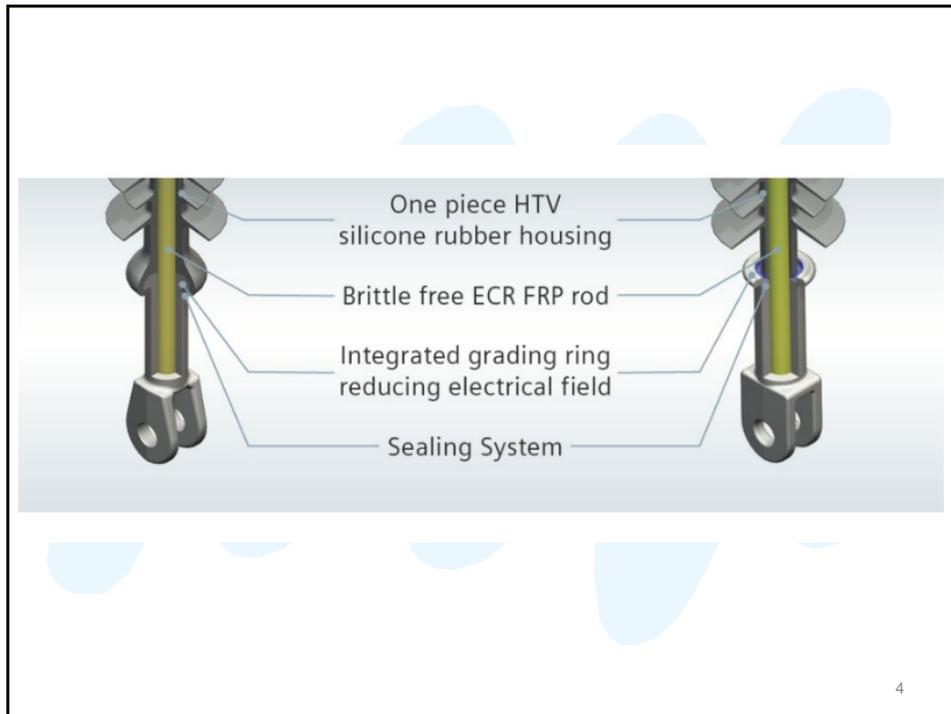
ترجمة ومراجعة:

الأستاذة الدكتورة اهداب محمد كامل المرشدى  
الأستاذ الدكتور لؤى سعد نصرت

**D1** Materials and emerging test techniques

3

3



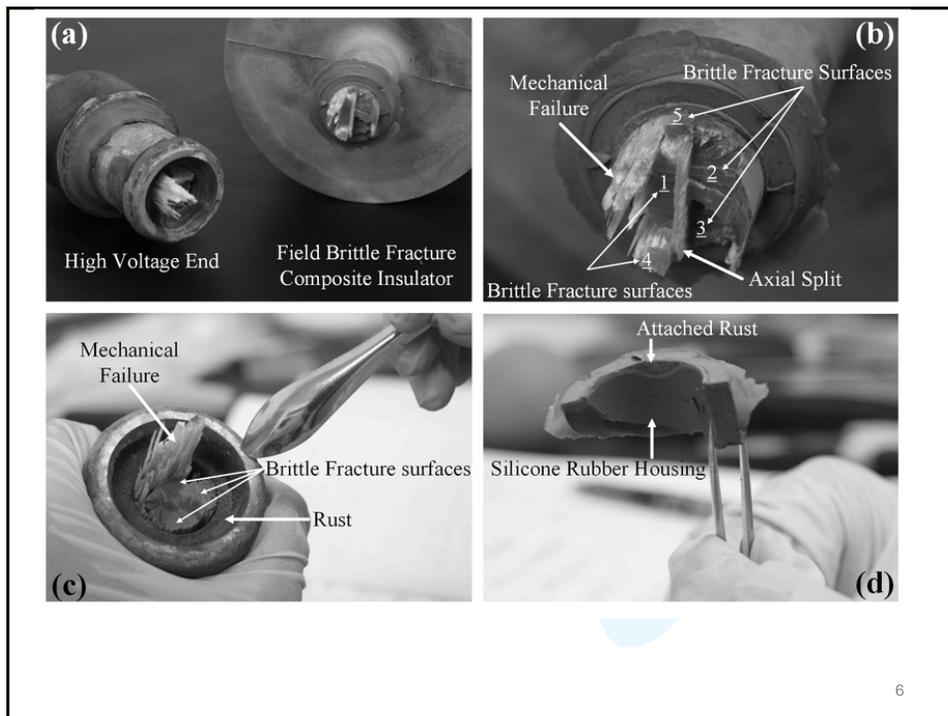
4

4

### Composite Insulator Accident Statistics by CIGRE: 2000

Damage type	Electrical Damage		Mechanical Failure			Total
	Flashover	Interface Breakdown	Metal Part of Fitting	End-fitting Slip Out	Rod Fracture	
U<200 kV	25	51	2	4	23	105
200£U<300 kV	8	10	0	2	8	28
300£U<500 kV	0	6	0	0	101	107
U³500 kV	0	2	0	0	1	3
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>69</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>133</b>	<b>243</b>
<b>Ratio (%)</b>	<b>0.015</b>		<b>0.02</b>			<b>0.035</b>

5



6

Figure 1. Macroscopic observation of the fracture composite insulator; (a) the fracture spot of the composite insulator, (b) the fracture surface of FRP rod, (c) the fracture surface of FRP rod and the rust on the surface of fitting, (d) the rust attached on the inner surface of silicone rubber housing.

