Kajian Literatur Perkembangan Inovasi Teknologi Tekstil Berbasis Silikon Polimer Untuk Aplikasi Kesehatan

Penerapan Teknologi Di Industri

Nandang Suhendra*, Muslim E. Harahap, Saeful Rochman, Seto Roseno
Center for Materials Technology - Agency for the Assessment and Application of Technology,
Gedung No.224 Kawasan Puspitek, Serpong15314, Tangerang Selatan

*Surel: ndandang.suhendra@bppt.go.id

ARTICLE INFO

Diterima 11 November 2019
Direvisi 16 Juni 2020
Disetujui 13 Juli 2020
Nomor Artikel 202105
Halaman 29-41

Kata kunci:

Tekstil pintar
Sensor
Aktuator
Perawatan Kesehatan
Fiber

Abstract

DEVELOPMENT OF SILICONE-BASED TEXTILE TECHNOLOGY INNOVATION FOR HEALTH APPLICATION - LITERATURE STUDY.

Smart textiles are textiles that have been developed with new technology that adds value to the wearer, which has the ability to do many things that traditional fabrics cannot do. One material for making smart textiles is silicone polymer. The purpose of this review is to provide an overview of the main innovation pathways in the development of silicon-based textiles and its application in healthcare. The study method used in the writing of this paper is based on desk research or literature review from various sources available to date in the public domain. The results obtained are that there are 3 generations of technological innovations related to the integration of silicon into textiles, namely inserting silicon into the textile surface, silicon is added at the textile manufacturing stage and combined with silicon at the yarn stage. This integration method can affect the nature of the yarn network in the fabric/textile, such as fabric flexibility. Its applications in the health care field includesurgery, drug release system, biomonitoring and therapy & wellness.

Keywords: smart textile, sensor, actuator, healthcare, fibre

Abstrak

PERKEMBANGAN INOVASI TEKNOLOGI TEKSTIL BERBASIS SILIKON POLIMER UNTUK APLIKASI KESEHATAN - KAJIAN LITERATUR.

Tekstil pintar adalah tekstil yang telah dikembangkan dengan teknologi baru yang memberikan nilai tambah bagi pemakainya, yaitu memiliki kemampuan untuk melakukan banyak hal yang tidak dapat dilakukan oleh kain tradisional. Salah satu material untuk pembuatan tekstil pintar ini adalah silikon polimer. Tujuan dari tinjauan ini adalah untuk memberikan gambaran tentang jalur inovasi utama dalam pengembangan tekstil berbasis silikon dan aplikasinya dalam bidang kesehatan. Metoda kajian yang digunakan dalam penulisan paper ini adalah berdasarkan *desk research* atau kajian literatur dari berbagai sumber yang tersedia sampai saat ini di domain publik. Hasil yang didapat adalah bahwa ada 3 generasi inovasi teknologi terkait pengintegrasian silikon ke dalam tekstil, yaitu memasukkan silikon ke permukaan tekstil, silikon ditambahkan pada tahap pembuatan tekstil dan silikon yang dikombinasi pada tahap benang. Metode integrasi ini dapat memengaruhi sifat jaringan benang pada kain / tekstil, seperti fleksibilitas kain. Aplikasinya pada bidang kesehatan meliputi bedah, sistem pelepasan obat, biomonitoring dan terapi kesehatan.

© 2021 JITM

PENDAHULUAN

Berikut ini adalah fitur-fitur kain setelah diimbuhi silikon polimer): (a) anti air; (b) menjadikan kain lebih lembut, (c) tahan lama, (d) elastis; ketahanan ikatan; (f) transparan; (g) tahan cuaca dan panas [1, 2].

Penyertaan silikon pada tekstil dapat meningkatkan kualitas dan performa tekstil yang lebih tinggi [1, 2].

- Silikon berbentuk lapisan tipis pada serat (seperti lapisan tipis / film minyak atau lapisan yang keras, yang dapat memberikan efek tahan air walaupun dalam keadaan yang sangat halus;
- Silikon dapat mengurangi koefisien friksi antar serat secara signifikan untuk mendapatkan atau menghasilkan kehalusan kain yang luar biasa;
- Silikon membentuk lapisan pada permukaan serat yang berefek pada peningkatan kekuatan dan ketahanan kain terhadap pencucian dan *dry cleaning*;
- Silikon merupakan pelapis yang fleksibel pada permukaan serat, dengan demikian dapat meningkatkan sifat *stretch back* (ketidak-kasaran) dan kelembutan;
- Silikon berbentuk pelapisan transparan pada permukaan kain untuk meningkatkan *deep coloring* (pewarnaan mendalam) dan *fastness* (tahan luntur) dari *dye* (pewarna) atau *dyed item* (barang yang dicelup) di bawah berbagai kondisi, atau silikon ini tahan terhadap berbagai zat kimia;
- Silikon berdasarkan pada ikatan kimia backbonedari siloxane bond (Si-O-Si) memiliki energi ikat *intermolecular* yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis resin organik lainnya dalam komposisi ikatan C-C-C yang membuat silikon memiliki ketahanan yang luar biasa terhadap cuaca dan panas.

Ketika berbicara mengenai fungsi pakaian, sebagian besar orang akan mengatakan bahwa pakaian merupakan sesuatu yang dapat dikenakan untuk memberikan perlindungan, untuk bergaya bagi pemakainya dan memproteksinya dari kondisi lingkungan. Namun setelah mempelajari fungsi pakaian yang lebih luas, didapatkan pengetahuan mengenai adanya istilah tekstil pintar (*smart textile*). Menurut beberapa ahli di bidangnya, dinyatakan bahwa tekstil pintar telah membuka jalan untuk perubahan penggunaan tekstil ke arah yang lebih luas [1, 2].

Pertanyaannya sekarang adalah: apakah yang dimaksud dengan *smart textiles* (tekstil pintar) itu? *Smart textile* adalah kain / tekstil yang telah dikembangkan dengan teknologi baru yang memberikan nilai tambah bagi pemakainya [3]. Dalam artikelnya, Gaddis menyebutkan bahwa apa yang

membuat kain pintar itu revolusioner adalah bahwa kain pintar memiliki kemampuan untuk digunakan dalam melakukan banyak hal yang tidak dapat dilakukan oleh kain tradisional, termasuk untuk keperluan komunikasi, mengubah warna, menghantarkan energi, dan bahkan tumbuh [3].

Tekstil pintar dapat dibagi menjadi dua kategori berbeda, yaitu: (1) untuk peningkatan estetika dan (2) memiliki kinerja. Contoh estetika adalah yang mencakup segala sesuatu mulai dari kain yang menyala hingga kain yang dapat berubah warna. Tekstil pintar dapat merespon pengaruh yang berasal dari luar atau lingkungan sekitarnya berupa rangsangan mekanik (getaran), perubahan temperatur (termal), adanya sumber magnet, kimia, aliran dan medan listrik, atau lainnya. Cara meresponnya tekstil pintar ini dapat dikendalikan sesuai dengan keperluan aplikasinya. Beberapa jenis kain dapat dipergunakan untuk mengumpulkan energi dari lingkungan dengan memanfaatkan getaran, suara atau panas, bereaksi terhadap input yang telah disetel.

