

صناعة مكثف فائق المرونة بطابعة ثلاثية الأبعاد

د. ميلاد محمد عريير¹، د. الهادي امحمد أبوالأجراس²

¹ كلية تقنيات الحاسوب طرابلس، ليبيا.

بريد الكتروني: elhadiemhemed@gmail.com

² جامعة المرقب، ليبيا.

HNSJ, 2022, 3(12); <https://doi.org/10.53796/hnsj31246>

تاريخ القبول: 2022/11/20م

تاريخ النشر: 2022/12/01م

المستخلص

يعد التطور السريع لأجهزة تخزين الطاقة المرنة أمراً بالغ الأهمية لمختلف الصناعات الإلكترونية. يمكن تصنيع المكثفات الكهروكيميائية ذات الطبقة المزدوجة (EDLC) عالية المرونة باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد. لقد كان تحدياً كبيراً لتصنيع طبقات مواد متعددة من EDLC في امر ترسيب واحد سريع ودقيق. تتكون الهياكل المصنعة من اثني عشر قطباً كهربائياً يمكن تكوينها بعدد من الطرق المختلفة في كتلة واحدة. يهدف هذا العمل إلى التحقق من أداء المكثف المرن EDLC المصنوع من خلال الطباعة ثلاثية الأبعاد على شكل نمط قرص العسل. تم تصنيع خلايا المكثف EDLC باستخدام معجون مصنوع من الكربون النشط (AC) والإلكتروليت أو الكهرل الهلامي المطبوع على ركيزة سيليكون شفافة. يمكن استخدام هياكل EDLC المرنة في الإلكترونيات المرنة بأنماط وأحجام مختلفة باستخدام طباعة ثلاثية الأبعاد ويمكن تطبيقها على العديد من التطبيقات مثل التكنولوجيا القابلة للارتداء.

الكلمات المفتاحية: مكثفات مرنة، جهاز لحفظ الطاقة، الكربون النشط، طباعة ثلاثية الأبعاد، مكثف سريع التخزين

1. المقدمة

تُظهر أجهزة تخزين الطاقة المرنة مثل المكثفات EDLCs، والمعروفة أيضًا باسم المكثفات فائقة السرعة، كثافة الطاقة عالية أثناء التفريغ. تعتمد EDLCs على استخدام مواد كهربية حديثة وأخف وزنًا ومرنة [1-8]. لقد وصف الفيزيائي هيلم المفهوم الرئيسي لـ EDLC حيث يعتمد EDLC على تراكم الشحنات الكهربية على الأقطاب الكهربية المفصولة بالكهرباء [1]. لطالما استخدمت العديد من المواد الكربونية والكربون كأقطاب كهربية لـ EDLCs. يعتبر الكربون النشط (AC) أحد أهم مواد الكربون التي يتم استخدامها كأقطاب كهربية في المكثفات EDLCs [2]. إنه مفيد بسبب مساحة سطحه العالية، والتكلفة المنخفضة، وتأثير التآزر الممتاز مع المواد المضافة ويسهل معالجته أيضًا. في الآونة الأخيرة، تم إجراء بعض المحاولات لتصنيع طبقات متعددة من مادة EDLC في عملية ترسيب واحدة سريعة ودقيقة [3]. تم استخدام العديد من عمليات التصنيع لتصنيع المكثف المرن EDLC والمكثفات الفائقة الدقيقة وتم الإبلاغ عنها في المنشورات العلمية بما في ذلك الطباعة الضوئية والترسيب الكهروكيميائي، والبنق الدقيق، والطلاء، والطباعة من لفة إلى لفة، إلخ [4-8]. مقارنة بالطريقة الموصوفة هنا، عادةً ما تكون طرق الطباعة ثلاثية الأبعاد الأخرى مكلفة أو غير قادرة على معالجة جميع المواد اللازمة لصنع EDLC، مثل آلة الصهر بالليزر ثلاثية الأبعاد [5]. تم اعتماد الطباعة ثلاثية الأبعاد على أساس ترسيب العجينة لهذه الدراسة لأنها تسمح بتصنيع EDLCs في عملية واحدة بما في ذلك مل الحقن بأنواع مختلفة من المواد. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة EDLCs وتصنيعها بواسطة عملية الكتابة بالحبر المباشر ثلاثي الأبعاد، ولكن لزوجة مواد الكربون النشط والسيليكون تجعلها غير مناسبة لهذا النهج [6]. من المتطلبات المهمة لـ EDLC في الوقت الحاضر قدرتها على أن تكون مرنة للغاية لتلبية متطلبات العديد من التطبيقات. من الواضح أن بعض هذه العمليات تضيف القليل إلى أداء المكثفات. يحتاج البعض إلى معالجة مسبقة، على سبيل المثال تقنية الطلاء بالرش لها العديد من العيوب مثل التفاوت والانتشار بسبب ارتفاع درجة حرارة المواد المعالجة. تكلفة التصنيع مرتفعة وتستغرق وقتًا طويلًا عند استخدام عملية الطباعة الضوئية. وبالتالي، قد لا تتناسب هذه العمليات مع EDLC المكثفات المرنة مع مجموعة متنوعة من ركائز المواد وأقطاب الكربون النشط وأنماط وسماكه الكهرل. ومع ذلك، فإن أحد التحديات الرئيسية لاستخدام المكونات في EDLC هو المرونة والأداء الكهروكيميائي. يتمثل التحدي في تطوير عملية بسيطة وسريعة ومنخفضة التكلفة لا تتطلب معالجة إضافية أثناء تصنيع EDLCs. يجب أن تحقق هذه الطريقة دقة أفضل وأداء موحد، وهياكل متعددة النماذج وأن تكون عالية المرونة.