7

7

### الملخص:

- تم اقتراح طريقة جديدة لدراسة أداء السطح البيني بين مواد مطاط السيليكون (SR) ومواد قضبان البلاستيك المقوى بالألياف (FRP) من العوازل المتراكبة.
- تستخدم طريقة جديدة عبارة عن أربعة أقطاب لقياس المقاومة البينية والتي تعتبر من العوامل الكهربائية الهامة.
- تغمر أقطاب قياس الجهد العالى على السطح بين طبقة السليكون المطاطى (SR) وبين طبقة الفيبير المقوى بالبلاستيك (FRP).
- تحضر العينات المتشابهة تماما من (FRP) مع (SR) وتغمر فى الماء المقطر لى يتوغل بين الطبقتين وذلك لتمثيل الرطوبة فى البيئة المحيطة.

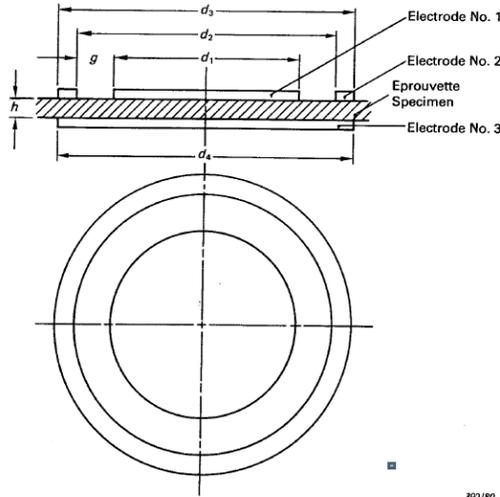
8

8

- جودة امتصاص السائل (SR) وكمية الاملاح استنتجت خلال تلك الدراسة.
- وجد أن المقاومة البينية تقل مع زيادة زمن التوغل للسائل وأنواع المحاليل تؤثر عليها.
- تقل المقاومة البينية عن قيمتها الأصلية بواقع (2 - 4) مرات بعد الغمر في محاليل الماء منزوع الأيونات، محلول ملحي ومحاليل حمض النيتريك منخفضة التركيز.

9

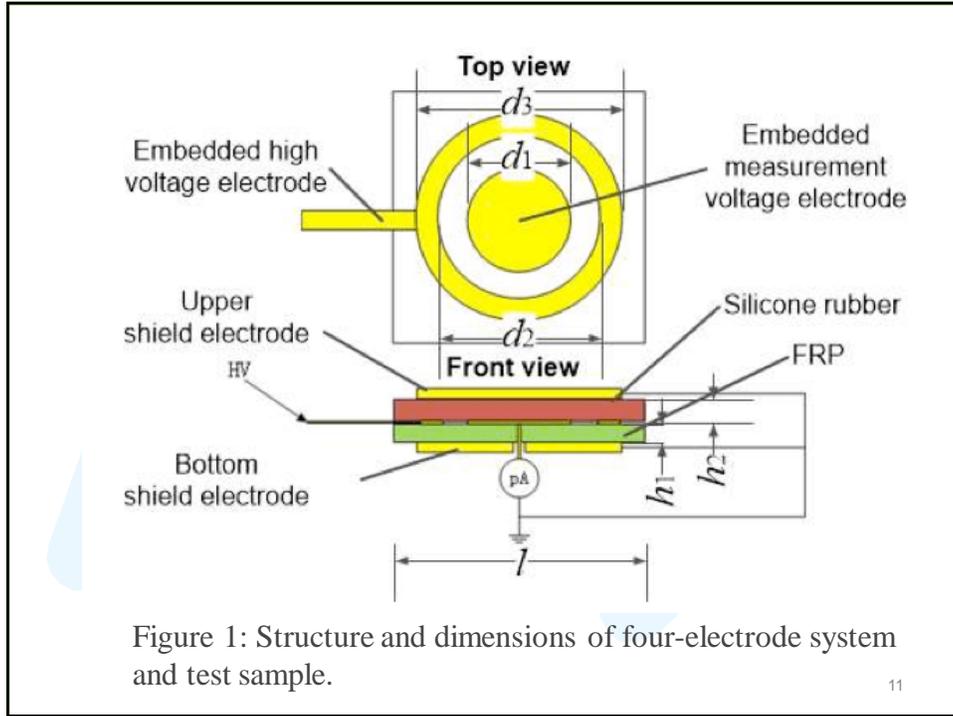
9



Electrode arrangement on flat specimen (IEC 60093)

10

10



11

- تثبت قيمة المقاومة البينية بعد تجفيف العينة لمدة زمنية للتخلص من تأثير امتصاص السوائل ويرجع هذا إلى التحلل المائي للسوائل حيث أن الأحماض تؤثر على تناقص قيمة المقاومة البينية من (6) - (8) مرات وتزداد قيمة النقصان في وجود حمض النيتريك ( $\text{HNO}_3$ ) لمادة (SR) ذات السمك الرفيع .
- بإضافة ثلاثي هيدرات الألومنيا (ATH) كمادة سائلة الى (SR) فإنها تزيد من قيمة المقاومة البينية.
- المقارنات بين العينات في وجود الأحماض وعدم وجودها يتضح من هذه الدراسة وكأحد أهم العوامل الكهربائية (المقاومة البينية) والتي تعبر عن خصائص (FRP) الكهربائية والتي يمكن أن تعمل على تحسين أداء قضبان (FRP) والتي تجنب المتراكبات العازلة من الكسر نتيجة تعرضها للتشقق.