Lalu ada tekstil pintar yang dapat meningkatkan kinerja, yang akan berdampak besar pada industri atletik, olahraga ekstrem, dan militer [3, 4]. Ada kain yang membantu mengatur suhu tubuh, mengurangi hambatan angin dan mengendalikan getaran otot, yang semuanya membantu meningkatkan kinerja atletik. Kain jenis lainnya telah pula dikembangkan untuk pakaian pelindung dari bahaya lingkungan yang ekstrem seperti radiasi dan efek perjalanan ruang angkasa [3]. Industri kesehatan dan kecantikan juga mengambil keuntungan dari inovasi ini, yang berkisar dari tekstil medis pelepas obat, hingga kain yang diimbuhi dengan pelembab, parfum, dan sifat anti-penuaan [3].

Hughes berpendapat bahwa tekstil merupakan inti dari kemajuan teknologi manusia, dimana tekstil telah digunakan oleh manusia selama kurang lebih dua ribu tujuh ratus decade [5]. Perkembangan tekstil terkait erat dengan kunci penemuan pembentukan pola hidup masyarakat global selama beberapa dekade.

Minat dan penemuan tekstil silikon polimer sebagai tekstil pintar telah menyingkapkan *boundaries* (batas-batas) dalam membuka potensi pakaian yang lebih luas, yang mana tekstil pintar ini dapat digunakan untuk keperluan pertahanan, olah raga, obat-obatan dan pemantauan kesehatan [2, 6]. Hal ini ditandai dengan jumlah publikasi yang luar biasa besarnya dengan spektrum investigasi penggunaan yang sangat luas, seperti: sebagai pemancar daya dan sinyal untuk pengukuran EKG [7], sensor regangan [8], perangkat tangkap gerak [9], perangkat untuk elektroterapi [10], sensor tekanan [11], sensor kimia [12], dan perangkat fotovoltaiik [13]. Serat multifungsi

ini dapat menjadi komponen kunci dari tekstil pintar dan interaktif, dengan keunggulan yang menarik, seperti biaya rendah, memiliki daya tahan, dan kemudahan adaptasi. Untuk menggunakan serat konduktif ini, serat harus kuat, fleksibel, stabil terhadap lingkungan, dan tahan terhadap bahan kimia.

Tujuan penulisan paper / tinjauan ini adalah untuk memberikan gambaran mengenai jalur kunci inovasi dalam pengembangan tekstil pintar berbasis silikon polimer untuk diterapkan pada keperluan pengobatan dan perawatan kesehatan.

BAHAN DAN METODE

Metodologi yang digunakan dalam penulisan paper / tinjauan ini adalah berdasarkan *desk research*. Materi tulisan ini diambil dari berbagai literatur seperti jurnal, buku, produk komersial dan paten yang diterbitkan. Sumber literatur yang dipilih adalah publikasi setelah tahun 2010 yang tersedia di internet.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi Serat dan Komponen dalam Tekstil Pintar

Tekstil atau dikenal pula dengan sebutan kain, merupakan produk yang terbuat dari serat, baik yang berasal dari serat alam maupun serat buatan (sintetis) yang kemudian dipintal menjadi benang. Benang dapat dibentuk menjadi kain dengan berbagai cara, tergantung pada keperluan penggunaannya [2].

Menurut Rattfalt (2013) serat dapat dikategorikan sebagai berikut [14]:

Gambar 1: Klasifikasi Serat [7]

Gambar 1 menjelaskan klasifikasi serat yang terdiri dari serat alam dan serat artifisial. Contoh serat alam adalah serat kapas, serat kapuk, serat rami, serat sutra dan serat wol. Contoh serat artifisial adalah rayon, rayon viskosa, poliester, serat akrilat, dan lain-lain.

Tiga komponen yang harus ada dalam tekstil pintar, yaitu sensor, aktuator dan unit pengontrol [15]. Bahan tekstil dimodifikasi dan dipasang perangkat

silikon polimer miniatur untuk membuat tekstil pintar. Tekstil ini seperti halnya kain biasa, namun dapat menyediakan fungsi khusus dalam berbagai situasi sesuai dengan desain dan aplikasinya.

Pada era milenium ini, kebutuhan manusia akan tekstil telah meningkat pada tahapan dimana kain itu tidak lagi hanya untuk melindungi tubuh dari kondisi/keadaan lingkungan, namun kain juga dapat digunakan untuk menunjukkan status diri, gaya, keindahan dan bahkan kekayaan.

Sejarah Inovasi Tekstil Pintar

Penciptaan tekstil sangat erat kaitannya dengan penemuan yang telah membentuk pola hidup sosial atau masyarakat, seperti adanya bingkai rajukan oleh William Lee 1589 [15], pesawat terbang ulang alik oleh John Kay pada tahun 1733 [16] dan *Spinning Jenny* oleh James Hargreaves sekitar tahun 1765 [16], dan ditetapkan sebagai landasan bagi revolusi industri pertama. Revolusi baru sedang berlangsung saat ini, dimana tekstil penggunaannya sudah berkembang fungsinya dengan menggabungkan dan menyisipkan komponen silikon polimer dalam tekstil. Salah satu contoh penggunaan tekstil silikon polimer pertama adalah penggunaan ikat kepala yang dilengkapi dengan alat penerangan pada baletnya *La Farandole* pada tahun 1883 [1]. Selanjutnya gaun Ratu Elizabeth I, misalnya, disulam dengan benang yang dibungkus emas.

Pada akhir abad ke-19, sesuai dengan perkembangan peradaban manusia, dimana orang sudah mulai terbiasa dengan peralatan listrik, para desainer dan insinyur mulai menggabungkan listrik dengan pakaian sebagai perhiasan, mengembangkan rangkaian kalung yang diterangi, topi, bros dan kostum lainnya yang bercahayaan listrik [6,7]. Contoh lainnya, adalah pada akhir 1800-an, seseorang dapat mempekerjakan wanita muda yang dihiasi gaun malam bertabur cahaya dari perusahaan untuk menyediakan hiburan pesta koktail dilayani oleh para gadis yang disebut sebagai *Electric Girl Lighting* [8].

Pada tahun 1968, Museum Kerajinan Kontemporer di New York City mengadakan pameran inovatif yang dinamakan *Body Covering* yang terfokus pada hubungan antara teknologi dan pakaian. Acara ini ditampilkan di dalam ruang astronot sesuai dengan pakaian yang bisa mengembang dan mengempis, menyala, dipanaskan dan dinginkan sendiri [4]. Pakaian yang ditampilkan ini merupakan koleksi karya Diana Dew, seorang desainer yang menciptakan garis mode silikon polimer, termasuk gaun pesta *electro luminescent* dan ikat pinggang yang bisa membunyikan sirene alarm [10].

Dengan berkurangnya ukuran dan turunnya biaya produksi perangkat silikon polimer, serta meningkatnya fleksibilitas juga kompleksitas geometri dalam ukuran kecil, hal ini telah mendorong pada kemudahan dalam mengintegrasikan perangkat silikon polimer dengan pakaian (tekstil).

Meningkatnya penggunaan tekstil pintar di abad ke-20 tidak terlepas dari perkembangan ilmu dan teknologi material dan silikon polimer, yang mana ruang lingkup penggunaan silikon polimer yang ditanam dalam kain pun semakin luas. Polimer konduktif merupakan inovasi utama yang ditemukan oleh Heeger et al. pada tahun 1977 [17] yang hadiah Noble-nya baru diperoleh setelah 33 tahun kemudian [18, 19]

Perkembangan penting lainnya adalah kemajuan dalam teknologi transistor, dengan penciptaan efek medan MOS (*meta-oxide-semiconductor*) pertama pada tahun 1960 [20, 21]. Penggunaan silikon

polimer berbasis transistor telah memunculkan pakaian terang yang dipatenkan pada tahun 1979 [22].