تتمتع عملية تصنيع الطبقة المضافة بالقدرة على إدخال أشكال هندسية مختلفة داخل العينات، من خلال إنشاء أنماط مختلفة واستخدام العديد من المواد المطبوعة لعمل كل عينة [7]. تم تحقيق الأداء الحالي في طباعة المواد المتعددة باستخدام طباعة ترسيب معجون ثلاثي الأبعاد. يعد توافق المواد أحد الاعتبارات المهمة للطباعة الناجحة والأداء الكهروكيميائي لـ EDLCs. تحتوي أنواع الطبقات الثلاثة الرئيسية في EDLC على كمية صغيرة من المادة اللاصقة، والتي يجب أن تكون مثالية في الهيكل السطحي وقوة الربط واللزوجة. نظرًا لمتطلبات المواد المتجانسة ومرونة مادة اللصق، فقد تم استخدام اللاصق الحراري PVDF-HFP في أقطاب

معجون الكربون ومجمع التيار. لم يتم استخدام PVDF-HFP في الكهرل الهلامي [8]. في هذا العمل، نقدم وصفاً تفصيلياً لتصنيع EDLCs عالية المرونة باستخدام طريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد، ونقل الطبقات على شكل خلية النحل لمكونات EDLC التي تم تصنيعها. تم استخدام هذا النمط بسبب قلة المواد واستهلاك وقت أقل مقارنة بالأنماط الأخرى. تم فحص الاختبار الكهروكيميائي لست واثنى عشر قطب كربوني نشط بسمك 2 مم باستخدام تركيز 2.4 م من H_3PO_4 .

2. التجربة

تم استخدام مادة السيليكون من أجل الهيكل والتغليف. خليط مسحوق من خام الفضة (Ag) ومسحوق من معدن الزنك (Zn)، (MW 65.38) تم استخدامه لمعجون مجمع التيار. جميع المواد الأخرى بما في ذلك معجون جزيئات الكربون النشط (AC)، (AR، Cat. رقم 05105، MW 12.01 جم مول-1)، و (CMC، MW 250000، PVDF-HFP، MW 130.000-400000)، وكحول بولي فينيل (PVA، MW 146000-186000، +99 % محلل مائياً)، و (NMP، 1.028 جم مل) وحمض الفوسفوريك (H_3PO_4).

1.2 تحضير معجون الكربون النشط

كمية صغيرة من الماء والمادة اللاصقة كمواد تشحيم في الطباعة ثلاثية الأبعاد أمر ضروري. لا يمكن إدخال PVDF-HFP بسهولة في عملية تصنيع الأقطاب، حيث لا يمكن إذابته في الماء. وهكذا، تمت إضافة مسحوق PVDF-HFP إلى NMP، متبوعاً بالتسخين إلى 40 درجة مئوية لمدة ساعة واحدة لإعطاء تركيز 20% بالوزن / الحجم. تم خلط 4 جم من مسحوق AC مع التقليب القوي بدون تسخين لمدة 24 ساعة لضمان التجانس.

2.2 تحضير المعجون العازل الكهرل

لتحضير محلول مائي من PVA، تم خلط 2.4 جم من مسحوق PVA مع 30 مل من الماء المقطر وتم التقليب المغناطيسي عند 50 درجة مئوية لمدة ساعة واحدة حتى يذوب تماماً. تم بعد ذلك خلط 1.5 جم من 5% CMC بمحلول PVA متبوعاً 7 جم $M H_3PO_4$ مع التقليب المغناطيسي طوال الليل حتى يتحول تماماً إلى هلام متجانس.

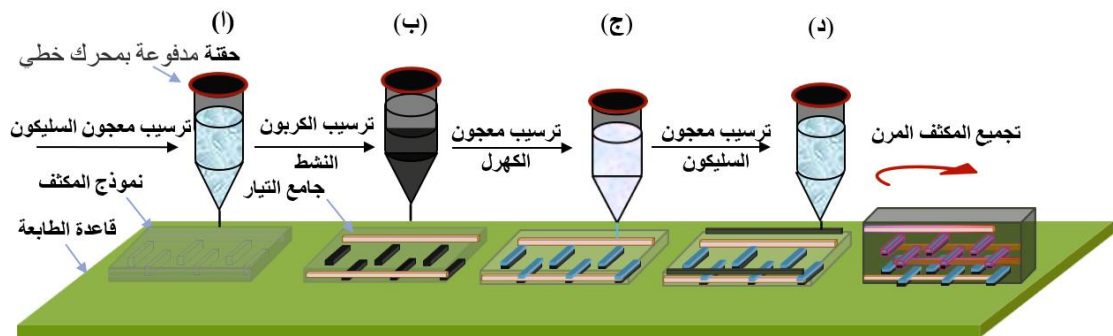
2.3 تحضير عجينة التيار الجامع

استخدام أحدث معجون موصل ولمنع الأكسدة، تم إذابة 1 جم من حبيبات PVDF-HFP في 5 مل من NMP عند 40 درجة مئوية لمدة ساعة واحدة. بعد ذلك، تم خلط 1 جم من مسحوق معدن الزنك مع 3 جم من مسحوق الفضة وإضافته إلى خليط المذيب / البوليمر مع الاستمرار في التقليب طوال الليل للحصول على معجون متجانس.

