

ABSTRACT

Conventional strain sensors, typically made from metals and semiconductors, are rigid, difficult to mount on curved surfaces, and unable to detect large deformations. To overcome this, this research will study and develop a flexible stretchable sensor. The sensor will be applied to human skin to detect changes in deformation. This sensor is known as a flexible strain sensor (FSS). The basic principle of the sensor consists of three components: a transducing electrode, a functional composite structure, and a connecting cable.

In this study, conductive materials Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT), copper nanoparticles (CuNP) and silver nanoparticles (AgNp) were chosen to make sensors because they have high conductivity values. The flexible materials used in this research are ecoflex and silicone. The sandwich method was chosen because the possibility of agglomeration in conductive materials is very small. The first stage is focused on the manufacture of electromechanical test equipment. In the second stage, the research will focus on making sensors with variations of silicone rubber flexible material and MWCNT conductive material. In the third stage, sensors will be made with a variety of conductive materials MWCNT:AgNp and MWCNT:CuNp. In the fourth stage, Ecoflex/MWCNT@AgNp based sensors will be made to compare the effect of flexible materials. Next, all sensors were characterized and tested for sensor performance. After that, the sensor is used to detect body movement.

Based on the results of the first phase of research, the electro-mechanical test equipment has been successfully developed to test the sensitivity, linearity, response and recovery time, and durability of the strain sensor. The test tool shows a small average strain error of 0.18%. So the test equipment can be used to test the performance of flexible strain sensors. The results of phase 2 showed that the SR/MWCNT-0.7/SR sensor has superior performance compared to other sensors. The sensor showed high sensitivity (0-90% strain range, $GF = 34.47$), detection range up to 90%, linearity of 0.993 at 0-50% strain, and durability for strain, twisting, and bending, with each subjected to 1,200 pull and release cycles. In stage three, the SR/MWCNT@AgNps-based sensor produced a conductive path that was more responsive to deformation. The MWCNT@AgNps sensor has a sensitivity and linearity of 38.46 (0-100% strain) and 0.997. It also has good response time and stability with 90 ms and 1200 pull and release cycles. In stage 4 of the research, the comparison between SR/MWCNT@AgNps and Ecoflex/MWCNT@AgNps sensors showed that the sensor with silicone rubber substrate had superior performance. The four sensors that have been developed show stable electromechanical performance and are responsive to strain, each with unique characteristics according to their design and material composition. These results prove that the sandwich manufacturing method is effective for producing flexible sensors that can be applied to various motion monitoring needs.

Keywords: *flexible strain sensor, sensor performance, sandwich, filler, elastomer, human motion detection.*

INTISARI

Sensor regangan yang digunakan saat ini terbuat dari logam dan semikonduktor sehingga bersifat kaku dan sulit dipasang pada permukaan yang melengkung, serta tidak dapat mendeteksi perubahan deformasi yang besar. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini akan mempelajari dan mengembangkan sensor fleksibel yang dapat diregangkan. Sensor tersebut akan diaplikasikan pada kulit manusia untuk mendeteksi perubahan deformasi. Sensor ini dikenal dengan istilah *fleksible strain sensor* (FSS). Prinsip dasar dari sensor ini terdiri dari tiga komponen: elektroda transduksi, struktur komposit fungsional, serta kabel penghubung.

Pada penelitian ini, material konduktif *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT), nanopartikel tembaga (CuNP) dan silver nanopartikel (AgNP) dipilih untuk membuat sensor karena memiliki nilai konduktivitas yang tinggi. Sedangkan material fleksibel yang digunakan pada penelitian ini adalah Ecoflex dan *silicone rubber*. Metode *sandwich* dipilih karena kemungkinan terjadi aglomerasi pada material konduktif sangat kecil. Tahap pertama difokuskan pada pembuatan alat uji elektro mekanikal. Tahap kedua, penelitian difokuskan pada pembuatan sensor dengan variasi material fleksibel *silicone rubber* dan material konduktif MWCNT. Pada tahap ketiga telah dibuat sensor dengan variasi material konduktif MWCNT:AgNP dan MWCNT:CuNP. Pada tahap ke empat dibuat sensor berbasis Ecoflex/MWCNT@AgNP untuk membandingkan pengaruh material fleksibel. Selanjutnya seluruh sensor dilakukan karakterisasi dan pengujian performa sensor. Setelah itu, sensor digunakan untuk mendeteksi gerakan tubuh.

Berdasarkan hasil penelitian pada tahap pertama menunjukkan bahwa alat uji elektro-mekanis telah berhasil dikembangkan untuk menguji sensitivitas, linearitas, waktu respons dan pemulihan, serta durabilitas sensor regangan. Alat uji menunjukkan kesalahan regangan rata-rata yang kecil yaitu 0,18%. Sehingga alat uji dapat digunakan untuk menguji performa sensor regangan fleksibel. Hasil penelitian tahap 2 menunjukkan bahwa sensor SR/MWCNT-0,7/SR memiliki performa yang unggul dibandingkan sensor yang lainnya. Sensor menunjukkan sensitivitas tinggi (rentang regangan 0-90%, GF = 34,47), rentang deteksi hingga 90%, linearitas 0,993 pada regangan 0-50%, serta durabilitas untuk regangan, puntiran, dan tekukan, dengan masing-masing mengalami 1.200 siklus tarik dan lepas. Pada tahap tiga, sensor berbasis SR/MWCNT@AgNPs menghasilkan jalur konduktif yang lebih responsif terhadap deformasi. Sensor MWCNT@AgNPs memiliki sensitivitas dan linearitas 38,46 (regangan 0-100%) dan 0,997. Sensor ini juga memiliki waktu respons dan stabilitas yang baik dengan 90 ms dan 1200 siklus tarik dan lepas. Pada penelitian tahap 4, hasil komparasi antara sensor

SR/MWCNT@AgNps dan Ecoflex/MWCNT@AgNps menunjukkan bahwa sensor dengan *substrate silicone rubber* memiliki performa yang lebih unggul. Empat sensor yang telah dikembangkan menunjukkan performa elektromekanis yang stabil dan responsif terhadap regangan, masing-masing dengan karakteristik unik sesuai desain dan komposisi materialnya. Hasil ini membuktikan bahwa metode manufaktur sandwich efektif untuk menghasilkan sensor fleksibel yang dapat diaplikasikan pada berbagai kebutuhan pemantauan gerakan.

Kata kunci: sensor regang fleksibel, performa sensor, *sandwich*, *filler*, *elastomer*, deteksi gerak manusia.