

PENERAPAN TEKNIK *DOUBLE WEAVING* SEBAGAI SIRKUIT TEKSTIL BENANG KONDUKTIF UNTUK KAIN *E-TEXTILES*

APPLICATION OF DOUBLE WEAVING TECHNIQUES FOR CONDUCTIVE THREAD TEXTILE CIRCUIT IN E-TEXTILES FABRIC

Innamia Indriani, Sabrina Ilma Sakina, Dian Widiawati

Institut Teknologi Bandung, Program Studi Kriya, Fakultas Seni Rupa dan Desain Jl. Ganesa No. 10
Kota Bandung, Jawa Barat - Indonesia
E-mail: innamia@office.itb.ac.id

Tanggal diterima: 19 Maret 2021, direvisi: 2 Mei 2021, disetujui terbit: 25 Juni 2021

ABSTRAK

Kemunculan dan perkembangan *smart textiles* memberikan inovasi yang menjanjikan karena bidang busana, sains, dan teknologi bergabung serta memberikan perubahan pada industri tekstil. Kebutuhan akan tekstil tidak hanya sebatas untuk melindungi tubuh dan estetika, namun fungsionalitas tekstil juga mulai dibutuhkan. *E-textiles* menjadi salah satu bagian dari *smart textiles* yang diteliti dikarenakan integrasi antara elektronik dan tekstil menjadi potensi untuk diteliti dengan adanya benang konduktif yang dapat membuat produk tekstil berfungsi secara elektronik serta potensinya sebagai komponen dari *Internet of things* (IoT) di masa depan. Perkembangan *e-textiles* tidak lepas dari peran berbagai bidang salah satunya tekstil. Perkembangan teknologi mendorong para perancang dan pengrajin tekstil untuk mengembangkan batas-batas keterampilan tradisional dan memberikan daya cipta baru karena memiliki wawasan tentang pemanfaatan metode kerajinan dan teknologi maju, dan menyeimbangkannya dengan berbagai spesialisasi dan pendekatan tekstil. Pengintegrasian tekstil dengan elektronik menghasilkan banyak produk dengan berbagai macam teknik fabrikasi yang dapat dilakukan, salah satunya sirkuit listrik. Dengan teknik tenun *double-weaving*, tidak hanya mengembangkan teknik tradisional tersebut namun juga mengintegrasikan kain dengan teknik tersebut menjadi suatu produk kain *e-textiles* dengan menjadikan kain tersebut sebagai sirkuit listrik dan alur untuk benang konduktif. Berbagai macam struktur yang dapat dihasilkan dengan teknik tersebut tidak hanya menghasilkan kain dari segi fungsi namun juga dari segi estetika.

Kata kunci: Benang konduktif, *double weaving*, *e-textiles*, sirkuit tekstil, *smart textiles*.

ABSTRACT

The emergence and development of smart textiles provides promising innovations as the fields of fashion, science and technology combine and bring changes in the textile industry. The need for textiles is not only limited for protecting the body and aesthetics, but textile functionality is also starting to be needed. E-textiles, one part of the smart textiles being researched because the integration between electronics and textiles has the potential to be researched with the presence of conductive threads that can make textile products function electronically and its potential as a component of the Internet of things (IoT) in the future. E-textiles development cannot be separated from the roles of various fields, one of which is textiles. The development of technology encourages textile designers and craftsmen to develop the boundaries of traditional skills and provide new creativity because they have an insight into the use of craft methods and advanced technology, and balance them with various specialties and textile approaches. The integration of textiles with electronics resulting many products with a variety of fabrication techniques, one of which is electric circuits. With the double-weaving technique, it not only develops the traditional technique but also integrates the fabric with this technique resulting an e-textiles fabric product by making the fabric as an electric circuit and path for conductive yarn. The various structures that can be produced by this technique not only produce fabrics in terms of function but also in terms of aesthetics.