1. عملية التصنيع للمكثفات EDLCs

يوضح الشكل 1 تقنية التصنيع ثلاثية الأبعاد للمكثفات المرنة EDLC. تم تثبيت أداة بثق لترسيب عجينة المواد باستخدام حقنة واحدة مدفوعة بمحرك خطي متدرج يسمى Discov3ry في البرنامج الثابت للطباعة ثلاثية الأبعاد Ultimaker، وتم التحكم بها بواسطة برنامج simpleify3D. تم ضبط إعدادات الطباعة ثلاثية

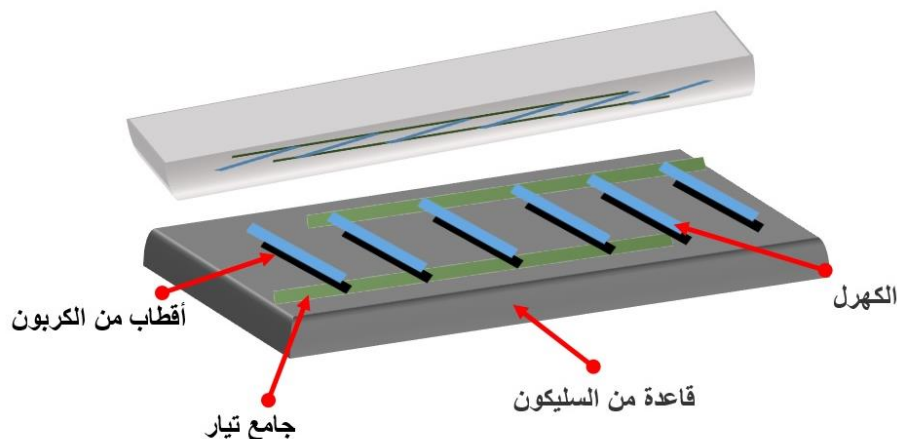
الأبعاد للمنصة أو الأرضية المسخنة على 10 درجات مئوية وكانت درجة حرارة الطارد 20 درجة مئوية. تم استخدام حقنة 30 مل. وأيضا تم استخدام أنبوب مطاطي PVC بقطر 3.5 مم بطول 38 سم. لتقليل كمية المواد الثلاث المستخدمة في هذا العمل، تم ترسيبها في شكل نمط قرص العسل بنسبة 20%. تم استخدام فوهة قطرها 0.6 مم ومع ارتفاع طبقة الأرضية 0.7 مم. تم تثبيت معدل التدفق عند 16000 خطوة لكل مم بسرعة طباعة 90 مم لكل ثانية. لتجنب أي فقاعات هواء، تم تعبئة السيليكون في الحقنة دون أي تنقية باستخدام مسدس سيليكون. تم تعطيل وظيفة التراجع في البرنامج لتجنب مشاكل الأجهزة الميكانيكية لالة الطباعة. تم استخدام ورقة تفلون غير لاصقة على منصة الطباعة.



الشكل 1: رسم توضيحي لخطوات التصنيع لطباعة ثلاثية الأبعاد لمكثف مرن

2. عملية التصنيع للمكثفات EDLCs عملية التصنيع

تم إنشاء التصميم بمساعدة برنامج (CAD) باستخدام Solid وتحويلها إلى برمجة لطباعة ثلاثية الأبعاد في طبقة حسب الطبقة باستخدام المبسط ثلاثي الأبعاد. كل طبقة لها تسلسل بواسطة بثق عجيبة ثلاثية الأبعاد كما هو موضح في الشكل 1-أ. تم استخدام طبقة من السيليكون بسمك 0.7 مم طوال الوقت. طبقتان من جامع التيار المطبق بفرشاة عادية كجامعين للتيار. سماكة طبقة القطب تم استخدام 0.7 مم بالكامل بأبعاد 38 مم الطول × العرض 2 مم الشكل 1-ب. أبعاد الكهرل كانت مشابهة للأقطاب وهذه طبقة هلامية تم استخدامها كفاصل. كما هو مبين في الشكل 1-ج. تم استخدام نفس القياسات لطبقة الكهرل الهلامية PVA / H_3PO_4 للوصول إلى وزن ستة أقطاب 1.3 جرام. لقد ثبت أنه يمكن تصنيع هياكل مختلفة باستخدام حقنة معجون ثلاثي الأبعاد قائم على السيليكون. المواد العجيبة التي يجب التحكم فيها للسماح لترسيب جيد ويحافظ على شكل الطبقة. لتقليل نسبة الكهرل المتسرب من خلال الهياكل تم إضافة نصفين من طبقة السيليكون 1 مم الشكل 1-د. تم طباعة الخلايا دون أي جامع تيار معدني وحفظها في مجفف لمدة ساعة للسماح بالتسلسل الكربون من الكهرل.