12

12

## 2 - طريقة قياس المقاومة البيئية:

### 2 - 1 نظام الأربعة قضبان:

- المواصفة (IEC60093) لقياس المقاومة السطحية للمواد العازلة تستخدم ثلاثة قضبان.
- تستخدم طريقة جديدة أربعة قضبان للحصول على أكثر دقة لقياس المقاومة البيئية وهي موضحة بالرسم بأبعاد كل قضيب شكل رقم 1.

### 2 - 2 تحضير العينة:

- تم تحضير العينات (FRP) كيميائياً على هيئة SHEET تخانة 2 مم، مساحته 80×80م<sup>2</sup> وثقب في المنتصف بقطر 1 مم، تنظف العينة جيداً قبل الإختبار بماء مقطر وكحول ثم يجفف قضيب من رقائق النحاس الأصفر بأبعاده (30 مم × 8 مم × 2.5 ميكرومتر) يلصق للتوصيل الجيد على القضيب الخلفي موصل بالجهد العالي.
- إبرة من النحاس الأصفر توصل لقضيب القياس بأميتر قياس (PICO) من خلال الثقب لعينة (FRP) .

13

13

## 2 - 3 نظام القياس:

- يتم القياس وفقاً لمغذى قوى DC مبرمج - بيكو أميتر - أربعة قضبان نحاسية.
- يتم وضع العينات في غرفة معدنية تم استخدامها للحفاظ على رطوبة نسبية ثابتة ولحماية التداخل الكهرومغناطيسي (EMI) أثناء القياس.
- يتم التحكم في الرطوبة النسبية عند  $55 \pm 10\%$  باستخدام طريقة محلول الملح المشبع وتم الاحتفاظ بدرجة الحرارة عند  $20 \pm 3$  درجة مئوية في الغرفة.
- أثناء القياس يستخدم مصدر طاقة تيار مستمر جهده قدره 1 كيلو فولت (r.m.s) مع تموج أقل من 5 (r.m.s) mV وتم ضبطه بواسطة الكمبيوتر عبر بروتوكول MODBUS-RTU.
- يتم تطبيق مقياس كهربائي Keithley 6514 لقياس التيار بمعدل عينة 1 S / s. (عينة لكل ثانية).
- وقت القياس يصل إلى 600 ثانية. تم اعتبار متوسط قيمة التيارات من 590 ~ 600 ثانية كتيار مستقر.

14

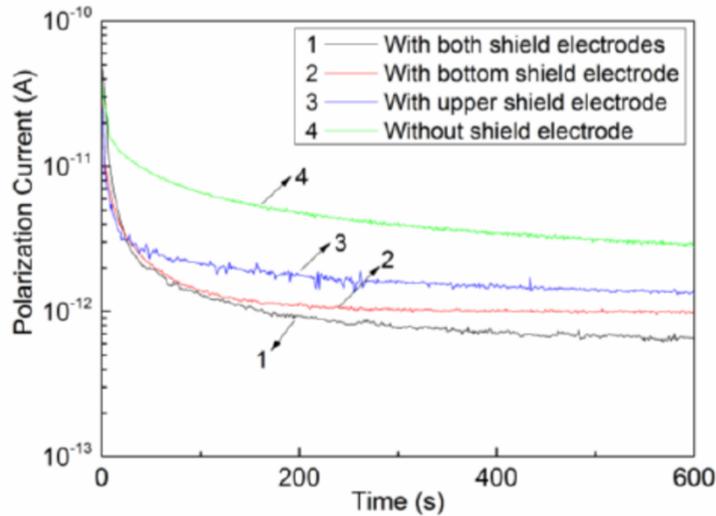
14

## 2 - 4 القضبان المعزولة:

- يوضح المنحنى البياني رقم (2) القضيبي في حالة استخدام قضبان معزولة أو غير معزولة وجدول (1) يوضح فيه مثبتات التيار للحالات المختلفة .
- حيث يمر تيار الجهد العالي من خلال المادتين وكذلك ايضا طبقة (SR) ، (FRP) وباستخدام قضبان الأرضى المعزولة لكل جانب من (SR) ، (FRP) يكون اكبر جزء من التيار الكهربى يمر خلال القضبان المعزولة.