Keywords: *conductive yarns, double weaving e-textiles, smart textiles, textiles circuit.*

PENDAHULUAN

Abad ke-19 memberikan perubahan paradigma pada industri tekstil. Di Eropa, produksi tekstil beralih dari kerajinan tangan ke industri produksi massal. Transisi tersebut terjadi sebagian besar disebabkan oleh perkembangan teknologi

proses yang digunakan dalam industri tekstil.¹ Tekstil / pakaian awalnya digunakan untuk memenuhi kebutuhan dasar yaitu melindungi tubuh manusia dari panas, dingin, dan sinar matahari. Pemahaman lebih komprehensif tentang tekstil konvensional mencakup *home textiles* yang

digunakan untuk perabotan rumah tangga, kamar tidur dan kamar mandi. Berdasarkan kebutuhan dasar tersebut, estetika menjadi salah satu pendorong utama masyarakat dalam memakai pakaian dan tekstil, tetapi kebutuhan akan nilai fungsi mulai dibutuhkan sehingga *functional textiles* atau *technical textiles* yang dapat memenuhi kebutuhan yang lebih canggih pun muncul.²

Tekstil cerdas (*smart textiles*) adalah tekstil yang mampu merasakan dan bereaksi terhadap rangsangan lingkungan serta merupakan pengembangan tekstil generasi terakhir yang sudah selangkah lebih maju. Sistem *smart textiles* membuat kain mampu merasakan tubuh manusia dan lingkungan sekitar berkat sensor bervariasi yang ada pada *smart textiles*. Kain tersebut merupakan hasil penelitian interdisipliner dari berbagai bidang seperti bidang desain dan teknologi, komputer sains, fisika, kimia, material sains, nanoteknologi, mikroelektronika, teknologi informasi, dan teknologi tekstil. Kegiatan penelitian interdisipliner tersebut membuat *smart textiles* sebagai salah satu inovasi yang menjanjikan.^{2,3,4} Istilah *smart textiles* pertama kali didefinisikan di Jepang pada tahun 1989. Istilah *smart textiles* berasal dari *intelligent* atau *smart materials*. Benang sutera yang memiliki atribut *shape memory* dianggap sebagai bahan tekstil pertama yang diberi label *smart textiles*.⁵ Dalam pengembangan inovasi pada *smart textiles* diperlukan perspektif dari segi teknis dan kreativitas. Bidang sains, teknik, dan aplikasi sains berfokus pada penemuan material dan fungsi serta kemungkinan aplikasi material tersebut, sedangkan bidang seni dan desain membawa material tersebut keluar dari skala laboratorium menuju penggunaan yang praktis untuk menutup celah kekosongan yang ada antara penelitian dan pasar pengguna. Kolaborasi bidang tekstil dan material sains adalah pusat untuk membuat *smart textiles* menjadi nyata.⁶

Komponen *smart textiles* dapat diterapkan di berbagai proses struktur tekstil. Pada proses pemintalan benang, komponen penghantar listrik dapat dimasukkan ke dalam *spinning dope* (larutan kental bahan mentah yang dilarutkan menjadi bahan kimia dalam proses *spinning*). Pada proses pembuatan struktur tekstil, komponen *smart textiles* dapat diintegrasikan melalui teknik pertununan atau perajutan. Terakhir, dalam proses penyempurnaan penambahan komponen *smart textiles* dilakukan menggunakan teknik *nanocoating*.²

Muncul dan berkembangnya *smart textiles* tidak hanya untuk bidang industri semata sehingga dapat dilakukan dengan pendekatan yang berbeda. Dunia busana, sains dan teknologi bergabung untuk menghasilkan *smart textiles* yang dapat memberikan inovasi terhadap busana yang dirancang. Desain busana sebagai ‘seni berkreasi untuk tubuh’ menjadi penting. Dengan adanya

peningkatan dalam tekstil yang digunakan dari segi teknis maka dibutuhkan keahlian khusus dalam dunia busana untuk menghasilkan hasil atau contoh yang visioner. Pendekatan melalui kerajinan pun dapat dilakukan.^{7,8} Para perancang, desainer tekstil, dan perajin tekstil saat ini bekerja dalam periode transisi yang menarik yang mengubah profesi mereka. Berbekal wawasan keterampilan dan pengetahuan tentang kerajinan yang luas yang didukung oleh pendidikan dan pengalaman bertahun-tahun tetapi, juga semakin banyak berurusan dengan integrasi proses digital ke dalam praktik pembuatan mereka dan sebaliknya menggunakan keterampilan kerajinan untuk ikut campur dalam produksi berbasis teknologi. Sehingga mengembangkan dan mendorong batas-batas keterampilan tradisional atau peluang memberikan daya cipta baru dapat dimiliki karena mereka memiliki wawasan tentang pemanfaatan keterampilan kerajinan dan teknologi maju, dan menyeimbangkannya dengan berbagai spesialisasi dan pendekatan tekstil.^{9,10}