الشكل 2: رسم تخطيطي للمكثف الكهربائي المرن

جدول (1): المعلمات ومعايير عملية التصنيع

المعاجين	معدل القذف	سرعة الطباعة	سمك الطبقة
	(steps/mm)	(mm/s)	(mm)
السيليكون و لكاربون النشط	00061	90	70.
الكهرل و جامع التيار	15000	40	70.

3. القياسات الكهروكيميائية

تم إجراء جميع القياسات باستخدام محطه قياس كهروكيميائية VersaSTAT. تم استخدام 2 مل من PVA / H_3PO_4 ككهرل. تصوير الفولت جرام الدوري (CV) للمرونة وتم اختبار خلية بمعدلات مسح مختلفة تبلغ 5، 10، 20، 50 ملي فولت لكل ثانية. بين جهد محتمل 0 و 0.82 فولت. وفقًا للدائرة المكافئة كما هو موضح في الشكل 2، فإن السعة الأولى المقاسة (C1) والسعة الثانية (C2) بواسطة المعادلة (1) السعة الاثني عشر قطبًا (C3) يمكن حسابها من المعادلة (2).

(1)

$$C1 = C2 = \frac{Q_{total}/6}{\Delta V}$$

$$C3 = \frac{Q_{total}/12}{\Delta V} \quad (2)$$

حيث C هي السعة في الفاراد، Q_{total} هو المكثف الفائق الشحنة في كولوم (C) و v هي شحنة الجهد بالفولت. منحنيات الشحن والتفريغ الجلفانوستاتيكي (GCD) تم قياسها عند كثافة تبلغ 11 و 25 أمبير جرام لسته و اثني عشر قطبًا كهربائيًا على التوالي. تحديد السعة GCD عن طريق المعادلة (3)

$$C = \frac{i \Delta t}{\Delta V} \quad (3)$$

تيار التفريغ بالأمبير (A) ، Δt هو التفريغ الوقت (sec) و v هو جهد التفريغ (V) السعة النوعية (Cs) لجهاز المكثف يمكن حسابها باستخدام المعادلة (4)

$$Cs = \frac{i \Delta t}{m \Delta V} \quad (4)$$

التيار بالأمبير (A) ، Δt هو وقت التفريغ (sec) ، m هي الكتلة الإجمالية للمواد الفعالة لسته واثن عشر قطباً كهربائياً (gram) و v هو جهد التفريغ (فولت).

4. النتائج والمناقشة

في هذا العمل، نقدم ثلاثة مكثفات كهربائية مزدوجة الطبقة تم إنتاجها بواسطة عملية تصنيع جديدة في عملية واحدة. يوضح الشكل 2 الرسم التوضيحي لتوصيل متسلسل دائرة مركبة متضمنة في هيكلية مكثف كهربائي مزدوج الطبقة عالي المرونة. استناداً إلى آلية العمل [7]، تتكون المكثفات الكهربائية مزدوجة الطبقة من أربعة مكونات رئيسية هي الركيزة ومجمع التيار ومعجون الكربون النشط والهلام الكهرل الذي يعمل فاصلاً بين الأقطاب. يعتمد استقرار أداء المكثفات الكهربائية مزدوجة الطبقة ومرونتها بشكل أساسي على عامل مهم وهو خصائص قوة المواد الرابطة. استخدمت مواد رابطة لاصقة وشائعة ورخيصة وآمنة بيئياً في مكثفات كهربائية مزدوجة الطبقة. ومع ذلك، فإنها تميل إلى حجب جزء كبير من الجسيمات الموصلة ومساحة سطح الكربون والكهرل. الالتصاق بين مجمع التيار المرتكز على بولي فينيلدين (PVDF-HFP) وركيزة السيليكون أضعف من تلك الموجودة بين المواد المرنة الأخرى. أظهر مجمع التيار المرتكز على (PVDF-HFP) ذو مقاومة منخفضة مقارنة بالمجمع التيار الذي يحتوي على مادة رابطة كربون ميثيل السليلوز (CMC)، غير أن اللاصق لمجمع التيار مرتكز على كربون ميثيل السليلوز (CMC) أظهر مرونة جيدة مقارنة (PVDF-HFP). لهذا استخدم مجمع التيار المرتكز (PVDF-HFP) كطبقة موصلة في هذا العمل نظراً للموصلية العالية.