Tiga jalur berbeda telah digunakan untuk mengintegrasikan silikon polimer ke dalam tekstil. Tiga generasi berbeda dari tekstil silikon polimer ini menambahkan silikon polimer atau sirkuit ke pakaian (generasi pertama), kain fungsional seperti sensor dan sakelar (generasi kedua), dan benang fungsional (generasi ketiga). Sebelum penciptaan E-tekstil ada juga banyak contoh penggunaan serat konduktif dalam pembuatan tekstil, kembali sejauh abad kedua [18]. Garis waktu yang menunjukkan evolusi E-text diberikan oleh Gambar 2.

Setiap metode integrasi akan memiliki pengaruh pada sifat tekstil seperti sifat geser tekstil, atau kelenturannya, yang keduanya mempengaruhi sifat drapabilitas. Gambar 3 menunjukkan contoh setiap generasi tekstil silikon polimer, dengan contoh kontemporer dari setiap generasi tekstil pintar [18].

Gambar 2. Garis waktu dari berbagai generasi tekstil silikon polimer. Garis waktu ini menunjukkan kapan teknologi dimulai [18].

Gambar 3. (Kiri) Tempat baterai sel koin Adafruit. Generasi pertama melihat perangkat yang ditempel pada tekstil. (Tengah) Elektroda rajutan. Generasi kedua tekstil silikon polimer menggambarkan kain fungsional di mana elemen konduktif diintegrasikan ke dalam tekstil. (Kanan) Contoh benang fungsional (dalam hal ini Benang LED). Generasi ketiga dari tekstil silikon polimer menggambarkan silikon polimer yang tertanam ke dalam tekstil pada tingkat benang [18].

Tekstil pintar yang akan dibahas dalam paper ini adalah tekstil pintar berbasis silikon polimer, yang mana seratnya memiliki sifat konduktif secara silikon polimer yang berkaitan dengan tekstil (tekstil silikon polimer). Namun untuk sementara dalam bahasan ini, tekstil silikon polimer akan dinamakan tekstil pintar,

walaupun penamaan ini bagi sebagian orang sudah dianggap ketinggalan jaman [18], namun mengawali penulisan di bidang ini dipakai istilah tekstil pintar terlebih dahulu supaya dapat menarik perhatian terutama bagi pembaca yang baru mengenal adanya *advanced textiles* [23].

Tinjauan literatur sejarah perkembangan teknologi tekstil pintar ini difokuskan pada inovasi teknologi yang telah dipatenkan dan produk-produk yang dikomersilkan, dari sumber yang ada di internet. Sumber non-internet telah dirujuk sedapat mungkin, namun dalam banyak hal, khususnya untuk produk tekstil pintar, hanya terdapat di situs website.

Tinjauan historis ini akan difokuskan terutama pada hasil-hasil penelitian setelah 2010 dibidang perawatan kesehatan. Minat peneliti pada tekstil pintar telah meningkat secara signifikan sejak 2010. Tujuan yang lebih spesifik dari kajian literatur ini adalah untuk meninjau jalur utama pengembangan tekstil pintar untuk diterapkan untuk keperluan pengobatan dan perawatan kesehatan.

Penerapan Tekstil Pintar untuk Perawatan Kesehatan

Tekstil pintar berbasis silikon polimer untuk perawatan kesehatan meliputi sensor tekstil, aktuator, dan sistem *wearable* silikon polimer, yang tertanam ke dalam tekstil untuk dapat meregistrasi dan mentrans-

misikan data fisiologis, serta komunikasi nirkabel antara pemakai dan operator, misalnya, pasien dan perawat / dokter pribadi. Sistem semacam itu dapat mengontrol mobilitas pergerakan pasien, sehingga memberikan tingkat kenyamanan atau psiko-fisiologis pasien lebih tinggi, terutama ketika bio-monitoring jangka panjang diperlukan [24-27].

Secara umum, aplikasi tekstil pintar untuk obat-obatan dan perawatan kesehatan bervariasi dari aplikasi bedah menggunakan benang tunggal hingga berupa pakaian yang lebih rumit dengan sistem aksila kompleks untuk keperluan perawatan kesehatan pribadi. Belum ada klasifikasi tekstil pintar untuk aplikasi ini, namun untuk mengawalinya, dapat disampaikan dengan merujuk pada kelompok-kelompok yang membedakanya dengan tekstil medis konvensional. Tentu karena fungsi-fungsi penerapan tekstil pintar ini masih berkembang, saat ini baru diketahui bahwa tekstil pintar ini dapat digunakan pada sistem pelepasan obat (*drug release*), tekstil dengan kinerja biometrik dan tekstil aktif untuk terapi dan kesehatan. Tabel 1 di bawah ini merupakan ringkasan aplikasi utama dari tekstil pintar untuk bidang medis [23, 28-30].

Tabel 1. Penerapan Tekstil Pintar untuk Pengobatan dan Perawatan Kesehatan [31]

Application	In vitro	In vivo
Surgery	Bandages Wound-care	Sutures Soft-tissues Orthopaedic implants Cardiovascular implants
Hygiene	Uniform for medical personal Hospital textiles	-
Drug-release systems	Smart bandages and plasters	-
Bio-monitoring	Cardiovascular and haemodynamic activity Neural activity Muscle activity and kinematics Respiratory activity Thermoregulation	-
Therapy and wellness	Electrical stimulation therapy Physiotherapy Auxiliary systems Active thermoregulation systems	-

(a)

(b)

(c)

Gambar 4. Scaffold bersulam [32](a); pembalut luka dengan sensor pH [33] (b) selimut penghangat hangat [3] (c)

Dalam pencapaian baru di bidang yang terkait ilmu material, produk canggih berupa tekstil medis pintar lahir di dunia ini. Khusus untuk material bedah yang dapat ditanamkan (*implanted*), terobosan nyata telah diperoleh dalam rekayasa jaringan menggunakan teknologi tekstil, untuk keperluan pengembangan struktur dua dan tiga dimensi. Dengan struktur yang dapat ditanamkan itu, dan senyawa yang mendorong distribusi sel serta adanya sifat adhesi di dalam tubuh, maka material tekstil tersebut dapat memiliki sifat mekanis yang luar biasa dan dapat menjamin adanya kesempatan untuk menciptakan struktur geometri yang berbeda-beda. Gambar 5 (a) menampilkan sampel *scaffold* yang dikembangkan oleh sulaman kimia di TITV Greiz [34, 35].

Tekstil pintar / cerdas bedah non-implan atau in vivo juga dapat ditandai dengan dimensi dua atau tiga struktur dan / atau senyawa fungsional tambahan. Itu bisa berbasis serat miniatur biosensor yang memantau atau meningkatkan proses penyembuhan. Misalnya, sudah ada beberapa skenario disarankan untuk memastikan pemantauan tingkat pH untuk manajemen luka dan luka bakar untuk penilaian perubahan biokimia di lingkungan luka (Gambar 6 (b)) [33].

Gambar 5: Contoh sampel Scaffold jaringan [34, 35]

Kategori tekstil medis pintar yang relatif baru adalah sistem pemberian obat berbasis tekstil (Gambar 6(a)) [29, 36]. Dalam beberapa kasus, pemberian obat transdermal dapat menjadi alternatif yang baik untuk pil tradisional dan obat-obatan dalam situasi seperti itu ketika diperlukan mengurangi efek pada lambung dan saluran usus, atau obat-obatan kehilangan aktivitasnya. Bahkan, pemberian obat transdermal adalah solusi ketika pemberian oral tidak mungkin atau sulit [29]. Perpaduan tekstil dan bioteknologi dengan studi kimia dan farmasi bisa menawarkan berbagai skenario untuk pengembangan sistem pengiriman obat. Tekstil dapat memiliki fungsi dari pembawa atau lapisan pembentuk, misalnya *patch transdermal*, hingga sistem canggih dengan pelepasan obat yang terkontrol.