E-TEXTILES

Integrasi antara elektronik dan tekstil teknis atau pakaian menghasilkan produk baru berteknologi tinggi yang disebut tekstil elektronik atau *e-textiles*.¹¹ *E-textiles* menjadi salah satu bidang penelitian multidisiplin dikarenakan membutuhkan keahlian di beberapa bidang seperti tekstil, material, elektronika, mekanika, dan teknik komputer. *E-textiles* dapat diterapkan pada bahan dan proses pembuatan yang berbeda serta selalu berhubungan dengan fungsi penggunaan produk akhir.¹² Pembuatan produk tersebut bertujuan untuk meningkatkan fungsi produk tekstil dan menjadikannya *smart*. Kecerdasan dipahami sebagai suatu kemampuan intrinsik dari suatu produk untuk berinteraksi secara aktif dengan lingkungan dan merespon rangsangan eksternal. Perkembangan teknologi *e-textiles* membutuhkan pendekatan desain baru yang melintasi batas-batas industri tradisional. Fokus inovasi *e-textiles* terdapat pada pemilihan, pengujian, dan penggunaan teknologi yang memungkinkan seperti serat dan interkoneksi yang konduktif secara elektrik dan integrasi pada bahan tekstil. Contoh komponen elektronik yang berintegrasi dengan tekstil diantaranya elektroda (sensor dan aktuator) berbasis serat, *logic circuits* dari tenun, sulam, atau cetak, elemen cahaya yang fleksibel untuk pembangkit listrik dan penyimpanan (misalnya sel surya yang fleksibel dan baterai) dan lainnya.¹¹

Tekstil banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari dan bersentuhan dengan tubuh manusia, oleh karena itu tekstil menawarkan *platform* yang nyaman untuk perangkat seluler Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK). Dasar dari perangkat keras untuk *wearable technology* dapat

dihasilkan dengan *e-textiles* dan menjadi komponen dari *Internet of things* di masa depan. *Smart textiles* mengarah ke fungsi produk (kecerdasan) sedangkan *e-textiles* mengarah ke teknologi (perangkat keras) dimana fungsi *smart* diterapkan. Penelitian dan Pengembangan (R&D) dalam *smart textiles* mengalami peningkatan yang signifikan. Berbagai macam konsep teknis untuk mengintegrasikan *e-textiles* telah diujicoba oleh para pengembang teknologi. Cara integrasi yang baik antara komponen elektronik dan tekstil menjadi kecenderungan penelitian dalam pengembangan dan desain *smart textiles*. Berdasarkan Köhler (2013), para inovator visioner membagi tiga kategori kecanggihan *smart textiles*:

1. Adopsi: tekstil sebagai platform untuk menyematkan perangkat elektronik (misalnya kantung).
2. Integrasi: perangkat elektronik dapat digabungkan dengan rapi (misalnya disulam).
3. Kombinasi: bahan dan struktur tekstil dengan fungsi elektronik yang melekat (misalnya benang transistor, sirkuit berbasis serat, serat fotovoltai).¹¹

Berdasarkan pengintegrasian, Stegmaier (2012) membagi *e-textiles* menjadi tiga kategori utama yaitu:

1. *E-textiles* dengan perangkat elektronik klasik seperti kabel konduksi, sirkuit terintegrasi, LEDs, dan baterai konvensional yang disematkan pada pakaian.
2. *E-textiles* dengan perangkat elektronik modern langsung pada serat tekstil yang mencakup elektronik pasif seperti kabel murni, serat tekstil konduksi atau elektronik yang lebih maju seperti transistor, diode, dan sel surya.
3. Konstruksi tekstil sebagai sensor atau aktuator pada bidang pengintegrasian yang paling dalam.¹³

E-textiles dianggap sebagai solusi kehidupan manusia dalam hal kenyamanan, mempermudah hidup, dan mengatasi masalah keselamatan. Bidang studi utama dalam pengembangan *e-textiles* diantaranya industri elektronik, sistem komunikasi, militer, hiburan, dan kesehatan.¹⁴ Pada akhir abad ke-20, perkembangan *e-textiles* dalam ilmu material dan elektronik memperluas potensi memasang elektronik di dalam pakaian. Inovasi seperti polimer konduktif oleh Heeger dkk. pada tahun 1977, penciptaan MOS (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*) pertama pada tahun 1960, dan penggunaan elektronik berbasis transistor diuraikan dalam paten yang menjelaskan pakaian yang bercahaya pada 1979 adalah inovasi dan pengembangan yang berpengaruh. Sehingga untuk penggunaan *e-textiles* ke tingkat yang lebih baik memerlukan cara integrasi komponen elektronik yang lebih baik dibandingkan sebelumnya. Enkapsulasi perangkat semi-konduktor di dalam