تتمثل إحدى التحديات الأساسية للطباعة ثلاثية الأبعاد في أنها محدودة بسبب ملئ الحقنة وضغط البثق المطلوب. كانت مادة المكثف الكهربائي مزدوج الطبقة صعبة للغاية في الترسيب لأنها حُضرت من مسحوق الكربون وماء تاركة فقاعات هواء. مما سيؤدي ذلك إلى حدوث فواصل في ترسب الفتيل مما يؤدي إلى حدوث فجوات وانهيار الهيكل. لتحسين الهيكل، يجب أن تحافظ كل طبقة على شكلها عند الطباعة. من الصعب التنبؤ بانكماش مكونات مواد المكثف الكهربائي مزدوج الطبقة ذات اللزوجة المنخفضة، لأنها تنتشر بعد ترسيبها من الفوهة. بعض الأحماض والمذيبات سريعة التبخر أثناء الترسيب؛ ومن المهم اختيار حمض ومذيب مناسبين. تعتبر خصائص الترسيب الانسيابي لمكونات المكثف الكهربائي مزدوج الطبقة مهمة في عمليات الطباعة ثلاثية الأبعاد وتحتاج إلى مراقبتها. تم تعديل اللزوجة ومحتوى جزيئات معجون الكربون النشط وفقاً لمتطلبات فوهة الطباعة أي راس الحقنة 0.6 ملم. كما هو مبين في الشكل 3.

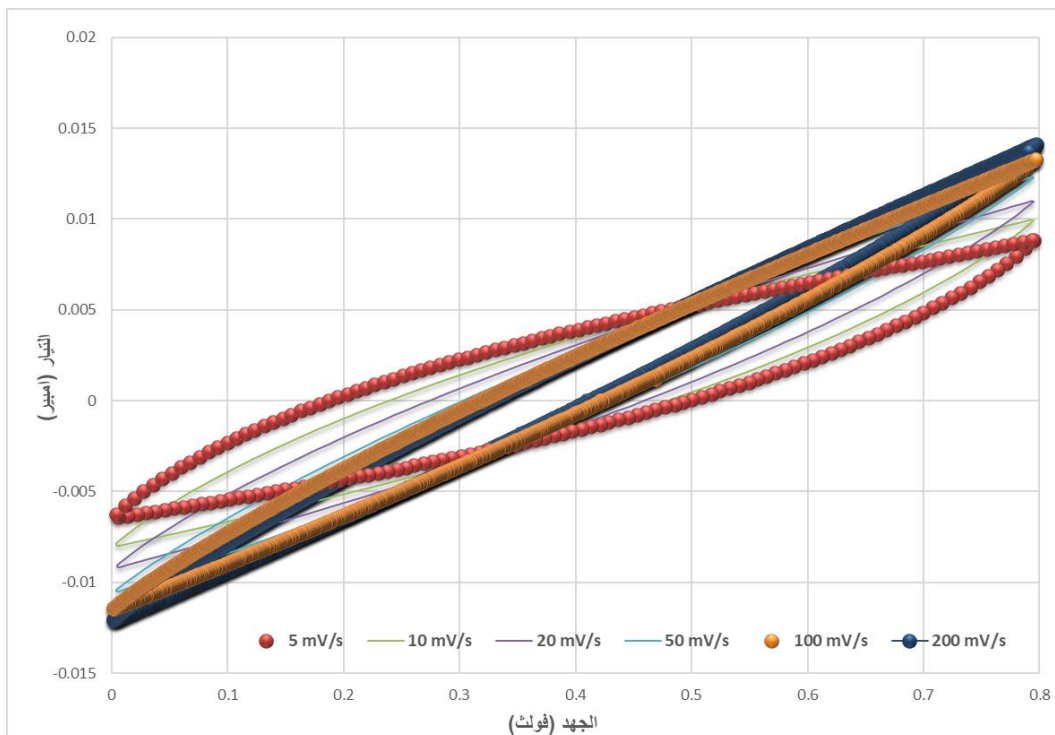
تؤدي الطبقتان بسماكة 0.7 ملم من الغلاف العلوي بنمط قرص العسل بنسبة 20 % إلى انكماش طبقة السيليكون وتشوهها. لتجنب سطح الهيكل غير الأملس على نمط قرص العسل، كان من الضروري زيادة كثافة التعبئة فوق 20%. من المهم جدًا الحصول على طبقات مطبوعة ممتازة من ركيبة السيليكون وتجنب تكوين فجوات كبيرة. سيؤدي ذلك إلى تقليل العيوب داخل مجمع التيار وطبقات الكربون النشط وسيؤدي إلى سماكة موحدة وأداء كهروكيميائي مستقر.