15

15



**Figure 2** Polarization curves of interface current with and without shield electrodes

16

16

**Table 1** Steady-state currents with and without shield electrodes

Steady-state currents (A)	
With both shield electrodes	$6.61 \times 10^{-13}$
With bottom shield electrode	$9.78 \times 10^{-13}$
With upper shield electrode	$1.34 \times 10^{-12}$
Without shield electrode	$2.88 \times 10^{-12}$

17

17

### **3 - نتائج قياس المقاومة البيئية:**

#### **3 - 1 تمثيل لأداء السطح البيئي عند التعرض للسوائل:**

- في الاستخدام الفعلي، يتعرض العازل (SR) لعدة أنواع من الإجهاد البيئي.
- من بينها تعتبر نفاذية السوائل من الرطوبة في البيئة الرطبة أكبر عامل مؤثر.
- من الممكن أن يتدهور أداء السطح البيئي بمجرد أن يتخلل جزئ الماء من العازل SR إلى الواجهة.
- في هذه الدراسة، تم فحص مقاومة السطح البيئي بين طبقة SR وطبقة FRP بعد نفاذية الماء منزوع الأيونات لمحاكاة تأثير نفاذ الرطوبة من البيئة الرطبة في الاستخدام الفعلي.

18

18

### 3 - 2 إجراءات الاختبار للغمر بالسوائل:

- بعد تحضير العينات كيميائيا والمعالجة الحرارية **الفلكنة** لقضيب (FRP) من خلال المتراكبات العازلة، يتم تنظيف العينات بتطهيرها بالماء المقطر والكحول ثم تجفف لمدة 24 ساعة.
- ويوضح الرسم رقم (3) وضع طبقة (SR) حيث يمكن استخدام الفازلين لمنع الفجوة بين المحتوى والعينة.

19

19

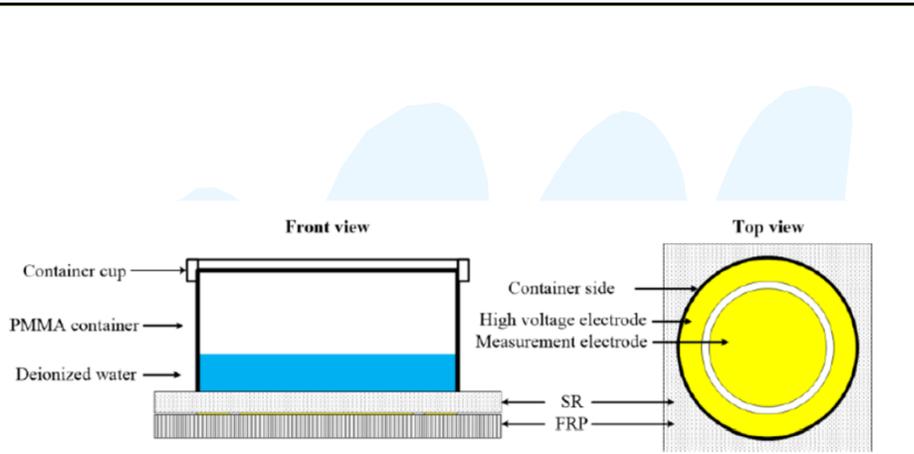


Figure 3 Sketch of liquid permeation into the interface sample

polymethyl methacrylate (PMMA) container

20

20

### 3 – 3 القياس والتعاضلية للمقاومة البينية:

- تم قياس منحنيات الاستقطاب للتيار البيني قبل وبعد تغلغل الماء منزوع الأيونات.
- متوسط قيمة منحنيات الاستقطاب في الثواني العشر الأخيرة من القياس الكلي للوقت (600 ثانية) كان يعتبر تيار الحالة المستقرة بعد وقت معين من نفاذ السائل.
- التغييرات في تيار الحالة المستقرة بعد نفاذ الماء منزوع الأيونات تظهر في الشكل 4 بالخط الأسود.
- ثم يتم حساب المقاومة البينية وفقًا للمعادلة (1) المشار إليها في حساب المقاومة البينية حسب معيار IEC تظهر النتائج في الشكل 4 بخط أحمر.

21

21

$$\rho_{\text{interface}}(t) = \frac{U}{I_{\text{steady-state}}(t)} \times \frac{\pi(d_1 + g)}{g} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{normalized}}(t) = \frac{\rho_{\text{interface}}(t)}{\rho_{\text{interface}}(0)} \quad (2)$$

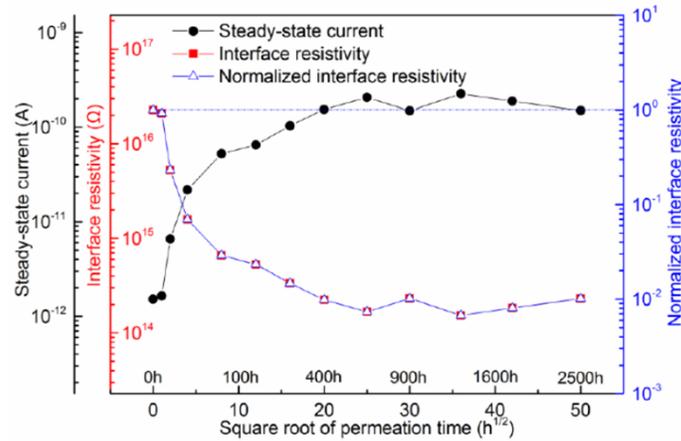
22

22

- حيث  $U$  تعني الجهد المطبق  $I$  تعني تيار الحالة المستقرة  $d_1$  تعني قطر القياس الداخلي للقطب الكهربائي و  $g$  يعني عرض الفجوة بين أقطاب القياس والجهد العالي.
- التيار المستمر يصل لقيمة  $10^{-12}$  أمبير عند مقاومة قدرها  $2 \times 10^{16} \Omega$  وتقل قيمة المقاومة سريعا حتى تصل الى  $2 \times 10^{14} \Omega$  بعد مضي 900 ساعة من تغلغل الماء المنزوع من الأيونات ويحدث انخفاض بطيئ للقيمة حتى الثبات وذلك بعد مرور حوالي 2500 ساعة وهذا تبعا للمعادلة رقم (2).