Gambar 6: Tekstil medis dengan balutan pengiriman obat pelumas [36] (a); Motherboard TM yang Dapat Dipakai untuk pemantauan tanda-tanda vital [37] (b); Selimut fototerapi Philips untuk penyakit kuning bayi yang baru lahir pengobatan [38] (c)

Selain fungsi *biomonitoring*, sensor pintar dapat membantu dalam profilaksis dan terapi pengaturan sebagai stimulasi listrik otot dan pemantauan postur [39-42]. Untuk aplikasi seperti foto dan terapi fotodinamik, tekstil bisa jadi bahan pembawa. Ada sejumlah perkembangan seperti untuk menghilangkan rasa sakit dan pengobatan penyakit kuning yang didasarkan pada *light emitting diode* (LED) dan teknologi serat optik (Gambar 6 (c)). Untuk aplikasi ini, tekstil memastikan pengembangan sistem yang fleksibel yang dapat dipakai dan portabel dengan antarmuka yang ramah. Selain itu, teknologi tekstil merupakan pendekatan yang menguntungkan untuk pembuatan penebar tekstil dengan dimensi dan struktur yang berbeda. Bahan elektro-konduktif juga digunakan untuk pengembangan sistem termoregulasi

aktif. Mereka dapat diintegrasikan ke dalam pakaian atau ke pakaian item untuk memastikan pengaturan suhu eksternal dalam sistem pakaian atau menjadi aset dalam nyeri infra merah manajemen^[43].

Sensor Tekstil pada Tekstil Pintar untuk Sensor Perawatan Kesehatan.

Seperti yang telah disebutkan di atas, sensor tekstil untuk penilaian fisiologis dan tujuan terapi berbeda dalam fungsi dan aplikasi, bahan dan solusi teknologi, dan tingkat integrasi tekstil. Menurut prinsip kerja umum mereka, itu bisa fisik, biokimia dan optic transduser. Selanjutnya, sensor tekstil tersebut dapat dibagi menjadi beberapa kategori sesuai dengan tingkat integrasinya ke dalam struktur tekstil. Hal ini

sebagian besar ditentukan oleh pendekatan teknologi yang dipilih. Menurut tinjauan literatur, empat kategori struktur sensor umum didefinisikan:

- berbasis serat, ketika sensor adalah benang tunggal;
- terstruktur tekstil, ketika semua senyawa transduser adalah bahan tekstil;
- berbasis tekstil, ketika tekstil merupakan substrat atau senyawa lain yang tidak sensitif, tetapi tidak dapat dipisahkan dari transduser;
- tekstil terintegrasi, ketika tekstil membawa fungsi pembawa.

Di atas itu, sensor tekstil dapat dicirikan oleh fungsi, unit pengukuran dan aplikasinya. Variasi dalam pendekatan implementasi solusi memastikan penerapan teknologi yang sama untuk tujuan yang berbeda. Sebagai contoh, teknologi serat optik menawarkan skenario untuk penilaian kriteria tersebut seperti suhu, kelembaban, oksigenasi darah dan tingkat pH keringat, laju respirasi dan pergerakan. Demikian, untuk menyajikan gambaran umum dari solusi yang tersedia untuk perawatan kesehatan, mereka dijelaskan sesuai dengan fungsi sensorik mereka. Seringkali sensor pintar memerlukan pendekatan implementasi yang kompleks dengan bergabung teknologi untuk mencapai kinerja yang lebih baik. Meskipun sensor tekstil berbeda dalam strukturnya, senyawa utama, yang didasarkan pada prinsip kerja, adalah substrat dan, penginderaan atau aktif bahan. Struktur sensor diimplementasikan oleh teknologi seperti pelapisan, film tipis, litografi dan pencetakan inkjet, serta dapat juga memasukkan elemen fungsional seperti lapisan penutup atau enkapsulasi yang melindungi senyawa sensitif^[44].

Tekstil Elektroda

Tekstil elektroda dapat dibagi menjadi yang pasif dan aktif [45]. Dalam kedua kasus, prinsip operasi mereka mirip dengan prinsip kerja elektroda konvensional.

Elektroda pasif dapat didefinisikan sebagai sensor tekstil yang mampu mengakuisisi sinyal listrik. Mereka menemukan sebagian besar aplikasi dalam pendaftaran aktivitas jantung dan otot dengan mendeteksi potensi listrik yang dihasilkan oleh jantung dan otot. Mereka menemukan aplikasi untuk estimasi detak jantung, analisis variabilitas detak jantung (HRV), elektrokardiografi (EKG) dan rekaman elektromiografi. Ada juga investigasi dalam pengembangan elektroda tekstil untuk penilaian aktivitas listrik otak. Elektroda ini mengukur fluktuasi tegangan yang dihasilkan dari aliran arus ionik dalam neuron dan merupakan solusi alternatif untuk elektroda elektroensefalografi konvensional. Di atas itu, tekstil pasif elektroda dapat digunakan dalam penilaian respons kulit galvanik. Mereka mengubah konduktivitas

mereka sesuai dengan kejenuhan elektrolit dalam keringat yang dihasilkan dari permukaan kulit. Elektroda seperti itu menemukan aplikasi dalam tekstil dan pakaian pintar untuk *biomonitoring* dan *biofeedback* nirkabel terus menerus sistem dapat dipakai.

Elektroda tekstil aktif untuk tekstil medis pintar dapat dirujuk ke elektroda untuk stimulasi listrik transkutan. Elektroda tersebut mentransduksi arus listrik yang diterapkan ke penyelidikan jaringan pada permukaan kulit untuk mengaktifkan sel-sel saraf yang ditargetkan, reseptor kulit atau unit sensorik dan motorik tubuh lainnya atau mencapai penghilang rasa sakit melalui stimulasi listrik saraf [40, 46].

Bahan yang paling umum digunakan untuk implementasi sensor adalah bahan tekstil konduktif berupa benang untuk pembuatan elektroda tekstil melalui teknologi manufaktur tekstil konvensional seperti menenun, merajut, dan menyulam. Pendekatan lain menawarkan solusi yang diterapkan melalui inkjet dan sablon, dan teknologi film tipis seperti sol-gel dan metode *sputtering* [47, 48].

Sensor Temperatur

Parameter penting lainnya dalam pemantauan kesehatan adalah suhu tubuh. Suhu tubuh merupakan hasil dari keseimbangan antara produksi panas dan kehilangan panas dan mencerminkan proses kimia dan fisik termoregulasi disatukan dengan aktivitas sistem organ lain, misalnya sistem endokrin dan saraf. Untuk penilaian medis, parameter yang paling informatif dan signifikan adalah suhu inti, yaitu suhu konstan di bagian tubuh yang lebih dalam dan di bagian ekstremitas proksimal [49].

Sensor suhu berdasarkan teknologi tekstil pintar dapat memberikan evaluasi perubahan suhu pada permukaan kulit dan lingkungan dekat tubuh. Data ini dapat digunakan untuk aplikasi sebagai penilaian fisiologis, kontrol dan peningkatan kenyamanan pasien, dan pemantauan penyembuhan luka. Teknologi manufaktur dan rekayasa tekstil menawarkan solusi untuk fabrikasi sensor serat berbasis benang tunggal, atau tenunan, rajutan, bordir dan dicetak untuk estimasi suhu [50, 51]. Dengan prinsip operasi mereka, sensor suhu yang dilaporkan dirancang seperti termokopel, sensor resistif atau regangan, semikonduktif dan optik [49].