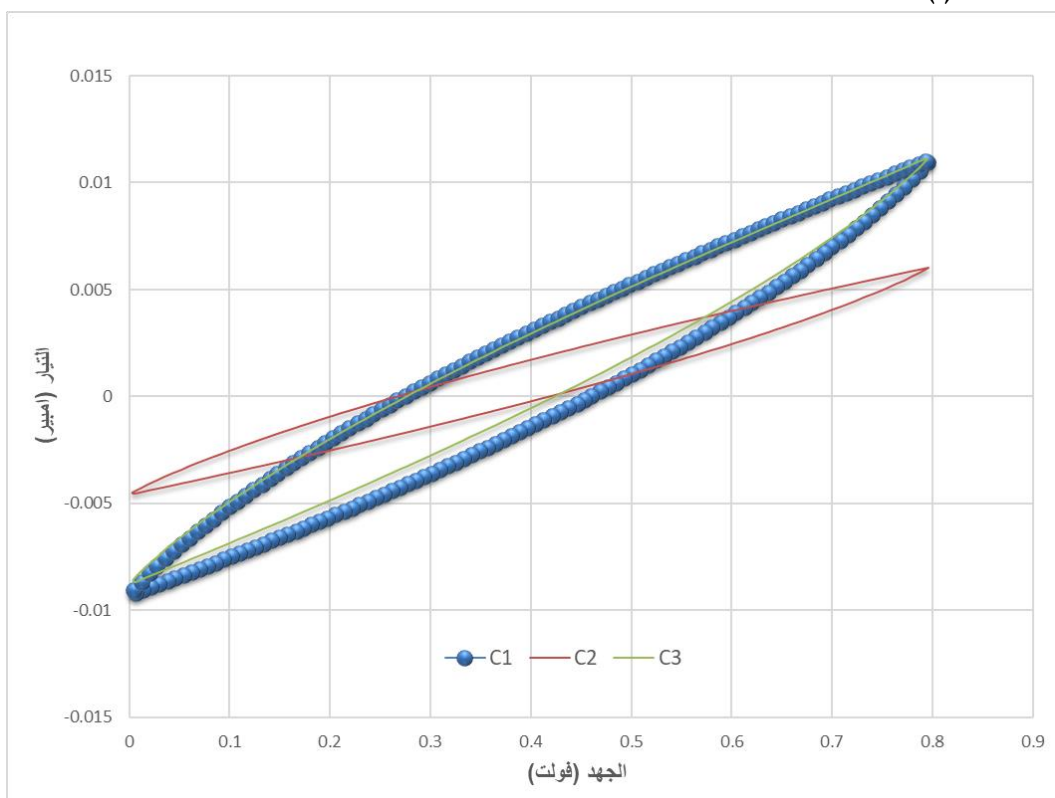
الشكل 3: نمط قرص العسل من السيليكون يظهر طبقة انكماش ملحوظة بالخطوط.

1.6 قياس الجهد الدوري

لتحديد الخصائص الكهروكيميائية للكربون النشط المطبوعة على السيليكون، من المهم للغاية إجراء قياسات بمعدل مسح فولتي كافٍ باستخدام قياس الجهد الدوري، وهو الأسلوب الأكثر استخدامًا لتحديد السعة للمكثف. ثم قياس الجهد الدوري في النطاق الجهد من 0 فولت إلى 0.82 فولت لمنع تحلل الماء. تم تسجيل قياس الجهد الدوري في 2.4 (حمض البولي فينيل الكحول والفوسفوريك) لتحديد C1 و C2 و C3. حيث كانت كتلة كل قطب كهربائي 0.2 جم والكتلة الإجمالية 2.4 جم. تم حساب سعة C1 و 2C باستخدام المعادلة (1) لتكون 250 مل فأراد و 230 ملي فأراد عند 5 ملي فولت للثانية على التوالي. تم حساب سعة C3 بواسطة المعادلة (2) لتكون 130 ملي فأراد. الأقطاب الكهربائية الخاصة بـ C1 سعة قدرها 130 و 80 و 40 و 15 ملي فولت عندما ترتفع معدلات المسح الضوئي إلى 10 و 20 و 50 و 100 و 200 ملي فولت في الثانية على التوالي بمعدلات شحن بطيئة للغاية، يمكن للأيونات أن تنتقل إلى عمق أكبر داخل معجون الكربون النشط مما يؤدي إلى تفاعل تغطية السطح بشكل أفضل. كما هو مبين في الشكل 4 (أ)، يمكن ملاحظة أن السعة تتناقص بسبب زيادة معدل المسح الضوئي حيث لا تستطيع الأيونات الوصول إلى أسطح القطب بالسرعة الكافية. لوحظ تيار اختزال طفيف في C2 بمعدل مسح ضوئي 100 ملي فولت في الثانية، مما يُظهر تيار فارادي (تفاعل). يتضح من الشكل 4 (ب) أن مكثفات كهربائية مزدوجة الطبقة الثلاثة تعرض سلوكًا مستطيلًا نسبيًا وأن C1 و C2 أظهرتا أكبر تيار بمعدل مسح ضوئي قدره 5 ملي فولت على الثانية مقارنة مع C3. ومع ذلك، فإن انكماش سطح السيليكون في نمط قرص العسل يلعب دورًا في تغيير الأبعاد ويجب تجنبه بسبب تأثيره السلبي على أداء المكثفات الكهربائية مزدوجة الطبقة.



الشكل 4 (أ)