serat benang yang merupakan paten utama dari tahun 2005, 2016, dan 2017 menjadi awal dari bekerjanya benang yang berfungsi secara elektronik.¹⁵ *E-textiles* memberikan peluang kemajuan di masa depan pada bidang fibertronik dan struktur hibrid yang mencakup lebih banyak fungsi elektronik pada tingkat serat, sehingga semua fungsi elektronik seperti daya (baterai), pencahayaan, komunikasi, dan komputasi dapat diintegrasikan atau terpasang pada serat tekstil.¹⁶ Disamping itu, elektronik dan tekstil berpotensi menjadi bidang yang saling melengkapi dibandingkan menjadi bidang yang memiliki keeksklusifan masing-masing. Keduanya menyebar hingga ke bidang mode, desain produk, penelitian material, bahkan pendidikan, sehingga akses dalam membuat sensor pada tekstil dan integrasi perangkat keras komputasi dengan bahan tekstil menjadi terbuka, termasuk pemrograman dari segi bahan baku, bentuk, proses pembuatan, tingkat personalitas, layanan, dan hubungan langsung dengan pengguna serta struktur sosial budaya dan ekonomi disekitarnya.^{17,18}

Bahan baku yang digunakan untuk membuat konstruksi sirkuit elektrik pada *e-textiles* adalah benang konduktif dan kain yang sudah ada lebih dari seribu tahun. Banyak pengrajin yang membungkus benang dengan lembaran logam seperti emas dan perak. Salah satu contoh adalah gaun yang dikenakan oleh Ratu Elizabeth I yang dibordir dengan benang yang dibungkus emas.^{19,20} Hal tersebut membuat *e-textiles* dapat memberikan perspektif yang lebih luas kepada pembuatnya tentang sesuatu yang tradisional dan menantang dalam pola pikir dan gagasan yang sudah ada mengenai keberlanjutan karena *e-textiles* tidak hanya sekedar teknologi seperti *3D printing* ataupun *laser cut*. *E-textiles* mengubah pandangan dari suatu teknik yang *soft* dan *feminine* seperti menjahit, merajut, dan kempa menjadi sesuatu yang *hard* dan *masculine*. Penggabungan teknik kerajinan tradisional dengan ilmu komputasi, elektronik, dan pengetahuan bahan menjadi bidang yang kompleks.²¹ Nevay, et al. (2019) memaparkan *e-textiles* diakui sebagai suatu kerajinan yang melintasi batas kerajinan dan desain karena menggabungkan fungsionalitas suatu teknologi dengan tekstil. Kerajinan yang ada pada *e-textiles* berbeda dengan kerajinan pada tekstil tradisional. Praktik kerajinan tangan yang dimasukkan ke dalam suatu kreasi elektronik dan teknologi menghasilkan keterampilan, tujuan, dan hasil yang baru.²²

Sejak abad kedua puluh sebelum penciptaan *e-textiles*, terdapat banyak contoh penggunaan serat konduktif dalam pembuatan tekstil. Hughes-Riley et al. (2018), memaparkan ada tiga cara yang telah digunakan untuk mengintegrasikan elektronik ke dalam tekstil dan membagginya menjadi tiga

generasi *e-textiles* yang berbeda. Generasi pertama adalah menambahkan elektronik atau sirkuit ke dalam tekstil, generasi kedua adalah kain fungsional seperti sensor dan sakelar, dan generasi ketiga adalah benang fungsional. Masing-masing metode integrasi tersebut akan mempengaruhi sifat tekstil seperti ketegangan kain atau fleksibilitas yang dapat mempengaruhi kemampuan membentuk (drapabilitas).¹⁵

SIRKUIT TEKSTIL

Sirkuit tekstil adalah sirkuit listrik yang dibuat di atas permukaan tekstil. Benang konduktif yang disulam pada permukaan tekstil adalah teknik yang banyak digunakan. Teknik ini digunakan untuk menjahit pola yang menentukan jejak sirkuit, bantalan koneksi komponen, atau penginderaan permukaan menggunakan alat *Computer Assisted Design* (CAD). Pola konduktif tersebut dapat juga dihasilkan dengan menggunakan teknik *inkjet-printed* menggunakan tinta konduktif berbasis *graphene*. Sirkuit tekstil dirancang untuk memiliki tingkat konsumsi daya yang rendah dan impedansi input yang tinggi, berlawanan dengan persyaratan konvensional impedansi rendah untuk interkoneksi komponen. Banyak benang yang tersedia di pasaran dapat digunakan untuk sambungan dan elemen sirkuit seperti benang perak, benang *stainless steel*, titanium, emas, dan timah.¹²