Awalnya termokopel dapat dianggap sebagai solusi paling sederhana untuk implementasi sensor suhu karena strukturnya. Mereka terdiri dari dua bahan logam yang berbeda digabungkan dalam satu titik dan tegangan terkait dengan perbedaan suhu dihasilkan persimpangan antara logam. Data yang dicapai selanjutnya dapat dikonversi menjadi sinyal suhu keluaran oleh sirkuit silikon polimer. Tolak atau saring sensor suhu berfungsi sebagai detektor suhu

resistansi (RTD) [52]. Prinsip kerja sensor semacam itu didasarkan pada perubahan resistansi listrik logam terkait dengan suhu. Kedua jenis sensor suhu yang disebutkan biasanya dibuat dari benang konduktif atau dengan aplikasi dari kawat logam monofilamen. Sensor semikonduktif berbasis polimer dan sinyal suhu dicapai sesuai dengan analisis resistensi semikonduktor [52].

Tipe lain dari sensor suhu adalah sensor berbasis serat Bragg grating (FBG), yang merupakan bahan optik sensitif memantulkan panjang gelombang cahaya tertentu dan mentransmisikan yang lain. Rekayasa dan pelapisan serat teknologi menginspirasi pengembangan sensor miniatur benang tunggal berdasarkan polimer termosensitif dan karbon nanotube dan sensor berbasis FBG [51].

Sensor Laju Pernafasan

Dalam fisiologi, respirasi didefinisikan sebagai proses pengambilan oksigen dan menghilangkan karbon dioksida dari sel-sel dalam tubuh [53]. Hal ini merupakan proses biokimia dua tahap yang menghasilkan gas pertukaran dan respirasi seluler. Pernapasan ditandai dengan laju respirasi (RR, napas per menit) [53].

Pernapasan yang terdiri dari aktivitas inhalasi dan pernapasan adalah bagian dari pernapasan dan selaras dengan gerakan perut dan dada. Sensor regangan memastikan estimasi gerakan ini secara efisien dan kemudian data yang diperoleh dapat digunakan untuk evaluasi laju respirasi (RR). Serat optik adalah salah satu bahan yang paling sering digunakan untuk keperluan ini karena kesederhanaan relatif dari pendekatan pengukuran dan pemrosesan serat optik dengan teknologi seperti tenun dan bordir [53, 54].

Meskipun laju respirasi memiliki aplikasi terbatas dalam penilaian disfungsi pernapasan, parameter ini adalah penting dalam pemantauan telemetry selama prosedur penilaian klinis tertentu, pemantauan tidur dan sejumlah gangguan pernapasan. Sensor tekstil untuk estimasi RR juga menemukan sejumlah aplikasi dalam pakaian pelindung dan tempur, tekstil pintar untuk pencegahan sindrom kematian bayi (SIDS) secara tiba-tiba, dan pemantauan tanda-tanda vital untuk pasien usia lanjut atau pasien dengan disabilitas [55-57].

Untuk tujuan ini, pertama-tama pernapasan adalah menjadi indikator aktivitas fisik normal. Selain itu, parameter ini bersama dengan parameter kardiovaskular juga dapat menjadi kriteria penting dalam fisiologi olahraga dalam rangka merencanakan pelatihan yang efisien tanpa risiko bagi kesehatan [56].

Sensor Tekstil untuk Analisis Kinematik

Selain pendaftaran parameter fisiologis, bahan tekstil dapat membantu dalam analisis kinematik, pemantauan gerak dan posisi tubuh. Kriteria ini penting dalam rehabilitasi dan penilaian sistem kerangka selama perawatan terapi dan diagnostik dengan aplikasi serat optik, bahan piezoelektrik dan elastomer [41, 42]. Pendekatan tersebut memastikan solusi tekstil terintegrasi yang dapat dipakai untuk pemantauan kiprah, postur, unit tubuh dan sendi-sendi tertentu yang tahan lama, dan posisi umum atau aktivitas pergerakan pasien. Data yang diperoleh dapat diproses dan digunakan untuk menangkap gambar jarak jauh secara *real-time* tanpa menggunakan aplikasi kamera atau sistem sensor inersia yang rumit. Selain dapat dipakai sensor, ada sensor penangkap gerak untuk aplikasi seperti Ambient Assisted Living (AAS) dan pemantauan tidur [58];

Gambar 7: Sensor Tekstil untuk Analisis Kinematik [59]

Solusi untuk aplikasi tersebut dapat dipastikan dengan sensor tekstil kapasitif dan diimplementasikan sesuai dengan varietas skenario menggunakan tekstil konduktif dan bahan piezoelektrik [58].

Gambar 8: Realizing pressure sensors using textile process e.g.: Keyboard [60]

Sensor Kelembaban

Kelembaban adalah kriteria penting dalam banyak proses filologis dan biologis, dan dapat secara signifikan mempengaruhi kesehatan manusia. Awalnya kelembaban dapat disebut sebagai kelembaban absolut yang menunjukkan jumlah sebenarnya dari uap. Kelembaban relatif (RH) menyiratkan persentase jumlah uap di udara pada suhu yang ditentukan yang dibandingkan dengan jumlah uap, yang dapat menampung udara suhu ini.

Sensor kelembaban kapasitif terdiri dari dua elektroda dan ditempatkan dielektrik antara elektroda. Nilai RH ditentukan sesuai dengan perubahan kapasitansi konstanta dielektrik, yang merupakan kelembaban relatif dan suhu dielektrik. Jadi, persyaratan utama untuk bahan dielektrik adalah hidroskopisitas, yaitu penyerapan uap yang mudah di dalam lingkungan hidup.

Prinsip operasi sensor kelembaban resistif didasarkan pada pengukuran perubahan dalam impedansi listrik dalam media hidroskopi. Bahan higroskopis menyerap air dan ionik kelompok fungsional dipisahkan, menghasilkan peningkatan konduktivitas. Dengan demikian, ketika kelembaban meningkat, resistensi material menurun [61]. Keduanya menjelaskan prinsip kerja sensor kapasitif dan resistif konvensional yang dapat ditransfer ke tekstil melalui skenario implementasi yang berbeda.

Pengukuran kelembaban relatif yang efisien biasanya membutuhkan suatu pendekatan yang kompleks dengan menggabungkan teknologi seperti tenun, bordir, pelapis serat, pencetakan inkjet dan litografi [62-65]. Pilihan pendekatan yang paling tepat ditentukan oleh struktur sensor yang dipilih, bahan dan aplikasi. Awalnya tekstil dapat berhasil digunakan sebagai penyerap uap atau kelembaban dari bahan substrat karena karakteristik fisik dan kimianya. Selain itu, tekstil konduktif juga merupakan kandidat yang baik untuk penerapan elektroda sensor.