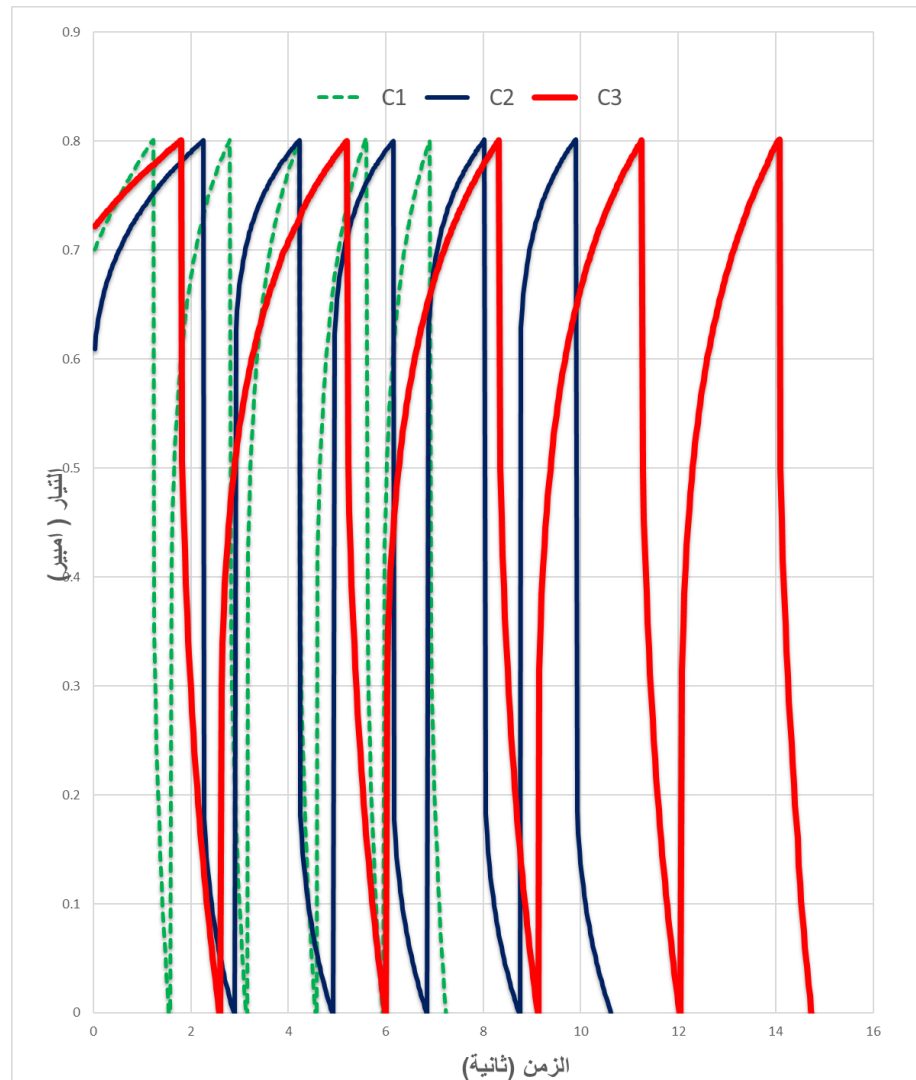


الشكل 4 (ب)

2.6 الشحن والتفريغ

تم إجراء اختبار الشحن / التفريغ أو ما يعرف اختبار الجلفانيساتيني لـ C1 و C2 بكثافة التيار تبلغ 10 ملي أمبير لكل جرام و 5 ملي أمبير لكل جرام لـ C3 في نطاق الجهد من 0 فولت إلى 0.82 فولت. يوضح الشكل 5 منحني شحن وتفريغ نموذجي للدورة الخامسة لكل مكثف كهربائي مزدوج الطبقة. السعة لـ C1 تم إيجادها من منحني الشحن / التفريغ باستخدام المعادلة (3)، هي 10 ملي فآراد، أي ما يقرب

من نصف السعة المحسوبة من قياس الجهد الدوري بمعدل مسح ضوئي 100 ملي فولت للثانية. هناك تأثير ضئيل لقيمة التيار ويمكن أن يُظهر بوضوح أن الخطأ الجهد (V_{error}) كان مرتفعاً للغاية في منحنى الشحن /التفريغ C3. المقاومة غير المعوضة قد تولد هذا الخطأ. تمت زيادة انخفاض الجهد (iR_{drop}) في بداية كل منحنى تفريغ بسبب المقاومة العالية وخطأ الجهد العالي. كان من الصعب قياس وقت الانخفاض iR والتفريغ في C3. البحث [5] اعتبروا القطب الكهربائي مستقطباً عند دفع جهد القطب بعيداً عن دائرته المفتوحة. تم الإبلاغ سابقاً عن اتجاهات انحدار سلبية مماثلة لمنحنى الشحن لأجهزة مكثفات كهربائية مزدوجة الطبقة [7]. بسبب المقاومة غير المعوضة ، فإن تأثير الانخفاض الكبير في معدل iR على القياس أمر بالغ الأهمية. تم انحلال (PVDF-HFP) في محلول NMP حيث يُعتقد أنه المسؤول عن جهد المسح الذي يذهب إلى النطاق السلبى أثناء عملية التفريغ في منحنيات الشحن /التفريغ الجلفانيساتاتيكي وبعيداً عن القيمة المنطقية للصفر المنحل بالكهرباء المائي. منحنيات الشحن/التفريغ غير الخطية هي سمات سلوك البطارية، والتي لا ينبغي استخدامها لقياس السعة [8].