23

23



**Figure 4:** Steady-state current, interface resistivity and normalized interface resistivity after deionized water permeation up to 2500 hours, the black line represent the steady-state current, the red line represent the interface resistivity and the blue line represent the normalized interface resistivity

24

24

#### 4 – العوامل المؤثرة على أداء السطح:

##### 4-1 سماحية السوائل المختلفة:

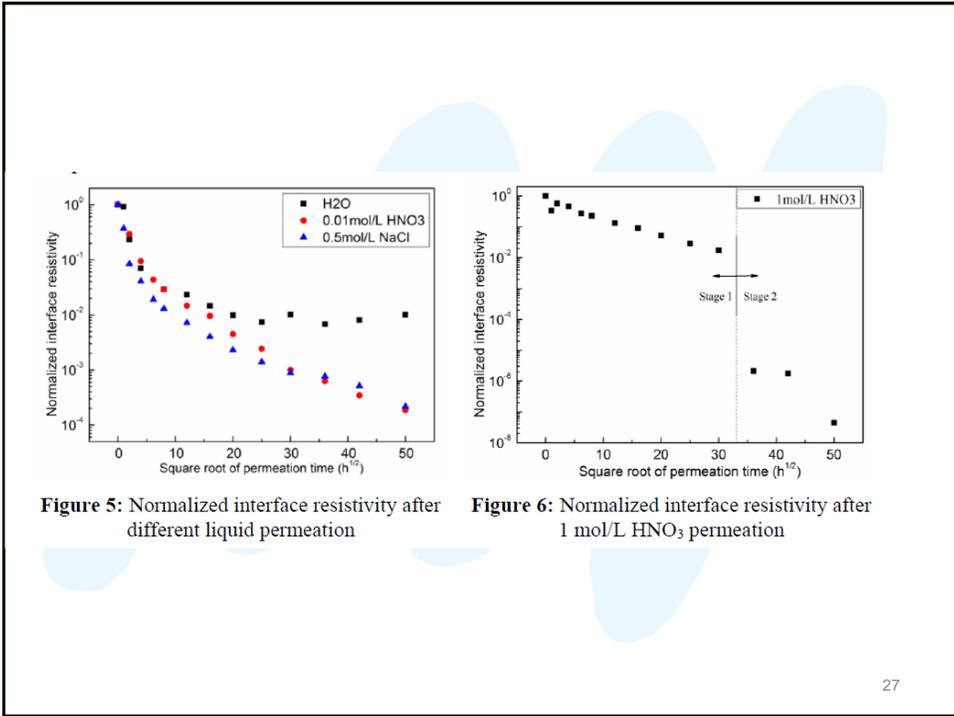
- كعامل مؤثر على أداء السطح البيني يتم فحص نفاذية السائل بواسطة أربعة أنواع من السوائل، أي الماء منزوع الأيونات، 0.5 مول / لتر كلوريد الصوديوم، 0.01 و 1 مول / لتر من محلول  $HNO_3$
- تظهر نتائج تغير مقاومة الواجهة في الشكل 5 و 6.
- انخفضت مقاومة السطح البيني بمقدار 2 - 4 مرات بعد التغلغل بالماء منزوع الأيونات ، وكان 0.5 مول / لتر كلوريد الصوديوم و 0.01 مول / لتر من محلول  $HNO_3$
- تأثير الملح ومحاليل حمض التركيز المنخفض أكبر من تأثير الماء منزوع الأيونات.