Saat ini, ada beberapa pendekatan pengembangan sensor kelembaban melalui teknologi tekstil pintar untuk aplikasi perawatan kesehatan seperti pencegahan maag, pemantauan tingkat keringat dan kelembaban dalam luka. Sebuah tim peneliti dari Spanyol menawarkan sensor kelembaban tekstil sepenuhnya untuk pasien tirah baring (*bed rest*) dikembangkan dengan benang konduktif dan monofilamen logam dengan menenun (*weaving*) dan menekan (*pressing*) [62]. Para peneliti dari Universitas Teknologi Warsawa menunjukkan pendekatan lain dari pengembangan sensor dengan menggabungkan teknologi inkjet-printing dan *coating*. Elektroda sensor adalah inkjet yang dicetak langsung pada tekstil dan kemudian dilapisi dengan lapisan penyerapan uap [64]. Conolly et al menggunakan juga teknologi cetak

untuk mengembangkan sistem pemantauan kelembaban dengan sensor tekstil terintegrasi untuk penilaian penyembuhan luka [65]. Skenario lain untuk sensor kelembaban tekstil direalisasikan dalam kerangka proyek Biotex Uni Eropa. Mereka telah mengembangkan suatu sensor kapasitif terstruktur *sandwich* untuk pemantauan laju keringat [66, 67].

Sensor untuk Estimasi Tingkat PH

Tingkat pH adalah salah satu indikator penting untuk penilaian proses biokimia dalam fisiologi dan diatur oleh homeostasis asam-basa. Tingkat pH adalah parameter penting dalam penilaian proses penyembuhan luka dan pemantauan keringat. Teknologi tekstil dan teknik modern menawarkan beberapa skenario untuk mengembangkan sensor seperti itu yang memastikan pemantauan pH terus menerus secara *real-time*. Meskipun terdapat berbagai perkembangan, ada sejumlah skenario utama untuk implementasi sensor yang dijelaskan dalam literatur [33, 51, 68-70]. Salah satunya didasarkan pada aplikasi bahan halokromik seperti pewarna dan hidrogel yang peka terhadap pH dan analisis kolorimetri lebih lanjut. Pendekatan seperti itu untuk mengukur pH keringat berdasarkan platform berbasis tekstil dijelaskan oleh Coyle et al [51] dan Caldara et al [68].

Fungsi tekstil untuk pengumpulan dan penyimpanan keringat. Lapisan yang peka terhadap pH diimobilisasi pada kain dilakukan sebagai indikator lingkungan pH dan LED dapat melakukan analisis keringat yang terkuantifikasi. Solusi lain adalah integrasi serat optik dengan lapisan yang sensitif terhadap pH ke dalam luka tertutup [69].

Pendekatan lain untuk menilai perubahan rentang pH pada luka didasarkan pada pengukuran impedansi. Nocke et al. menyarankan skenario untuk sensor benang tunggal impedimetrik [65]. Sensor tersebut terdiri dari dua elektroda emas monofilamen dan lapisan yang peka terhadap pH. Elektroda bagian dalam ditutupi hidrogel yang peka terhadap pH dan elektroda luarnya berkerut di sekitar bagian dalam sensor denyut nadi.

Oksimetri nadi (*pulse oximetry*) adalah teknik non-invasif untuk estimasi saturasi oksigen arteri (SpO₂) pada jaringan biologis yang dipelajari. Oksimetri nadi mengukur penyerapan cahaya oksigen dan hemoglobin terdeoksigenasi pada dua panjang gelombang berbeda dalam spektrum inframerah-dekat. Oksimetri nadi digunakan dalam aplikasi klinis seperti ruang gawat darurat dan pemulihan, perawatan intensif dan selama anestesi [71-73].

Meskipun teknologi tekstil pintar belum banyak dieksplorasi dibandingkan dengan pengembangan

tekstil elektroda atau tekstil sensor lainnya, namun sudah ada solusi yang ditawarkan awalnya didasarkan pada dua skenario. Zysset et al. telah menunjukkan sebuah skenario berdasarkan pada aplikasi silikon polimer miniatur diproses secara konvensional dan diintegrasikan ke dalam tekstil. LED Miniatur dan fotodioda (PD) ditempatkan pada garis-garis plastik fleksibel yang dijalin menjadi kain dengan benang konduktif, yang memastikan interkoneksi listrik antara senyawa yang dimasukkan [73]. Pendekatan lain dengan penerapan teknologi serat optik telah disarankan dalam proyek penelitian Ofseth dan tim peneliti dari Swiss. Dalam kerangka investigasi sebelumnya, campuran serat optik digunakan untuk mengukur oksigenasi darah [71-75] telah menawarkan tiga opsi untuk mengembangkan Sensor SpO₂ dengan menenun dan menyulam dua teknik menggunakan plastik poli (metil metakrilat) serat optik (PMMA POF) sebagai bahan penginderaan dan serat poliester sebagai bahan [71].

KESIMPULAN

Pemanfaatan tekstil pintar semakin meningkat ke depannya karena tekstil pintar tidak hanya digunakan untuk melindungi tubuh dari kondisi/keadaan lingkungan, namun kain juga dapat digunakan untuk berbagai aplikasi yang lebih luas, salah satunya adalah untuk perawatan kesehatan.

Silikon polimer merupakan salah satu bahan dalam pembuatan tekstil pintar. Inovasi teknologi dalam tekstil pintar berbasis silikon polimer telah mengalami tiga generasi. Inovasi teknologi generasi pertama dengan merekatkan perangkat pada tekstil, elektroda rajutan. Inovasi teknologi generasi kedua yaitu menggambarkan kain fungsional di mana elemen konduktif diintegrasikan ke dalam tekstil. Contoh benang fungsional (dalam hal ini Benang LED). Sedangkan inovasi teknologi generasi ketiga dari tekstil silikon polimer menggambarkan silikon polimer yang tertanam ke dalam tekstil pada tingkat benang.

Generasi pertama tersebut akan selalu mengganggu sifat-sifat tekstil, bahkan perangkat film tipis (walaupun fleksibel), tidak akan memiliki sifat geser dari tekstil normal. Tekstil generasi kedua dapat mempertahankan nuansa tekstil tetapi terbatas pada aplikasi seperti pembuatan jalur silikon polimer, dan penginderaan berbasis elektroda. Generasi ketiga dari, di mana silikon polimer terkandung dalam struktur benang, tidak mengganggu sifat tekstil dari kain. Karena teknologi ini pada dasarnya dibatasi oleh ukuran silikon polimer yang tergabung, dimensi chip silikon polimer yang tersedia semakin lebih kecil.

Salah satu aplikasi tekstil pintar yang semakin berkembang akhir-akhir ini dan ke masa depan adalah pemanfaatan tekstil pintar untuk aplikasi dalam bidang kesehatan. Beberapa diantara aplikasi tersebut adalah aplikasi bedah, mulai dari benang tunggal hingga ke aplikasi yang lebih rumit. Aplikasi lainnya adalah untuk sistem pelepasan obat, biomonitoring dan terapi kesehatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Teknologi Material Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, khususnya kepada Dr. Mahendra Anggaravidia untuk fasilitas yang diberikan selama penyusunan artikel ilmiah ini.