Li, et al. (2019) memaparkan jenis sirkuit tekstil telah banyak dikembangkan dan dilaporkan dengan menggunakan teknik seperti tenun, rajut, sulam, serta *printing*. Sirkuit kain tenun atau *flexible circuit boards* (FCB) menarik perhatian dikarenakan integritas listrik yang luar biasa karena stabilitas mekanisme yang baik. Berbeda dengan rajutan yang dapat direntangkan secara signifikan dan sulam serta *printing* mampu menggabungkan pola konduktif yang rumit dengan biaya yang sangat rendah.²³ Hal tersebut dipaparkan juga oleh Dhawan, et al. (2004), produk *e-textiles* sangat bergantung pada sirkuit listrik berbasis kain. Kain tenun memiliki susunan struktur dan kemampuan untuk melenturkan dan menyesuaikan dengan bentuk yang diinginkan, memberikan kesempatan untuk mengembangkan sirkuit listrik yang fleksibel.²⁴

BENANG KONDUKTIF

E-textiles tidak dapat digunakan tanpa adanya komponen listrik seperti elektroda, konektor, dan interkoneksi.¹² Varnaité (2010) menjelaskan bahwa benang konduktif digunakan dalam waktu yang lama untuk menghasilkan kain pelindung elektromagnetik dan disipasi muatan elektrostatik. Benang dan kain seperti itu semakin banyak digunakan dalam aplikasi yang mengutamakan fleksibilitas dan kesesuaian.²⁵ Benang konduktif berfungsi sebagai sensor atau

substrat penghubung. Dalam proses pembuatannya, serat dan benang konduktif terbuat dari campuran serat logam mulia atau serat alam dengan bahan konduktif.¹⁹ Benang konduktif menjadi satu satunya solusi untuk membuat *e-textiles* yang tahan lama. Hal tersebut dikarenakan pertimbangan dari bahan atau tekstur permukaan kain, *wicking phenomena*, dan abrasi akibat pencucian apabila menggunakan interkoneksi logam menggunakan *screen printing*, *micro dispensing*, dan *inkjet printing*.²⁶

Benang konduktif memiliki bentuk yang beragam seperti bentuk kabel, serat stapel, dan multi filamen. Bahan yang dapat digunakan untuk membuat benang konduktif adalah karbon, tembaga, aluminium, titanium, baja tahan karat atau pelapisan atau pengisian bahan non konduktif dengan bahan konduktif.^{14,27} Pada kain nonkonduktif, benang konduktif diperlukan dengan menjahitkan dan menghasilkan jahitan konduktif pada kain tersebut. Benang konduktif dapat menambahkan sifat konduktivitas ke dalam kain apapun, membuat jejak konduktif semudah menjahit, bahkan dapat digunakan sebagai kabel bertegangan rendah yang tidak berinsulasi. Dipaparkan oleh El-Newashy et al. (2012), struktur dari benang konduktif dapat dikategorikan ke dalam tiga kelas yaitu,

1. Benang yang dibungkus oleh logam. Sehelai benang nonkonduktif yang dibungkus oleh satu atau lebih kabel logam.
2. Benang berisi logam. Kawat benang halus yang berfungsi sebagai inti dilapisi oleh serat non-konduktif.
3. Benang logam. Benang logam tidak memiliki struktur inti yang terselubung. Serat logam menggantikan satu helai atau seluruh helai benang.²⁸

Benang konduktif yang umum digunakan adalah benang logam yang dilapisi dengan *nano-plating* atau membungkus benang inti nonkonduktif. Selain itu, benang konduktif dapat dibuat dengan memintal serat stapel dengan serat logam seperti pembuatan benang wol.²⁰ El-Newashy et al. (2012) menjelaskan bahwa satu atau lebih helai benang konduktif dapat diintegrasikan ke dalam kain untuk membentuk jalur transmisi. Integrasi dinyatakan berhasil bila dapat membuat jejak konduktif yang rapi dan melindungi jejak tersebut dari perubahan dimensi atau gesekan yang berulang-ulang dengan tujuan untuk menjaga konduktivitas jangka panjang. Cara termudah untuk menyematkan benang konduktif ke dalam kain adalah dengan menenun benang tersebut sebagai salah satu benang lusi atau benang pakan, menggabungkannya dengan simpul-simpul, merajut sehingga menghasilkan struktur yang lentur. Teknik lain yang dapat digunakan adalah menjahit, *couching*, menyulam, dan mengecap.²⁸