25

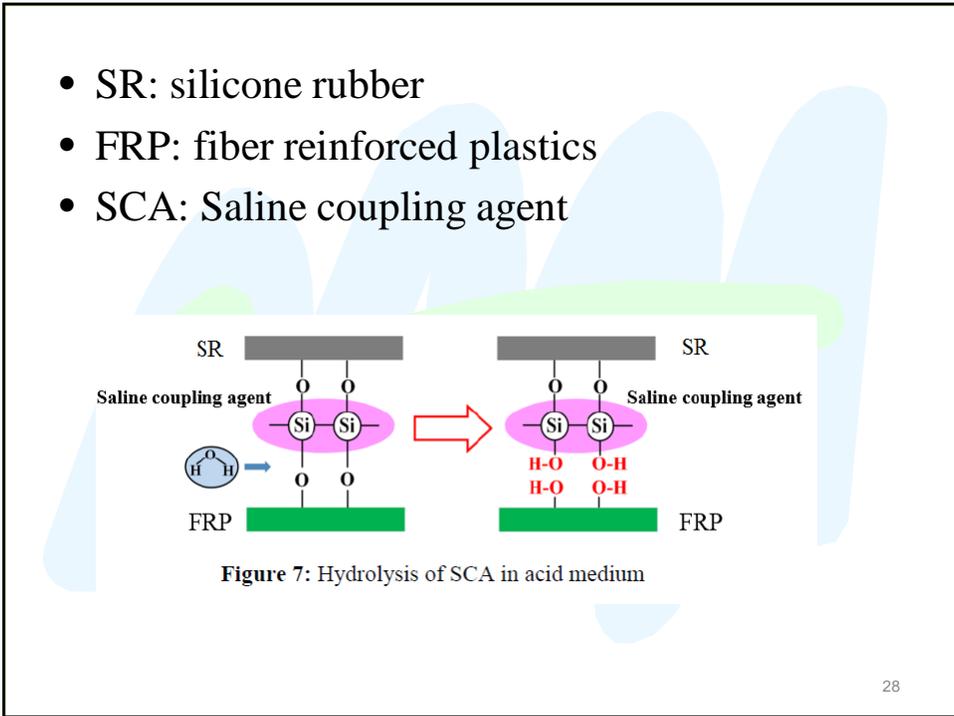
25

- يمكن تقسيم مقاومة السطح البيني إلى مرحلتين بعد التغلغل عن طريق التركيز العالي لمحلول حمض النيتريك (1 مول / لتر)، كما هو موضح في الشكل 6.
- في المرحلة 1 (أقل من 900 ساعة) ، كان اتجاه التباين للمقاومة البينية متشابهًا إلى تلك الأنواع الثلاثة الأخرى من نفاذية السائل ومقاومة السطح التي تم تقليلها بحوالي 2 من المرات.
- بعد ذلك انخفضت مقاومة السطح البيني الطبيعية من  $10^{-2}$  حتى  $10^{-6}$  ويُعتقد أن السطح البيني قد دمر بشدة في هذه الفترة الزمنية.
- عندما يتم تحضير عينات السطح البيني ، يتم تطبيق SCA على سطح الركييزة FRP كعامل لاصق لأنه يمكن أن يرتبط كيميائيًا بطبقة SR وركييزة FRP في نفس الوقت.
- يمكن تحليل الرابطة الكيميائية بين الركييزة SCA و FRP بواسطة جزيء الماء في الوسط الحمضي ، كما هو موضح في الشكل 7.
- يضعف الالتصاق ، والذي يعتبر آلية النقص السريع لمقاومة السطح البيني بعد تغلغل 1 مول / لتر  $HNO_3$ .

26



27



28

#### **4 - 2 استعادة العمليات**

- بعد نفاذ السائل، تم تجفيف عينات السطح البيئي عند درجة حرارة الغرفة.
- ثم تم التحقق في عملية استعادة مقاومة السطح البيئي حتى وصلت إلى قيمة مستقرة.
- أشارت النتائج إلى أن مقاومة السطح البيئي يمكن أن تتعافى إلى القيمة الأولية تقريبًا بعد التغلغل بواسطة الماء منزوع الأيونات ، 0.5 مول / لتر كلوريد الصوديوم و 0.01 مول / لتر  $HNO_3$  (انظر الشكل 8).
- ومع ذلك ، فقد بقيت 8 مرات في المقدار أقل من القيمة الأولية ولا يمكن أن تتعافى بعد نفاذية 1 مول / لتر  $HNO_3$

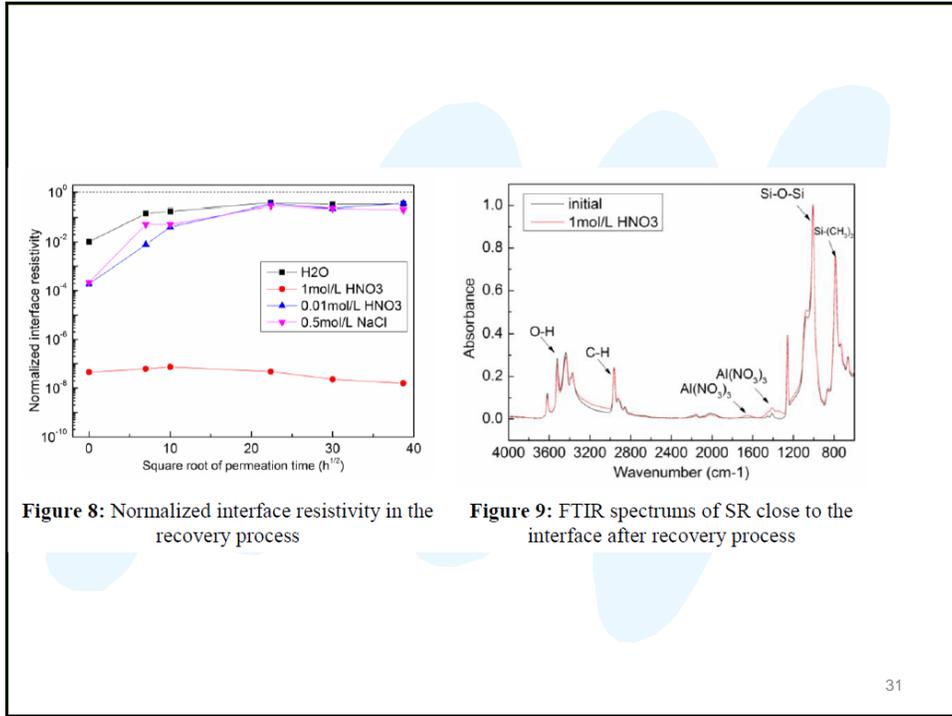
29

29

- يوضح الشكل رقم (9) استخدام أطياف فوريريه لتحويل الأشعة تحت الحمراء (FTIR) على (SR) بعد تعرضه إلى السائل ومدى استعادة العملية وتصل القيمة العظمى تقريبًا إلى 1370 سم<sup>-1</sup> ، 1650 سم<sup>-1</sup> من الطيف بعد تعرض العينات إلى (1مول / لتر)  $HNO_3$  في حين أن السليكون المطاطي لا يستعيد خواصه بعد التعرض لتركيز عالي من حمض النيتريك.
- وبالتالي المقاومة السطحية لا تستطيع الرجوع لقيمتها.