REFERENSI

- [1] Guler, S.D., M. Gannon, and K. Sicchio, *A Brief History of Wearables*. Apress: In Crafting Wearables. 2016, New York, NY, USA. 3-10.
- [2] Hughes, T., T. Dias, and C. Cork, *A Historical Review of the Development of Electronic Textiles*. Review. Fibers, 2018. **6**(34): p. 15.
- [3] Gaddis, R. *What Is The Future Of Fabric? These Smart Textiles Will Blow Your Mind*. Forbes Style File 2014; Available from: <https://www.forbes.com/sites/forbestylefile/2014/05/07/what-is-the-future-of-fabric-these-smart-textiles-will-blow-your-mind/#745cd0dd599b>.
- [4] Miller, G.E. and M. Dalke, *Illuminated Article of Clothing*, in *U.S. Patent* 1979: USA.
- [5] Adovasio, J.M., O. Soffer, and B. Klíma, *Upper Palaeolithic fibre technology: Interlaced woven finds from Pavlov I Czech Republic, c. 26,000 years ago*. Antiquity, 1996. **70**: p. 526 - 534.
- [6] Hughes, T., T. Dias, and C. Cork, *A Historical Review of the Development of Electronic Textiles - Review*. Fibers, 2018. **6**(34): p. 15.
- [7] Rattfält, L., *Electrical characteristics of conductive yarns and textile electrodes for medical applications*. Medical and Biological Engineering Computing, 2007. **45**: p. 1251-1257.
- [8] Grillet, A., *Optical Fiber Sensors Embedded Into Medical Textiles for Healthcare Monitoring*. IEEE Sensors Journal, 2008. **8**(7): p. 1215-1222.
- [9] Lorusi, F., *Wearable, Redundant Fabric-Based Sensor Arrays for Reconstruction of Body Segment Posture*. IEEE Sensors Journal, 2004. **4**(6): p. 807- 818.
- [10] Oh, K.W., H.J. Park, and S.H. Kim, *Stretchable conductive fabric for electrotherapy*. Journal of

- Applied Polymer Science, 2003. **88**(5): p. 1225-1229.
- [11] Kim, J., *The preparation and characteristics of conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene) thin film by vapor-phase polymerization*. Synthetic Metals, 2003. **139**(2): p. 485-489.
- [12] Kincal, D., *Conductivity switching in polypyrrole-coated textile fabrics as gas sensors*. Synthetic Metals, 1998. **92**: p. 53 - 56.
- [13] Bedeloglu, A., *A Photovoltaic Fiber Design for Smart Textiles*. Textile Research Journal, 2010. **80**(11): p. 1065 - 1074.
- [14] Rattfalt, L., M. Linden, and P. Hult, *Design and development of embroidered textile electrodes for continuous measurement of electrocardiogram signals*. Journal of Industrial Textiles, 2013. **42**(3): p. 303 - 318.
- [15] Lewis, P., *William Lee's stocking frame: Technical evolution and economic viability 1589-1750*. Text. Hist., 1986. **17**: p. 129-147.
- [16] Thackeray, F.W., *Events that Changed Great Britain Since 1689*, ed. J.E.E. Findling. 2002, Westport, CT, USA: Greenwood Publishing.
- [17] Shirakawa, H., et al., *Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of polyacetylene, (CH)_x*. J. Chem. Soc. Chem. Commun., 1977. **16**.
- [18] Hughes-Riley, T., T. Dias, and C. Cork, *A Historical Review of the Development of Electronic Textiles - Review*. Fibers MDPI, 2018.
- [19] 2000., T.N.P.i.C., *was awarded jointly to Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid and Hideki Shirakawa "for the discovery and development of conductive polymers."* 2000.
- [20] Paton, G.A., M.N. Sterling, and J.H. Sanders, *Integral, Electrically-Conductive Textile Filament 6 September 1977.*, in U.S. Patent. 1977: USA.
- [21] Dylan, A.S. *Metal Oxide Semiconductor (MOS) Transistor Demonstrated, The Silicon Engine, Computer History Museum*. 1960 [cited 15 Januari 2019; Available from: <http://www.computerhistory.org/siliconengine/metal-oxide-semiconductormos-transistor-demonstrated/>.
- [22] Miller, G.E. and M. Dalke, *Illuminated Article of Clothing*, in U.S. Patent. 1979: USA.
- [23] Bartels, T.V., *Handbook of Medical Textiles*. 2011, Cambridge: Woodhead Publishing.
- [24] Catrysse, M. and F. Pirotte, *The Use of Electronics in Medical Textiles*. In: *Smart Textiles Medicine and healthcare*. Systems and Applications. , ed. W. Publishing. 2007, Cambridge: Materials. 88 - 104.
- [25] Cherenack, K. and v.P. L., *Smart Textiles: Challenges and Opportunities*. Journal of Applied Physics, 2012. **112**: p. 1 - 14.
- [26] Alemdar, H. and C. Ersoy, *Wireless Sensor Networks for Healthcare*. A Survey, Computer Networks, 2010. **54**: p. 2688 - 2710.
- [27] Schwarz, A., et al., *A Roadmap on Smart Textiles*, in *Textile Progress* M. Sibinski, M. Jakubowska, and M. Sloma, Editors. 2010, Flexible. p. 99 - 180.
- [28] Rigby, A.J. and S. Anand, *Medical Textiles*. In: *Handbook of Technical Textiles*. 2000, Cambridge: Woodhead Publishing.
- [29] Langenhove, V., *Smart Textiles Medicine and healthcare*. Materials, Systems and Applications. 2007, Cambridge: Woodhead Publishing.
- [30] Vargas, S.C., *Smart Clothes - Bekleidung mit integrierten oder adaptierten elektronischen Komponenten (Smart Clothes- Clothing with Integrated or Embedded Electronic Compounds)*. 2005, Hamburg: Diplomica Verlag.
- [31] Mečņika, V., et al., *Smart textiles for healthcare: applications and technologies*, in *Rural Environment Education Personality*. 2014, Institute of Textile Technology and Design of RigaTechnical University: Latvia.
- [32] Rotsch, C., Hanus., and D. Schwabe, *Textile Solutions for Diagnostic and Therapeutic Applications*. In: *Proceedings International Conference Last Advances in High Tech Textiles and Textile-Based Materials, 80 Years of department of Textiles*. 2009. p. 41 - 47.
- [33] Pasche, S., B. Schyrr, and B. Wenger, *Smart Textiles with Biosensing capabilities*. Advances in Science and Technology, 2013. **80**: p. 129 - 135.
- [34] Rotsch, C., Hanus, and D. Schwabe. *Textile Solutions for Diagnostic and Therapeutic Applications*. in *Proceedings International Conference Last Advances in High Tech Textiles and Textile-Based Materials, 80 Years of department of Textiles*. 2009.
- [35] Rotsch, C., Hanus., and D. Schwabe *Textile Solutions for Diagnostic and Therapeutic Applications*. In: *Proceedings International Conference Last Advances in High Tech Textiles and Textile-Based Materials, 80 Years of department of Textiles*. 2009. 41 - 47.
- [36] Gerhardt, L.-C., et al., *Tribological Investigation of a Functional Medical Textile with Lubricating Drug-Delivery Finishing*. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013. **108**: p. 103 - 109.
- [37] Park, S. and S. Jayaraman, *Adaptive and responsive textile structures (ARTS)*. In: *Smart Fibers, Fabrics and Clothing*. 2001, Cambridge: Woodhead Publishing.
- [38] Lorussi, F., E.P. Scillingo, and M. Tesconi, *Strain Sensing Fabric for Posture and Gesture Monitoring*. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2005. **9**: p. 372 - 381.