الشكل 5: منحنيات الشحن/التفريغ الجلفانيساتاتيكي للدورات الخمس الأولى لكل مكثف كهربائي مزدوج الطبقة على 0.82 فولت مسجل على تيار شحن 10 مل أمبير

تمت مقارنة قيم السعة المحددة باستمرار. كانت أعلى سعة محددة محسوبة بواسطة المعادلة (4) هي تلك التي بلغت 7 ملي فأراد لكل جم للمكثف C1. لوحظ وجود حد أدنى من السعة المحددة قدره 1 ملي فأراد لكل جم للمكثف C3 بكثافة تيار تبلغ 5.7 ملي أمبير لكل جم على كثافة مماثلة لحمض البولي فينيل والفوسفوريك (PVA/H₃PO₄)، انخفضت قيمة السعة المحددة للمكثف عندما انخفض تيار الشحن/التفريغ. تم حساب كثافة الطاقة والقدرة من منحنيات الشحن/التفريغ بالمعادلتين (5) و (6).

$$E = \frac{1}{2} C_s v^2 \quad (5)$$

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (6)$$

حيث E هي كثافة الطاقة وC_s هي السعة المحددة وv هي الجهد و Δt هي وقت التفريغ وP القدرة. تم الحصول على أعلى كثافة للطاقة في C1 لتكن 2.08 Ws g⁻¹ مع قدرة مقابلة تبلغ 3.07 W g⁻¹. بينما يحتوي C3 على كثافة طاقة أقل تبلغ 0.29 Ws g⁻¹ مع قدرة مقابلة تبلغ 1.49 W g⁻¹.

5. الخلاصة

تم تصنيع مكثفات كهربائية مزدوجة الطبقة ذو مرونة عالية مع ركيزة من السيليكون بنجاح بواسطة تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد. لقد ثبت أن الطباعة ثلاثية الأبعاد هي تقنية واعدة لعمل أنماط مختلفة وهياكل دقيقة باستخدام مواد متعددة لها خصائص ميكانيكية مختلفة.

كان جهاز بثق أو ترسيب واحد فقط مسؤولاً عن بناء الهيكل الموصوف في هذا العمل. تم ترسيب ثلاث خلايا في عملية واحدة على هيئة نمط قرص العسل بمعدل تغذية أو تدفق يبلغ 16000 خطوة لكل ملي متر. تم التحقيق في القطب عند الشحن والتفريغ وتم اختبار الأداء الكهروكيميائي عند جهد 0.82 فولت مع الكهرل الهلامي. لقد ثبت أن تقليل المقاومة الداخلية يعتمد على قوة الرابط وسمك وبنية النمط وكثافة تعبئة الأقطاب الكهربائية وهلامية الكهرل وأقطاب الكربون النشط ومجمع التيار. مع مزيد من التحسينات على معجون الكربون النشط والكهرل ومعلمات الطباعة، يجب تحقيق دقة أقل من 0.7 مم للحفاظ على استقرار المكثف الكهربائي. يمكن تطبيق المعلمات المحسنة على الأجهزة الأخرى وتصنيع الهياكل الإلكترونية ثلاثية الأبعاد للمستهلكين. لتلبية احتياجات الأجهزة الإلكترونية، سيتم في المستقبل استكشاف الخصائص الميكانيكية للمكثفات خفيفة الوزن ومرنة وخصيصاً المصنوعة بواسطة الطباعة ثلاثية الأبعاد. سيتم فحص أداء الدوائر المدمجة من مكثفات كهربائية مزدوجة الطبقة المرنة بالتوازي أو على التوالي في العمل القادم.

6. المراجع

- [1] Li, B., Yu, M., Li, Z., Yu, C., Wang, H. and Li, Q., 2022. Constructing Flexible All-Solid-State Supercapacitors from 3D Nanosheets Active Bricks via 3D Manufacturing Technology: A Perspective Review. *Advanced Functional Materials*, p.2201166.
- [2] Zong, W., Ouyang, Y., Miao, Y.E., Liu, T. and Lai, F., 2022. Recent Advance and Perspective of 3D Printed Micro-Supercapacitor: From Design to Smart Integrated Devices. *Chemical Communications*.
- [3] Bhardwaj, S., de Souza, F.M. and Gupta, R.K., 2022. Role of 3D Printing Technology in High-Performance Supercapacitors. In *Handbook of Energy Materials* (pp. 1-26). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [4] Yan, X., Tong, Y., Wang, X., Hou, F. and Liang, J., 2022. Extrusion-Based 3D-Printed Supercapacitors: Recent Progress and Challenges. *Energy & Environmental Materials*.
- [5] Dung, H.T., Dung, N.T., Dung, T.Q., Tung, D.T., Yen, N.T., Thu, T.V. and Hong, P.N., 2018. Fabrication and characterization of supercapacitor electrode by 3D printing. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 56(5), pp.574-581.
- [6] Gu, Y., Zhang, Y., Shi, Y., Zhang, L. and Xu, X., 2019. 3D all printing of polypyrrole nanotubes for high mass loading flexible supercapacitor. *ChemistrySelect*, 4(36), pp.10902-10906.
- [7] Sun, G., An, J., Chua, C.K., Pang, H., Zhang, J. and Chen, P. (2015) 'Layer-by-layer printing of laminated graphene-based interdigitated microelectrodes for flexible planar micro-supercapacitors', *Electrochemistry Communications*, 51, pp. 33-36.
- [8] Wang, L., Wu, Q., Zhang, Z., Zhang, Y., Pan, J., Li, Y., Zhao, Y., Zhang, L., Cheng, X. and Peng, H. (2016) 'Elastic and wearable ring-type supercapacitors', *Journal of Materials Chemistry A*, 4(9), pp. 3217-3222.