30

30

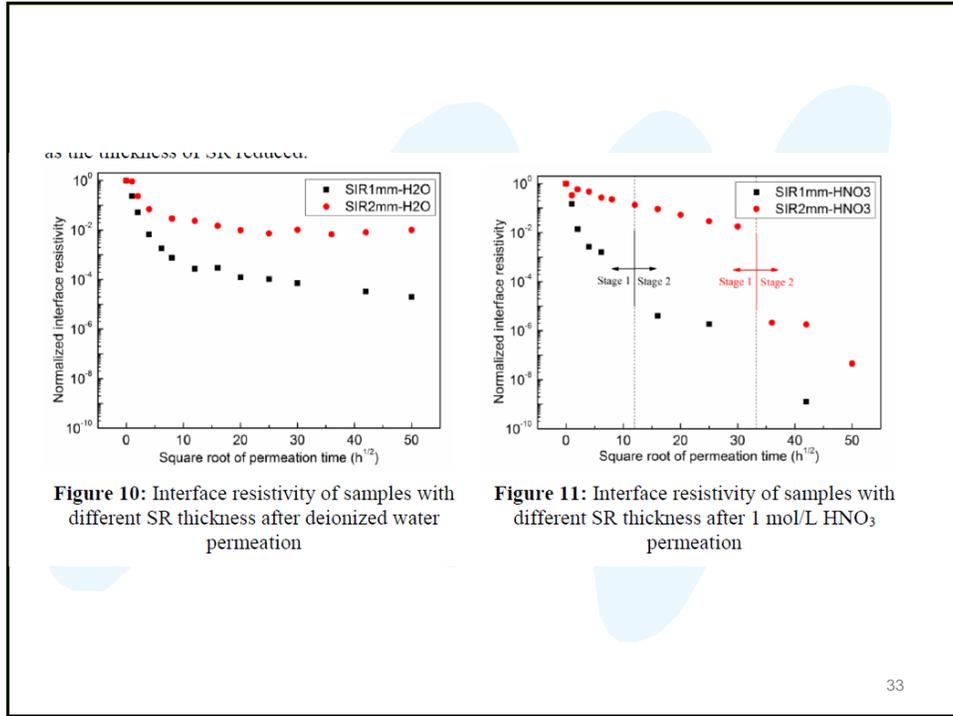


31

**4 - 3 سمك السليكون المطاى:**

- يتأثر السائل المتغلغل إلى السطح البيني بجودة امتصاص السائل لمبيت SR. مع تغير السمك.
- تم عرض مقاومة السطح البيني بعد التغلغل بواسطة الماء منزوع الأيونات و 1 مول / لتر  $HNO_3$  في الشكل 10 و 11.
- وأظهرت النتائج أن مقاومة السطح البيني تقل أكثر كلما أصبح SR أرق.
- تم العثور على ظواهر مماثلة لعينات السطح البيني بعد تغلغل 1 مول / لتر  $HNO_3$ .
- بالإضافة إلى ذلك ، انخفضت حدود المرحلة 1 والمرحلة 2 من حوالي 1000 ساعة إلى 100 ساعة حيث انخفض سمك SR.

32



33

**4 - 4 المالنات (SR):**

- المالنات من (ATH) ثلاثي هيدرات الألومينا أضيفت إلى السيلكون المطاطي (SR) وذلك بهدف تحسين مقاومة النحر والتآكل علاوة على أن ذلك يسمح بتغلغل الرطوبة بداخل مسارات جزيئات المادة.
- نوعان من مواد السيلكون المطاطي تم تحضيرهما ثم استخدموا وذلك بعد التحكم في كمية (ATH) قد تم تسمية النوعان من مواد السيلكون المطاطي (ATH 0)، (ATH 100) نسبة إلى كمية (ATH) المضافة الموضحة بجدول (2).

34

- يظهر في الشكل 12 المقاومة البينية مقابل الجذر التربيعي لمنحنيات الوقت بعد نفاذ الماء منزوع الأيونات بمحتويات مختلفة من مالئات ATH.
- لم تتغير المقاومة البينية لـ ATH 0 تقريباً بعد نفاذ الماء منزوع الأيونات.
- يبدو أن جزيء الماء لا يمكن أن يتغلغل في السطح البيني من طبقة SR ، بسبب كره الماء للسيليكا وعدم وجود مالئات ATH.
- تقل مقاومة السطح البيني لـ ATH 100 بحوالي مرتين.
- المواد ذات مالئات ATH الحساسة للرطوبة تتمتع بقدرة أعلى على امتصاص السوائل وتوفر المزيد من المسارات لجزيئات الماء للتغلغل عبر طبقة SR إلى السطح.