- [39] Gniotek, K., M. Frydrysiak, and J. Zieba. *Innovative Textile Electrodes for Muscles Stimulation*. In: *IEEE International Workshop in Medical Measurements and Applications (MeMeA) Proceedings*. 2011.
- [40] Keller, T. and A. Kuhn, *Electrodes for Transcutaneous (Surface) Electrical Stimulation*. *Journal of Automatic Control*, 2008. **18**: p. 34 - 45.
- [41] Dunne, L., et al. *Design and Evaluation of a Wearable Optical sensor for Monitoring Seated Spinal Posture*. in *In: 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers Proceedings*. 2006.
- [42] Dunne, L., et al. *A System for Wearable Monitoring of Seated Posture in Computer Users*. in *In: 4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks Proceedings*. 2007.
- [43] Rantanen, J., N. Alftan, and I. J. *Smart Clothing for the Arctic Environment*. in *In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Wearable Computers (ISWC'00)*. 2000.
- [44] Sibinski, M., M. Jakubowska, and S. M., *Flexible Temperature Sensors on Fibres*. *Fibres*, 2010. **10**: p. 7934 - 7946.
- [45] Ferreira da Silva, A., et al., *Photonic Sensors Based on Flexible Materials with FBGs for Use on Biomedical Applications*. *Current Developments in Optical Fiber Technology InTech*, 2013: p. 105 - 132.
- [46] Li L., A.W.M. and Y. Li, *Design of Intelligent Garment with Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation Function Based on the Intarsia Knitting Technique*. *Textile Research Journal*, 2009: p. 1 - 18.
- [47] Xie L., Yang G., and Xu L. *Characterization of Dry Biotential Electrodes*. in *35th Annual International Conference of the IEEE EMBS*. July 2013. Osaka, Japan.
- [48] L. Rattfalt, et al., *Electrical characteristics of conductive yarn and textile electrodes for medical applications*. *Medical Biological Engineering Computation*, 2007. **45**(12): p. 1251 - 1257.
- [49] H. Li, H. Yang, and E. Li, *Wearable sensors in intelligent clothing for measuring human body temperature based on fiber bragg grating*. *Opt Express*, 2012. **20**(11): p. 11740 - 11752.
- [50] Cho, G., K. Jeong, and M.J. Paik, *Performance Evaluation of Textile-Based Electrodes and Motion Sensors for Smart Clothing*. *IEEE Sensors Journal*, 2011. **11**(12): p. 3183 - 3192.
- [51] Coyle, S., D. Morris, and K.T. Lau. *Textile Sensors to Measure Sweat pH and Sweat-Rate During Exercise*. 2019; Available from: http://doras.dcu.ie/3636/1/Coyle_pervasive2009.pdf.
- [52] O. Atalay, et al., *Development of textile based temperature sensor*, in *International Istanbul Textile Congress 2015: Inovative Technologies*. 2015: Istanbul Technical University, Faculty of Textile Technologies and Design, Inonu cd No. 65 Gumussuyu-Beyoglu 33437 Istanbul, Turkey.
- [53] Marco Ciocchetti, et al., *Smart Textile Based on Fiber Bragg Grating Sensors for Respiratory Monitoring: Design and Preliminary Trials*. *Biosensors*, 2015. **5**: p. 602 - 615.
- [54] Sungmee Park, Kyunghye Chung, and Sundaresan Jayaraman, *Wearable: Fundamentals, Advancements, and a Roadmap for the Future*, in *Wearable Sensors: Fundamentals, Implementation and Applications*, Edward Sazonov and Michael R. Neuman, Editors. 2004, Elsevier: Amsterdam.
- [55] Cherenack K. and van Peterson L., *Smart Textiles: Challenges and Opportunities*. *Journal of Applied Physics*, 2012. **112**: p. 1 - 14.
- [56] Chan M., Esteve D., and F. J.-Y., *Smart Wearable Systems: Current Status and Future Challenges*. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2012. **56**: p. 137 - 156.
- [57] Narbonneau F., De Jonckheere J., and Jeanne M., *OFSETH: Optical technologies embedded in smart medical textile for continuous monitoring of respiratory motions under Magnetic Resonance Imaging*. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2010. **7715**: p. 77151 - 77163.
- [58] Lauterbach, C., A. Steinhage, and A. Techmer, *A Large-Area Sensor System Underneath the Floor for Ambient Assisted Living*. *Prevasive and Mobile Sensing and Computing for Healthcare*, 2013. **2**: p. 69 - 87.
- [59] Lauterbach, C., A. Steinhage, and A. Techmer, *A Large-Area Sensor System Underneath the Floor for Ambient Assisted Living*. *Prevasive and Mobile Sensing and Computing for Healthcare*, 2013. **2**: p. 69 - 87.
- [60] Dunne L., W.P., Smyth B., Caulfield B. , *A System for Wearable Monitoring of Seated Posture in Computer Users*. In: *4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks Proceedings*, 13, pp.203-207. 2007.
- [61] Chen, Z. and C. Lu, *Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms*. *Sensor Letters*, 2005. **3**: p. 274 - 295.
- [62] Pereira, T., et al. *Textile Moisture Sensor Matrix for Monitoring of Disabled and Bed-Rest Patients*. in *IEEE International Conference on Computer as a Tool (Eruoccon)*. 2011.
- [63] Rumpf, S. *Patient Monitoring System Based on Textile Sensor Technology*, *Innovations Forum Heidelberg [online] [11-1-2019]* Available at: <http://www.heidelberginnovationsforum.de/file>

- admin/_heidelberg/downloads/Praesentationen_April08/15_Rumpf.pdf*. 2008.
- [64] Weremeczuk, J., G. Tarapata, and R. Jachowicz. *Humidity Sensor Printed on Textile with Use of Ink-Jet Technology*. in *Proc. Euroensors XXVI*,. 2012.
 - [65] Nocke, A., et al., *Miniaturized Textile-based Multi-layer pH-Sensor for Wound Monitoring Applications*. *Autex Research Journal*, 2012. **12**(1): p. 20 - 21.
 - [66] Moriss D., Coyle S., and Wu Y., *Bio-Sensing Textile Based Patch with Integrated Optical Detection System for Sweat Monitoring*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009. **139**: p. 231-236
 - [67] Coyle S., Morris D., and K.-T. Lau, *Textile Sensors to Measure Sweat pH and Sweat-Rate During Exercise*: http://doras.dcu.ie/3636/1/Coyle_pervasive2009.pdf. 2012.
 - [68] Caldara, M., C. Colleoni, and E. Guido, *Development of a Textil-Optoelectronic pH Meter Based on Hybrid Xerogel doped with Methyl Red*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012. **171 - 172**: p. 1013 - 1021.
 - [69] Vincenzini, P. and D. Ross, *Wearable Biosensors for Monitoring Wound Healing*. *Advances in Science and Technology*, 2008. **57**: p. 80 - 87.
 - [70] Van der Schueren, L. and K. De Clerc, *Halochromic Textile Materials as Innovative pH-Sensors*. *Advances in Science and Technology*, 2013. **80**: p. 47 - 52.
 - [71] De Jockkheer, J., M. Jeanne, and A. Grillet. *OFSETH: Optical Fiber Embedded into Technical Textile for Healthcare, an Efficient Way to Monitor Patient Under Magnetic Resonance Imaging*. in *In: Proceedings of the 29th Annual International Conference of IEEE EMMBS, Lyon, France*. 2007.
 - [72] Rothmaier, M., B. Selm, and S. Spichtig, *Photonic Textiles for Pulse Oximetry*. *Optics Express*, 2008. **16**: p. 12973 - 12986.
 - [73] Zysset C., N.N., Buether L. et al., *Textile integrated Sensors and Actuators for Near-infrared Spectroscopy*. *Optics Express*, 2013. **21**(3): p. 1 - 12.
 - [74] Zysset C., Nasser N., and Buether L., *Textile integrated Sensors and Actuators for Near-infrared Spectroscopy*. *Optics Express*, 2013. **21**: p. 1 - 12.
 - [75] De Jockkheer J., Narbonneau F., and D. Kniet, *Optical Fibre Sensors Embedded into Technical Textile for a Continuous Monitoring of Patients under Magnetic Resonance Imaging*. In: *Proceedings of the 30th Annual International Conference of IEEE EMMBS, Vancouver, Canada*. 2008: p. 5266 - 5269