35

35

Table 2 Main components and contents of SR materials

	SR gum	Hydrophobic fumed silica	ATH
ATH 0	100	40	0
ATH 100	100	40	100

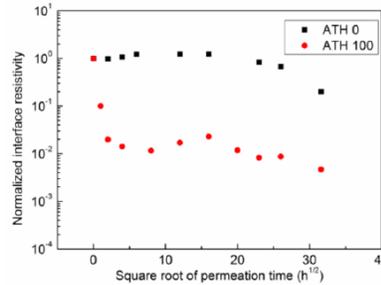


Figure 12: Interface resistivity of samples with different SR fillers after water permeation

36

36

#### 4 – 5 عامل اقتران $\text{SiH}_4$ silane :Silane

##### Silane Coupling Agent: SCA

- من أجل التحقق في تأثير SCA على المقاومة البينية، تم تحضير عينات الواجهة بدون SCA بشكل خاص عن طريق حذف إجراء تطبيق SCA على سطح الركيبة FRP قبل تقسية المطاط السيليكوني.
- هناك التصاق ضعيف بين طبقة SR وركيزة FRP.
- المقاومة البينية مع وبدون SCA بعد الماء منزوع الأيونات ونفاذ 1 مول / لتر  $\text{HNO}_3$  موضحة في الشكل 13 و 14.
- تقل مقاومة السطح البيني بدون SCA بأكثر من ثلاث مرات بعد نفاذ الماء منزوع الأيونات.
- في حالة نفاذ 1 مول / لتر  $\text{HNO}_3$  انخفضت مقاومة السطح البيني المعيارية بسرعة تصل إلى 6-10 مرات في غضون ساعات قليلة.
- أشارت النتائج إلى أن أداء السطح البيني بدون SCA يتأثر بسهولة بنفاذ السائل.

37

37

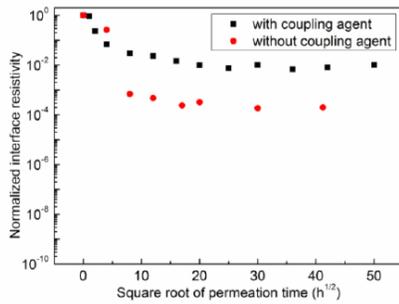


Figure 13: Interface resistivity with and without SCA after deionized water permeation

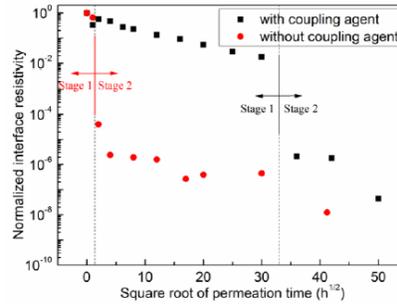


Figure 14: Interface resistivity with and without SCA after 1 mol/L  $\text{HNO}_3$  permeation

38

38

## 5 – المناقشة:

- لقد لوحظ ان ثانی اكثر حوادث للعازلات البوليمارية فی الانهيار السطحی وذلك كما ذكر فی CIGRE سنة 2000.
- نتائج هذا البحث اثبتت ان المقاومة البينية تعتبر عامل كهربي مؤثر والنظام الجديد مطلوب فی التصميم لدراسة المقاومة السطحية بين طبقة (SR)، (FRP) والتحضير للعينات المتماثلة فی عملية الانتاج لقضبان (FRP).
- طريقة السوائل تستخدم لكي تعطى تمثيل لامتصاص الرطوبة من البيئة الرطبة للعازلات البوليمارية .

39

39

## الخلاصة:

- 1-تعتبر مقاومة السطح البيني الموصى بها معلمة حساسة لتقييم أداء الواجهة بين مبیت SR ومواد FRP باستخدام نظام رباعي الأقطاب. يعد التحضير لعينات الواجهة أمراً سهلاً ومطابقاً لعملية إنتاج واجهة مبیت قضيب FRP في العوازل المركبة. يمكن محاكاة نفاذية الرطوبة من البيئة الرطبة في الوضع الفعلي عن طريق نفاذ السائل.
- 2 –يعد نظام الأقطاب الأربعة المصمم حديثاً لقياس مقاومة السطح البيني مناسباً لدراسة تأثير الأنواع المختلفة من نفاذية السائل وجودة امتصاص السائل SR واستخدام عامل اقتران silane (SCA) على أداء السطح البيني.

40

40

3 - وكعامل كهربائي مؤثر تعتبر المقاومة البينية تتناقص بمقدار 2-4 مرة بعد التعرض للماء المتأين ، والأملاح والتركيز المنخفض لحمض النيتريك كمحاليل. والمقاومة السطحية تستطيع استعادتها بعد التجفيف لفترة زمنية بعدم التعرض للسائل وتفقدتها بقيمة كبيرة ولا تستطيع استعادتها التي تتناقص 6-8 مرات نتيجة التعرض إلى 1 مول/لتر من  $HNO_3$  وجوده امتصاص السائل مهم في تقييم المقاومة البينية. وانخفضت المقاومة البينية أكثر بعد نفاذ السائل حيث أصبح سمك SR أرق أو مع المزيد من مالينات ATH. بالمقارنة مع عينات السطح البيني مع SCA ، كانت العينات التي لا تحتوي على SCA أكثر تأثراً بعد نفاذ الماء منزوع الأيونات ونفاذ حمض النيتريك.

41

41

THANK YOU

42