Hal serupa dipaparkan oleh Agcayazi, et al. (2018) dan Choudhury dan Vaidyanathan (2020), benang konduktif dapat dimasukkan pada saat kain diproduksi seperti menenun, mengepang atau merajut, atau setelah kain dihasilkan seperti menyulam atau menjahit manual benang konduktif.^{29,30}

TEKNIK DOUBLE WEAVING & DOUBLE-CLOTH

Menenun adalah salah satu teknik kerajinan kuno di bidang seni dan desain dengan penemuan alat tenun mekanis setelah revolusi industri dan hingga sekarang merupakan metode paling umum dalam proses pembuatan kain. Walaupun kain tenun sudah banyak dimekanisasi dari segi proses dan peralatan, karakteristik dari nilai kerajinannya tetap dipertahankan. Menurut Halaceli (2012), posisi menenun berada di antara seni, kerajinan, dan teknologi. Pada abad ke-21 integrasi antara teknik kerajinan dengan teknologi dan seni menjadi penting karena memberikan nilai individualitas dari desainer tekstil tersebut pada kain mereka.^{30,31} Dalam menenun diperlukan dua set benang yang saling bersilangan dari arah vertikal dan horizontal yang tegangannya ditahan oleh alat tenun. Hal tersebut memungkinkan terdapatnya tegangan yang dapat dikontrol serta bahan yang tidak meregang sehingga konstruksi dan desain yang stabil bisa dihasilkan menyebabkan komponen elektronik dan bahan yang tipis dapat dengan mudah digabungkan. Teknik tenun dapat menghasilkan lapisan bertumpuk yang ideal untuk sirkuit yang kompleks. Dalam mengintegrasikan *smart textiles* secara terstruktur, teknik menenun digunakan untuk membuat sirkuit listrik yang terintegrasi, *touch surfaces*, *shape-changing interfaces*, *color-changing*, *harvest energy*, dan tampilan serat optik.^{32, 33}

Double cloth (kain rangkap) adalah kain yang terdiri dari dua lapis benang yang ditunen satu di atas yang lainnya dan dijahit menjadi satu. *Double cloth* memiliki paling sedikit dua kelompok benang lusi dan dua kelompok benang pakan, yaitu bagian permukaan atau atas dan bawah. *Double cloth* populer disebut sebagai kain dua lapis (*two ply fabrics*). Bagian atas dihasilkan dengan menjalin benang lusi dan benang pakan bagian permukaan dan bagian bawah dihasilkan dengan menjalin benang lusi dan benang pakan bagian bawah.^{34,35}

Fungsi dari pembuatan *double cloth* adalah; (1) untuk meningkatkan nilai ketahanan termal pada kain; (2) untuk meningkatkan permeabilitas udara pada kain; (3) untuk meningkatkan penampilan dan sensasi sentuhan pada kain. Adapun tipe dari *double-cloth* ada lima yaitu; (1) *self-stitched double cloth* (kain rangkap yang dijahit sendiri); (2) *center stitched double-cloth* (kain rangkap yang dijahit pada bagian tengah); (3) *double cloth stitched by*

thread interchange (kain rangkap yang dijahit dengan pertukaran benang); (4) *double cloth stitched by cloth interchange* (kain rangkap yang dijahit dengan pertukaran kain); (5) *alternate single ply and double ply construction* (konstruksi alternatif lapis tunggal dan lapis ganda).^{34,35}

Devendorf & Di Lauro (2019) memaparkan, tenun memiliki keuntungan khusus untuk diaplikasikan pada *smart textiles*. Kain tenun cenderung kurang elastis sehingga dalam prosesnya, tenun dapat mengurangi tegangan dan mulur benang yang terintegrasi di dalam kain. Tenun juga memudahkan untuk mengintergrasikan benang yang memiliki mulur sedikit atau tidak sama sekali seperti benang *stainless steel* atau kabel yang tipis.³⁶ Sirkuit pada kain tenun dapat dihasilkan dengan mesin tenun seperti *dobby*, *jacquard*, dan *cam*, tetapi mesin *jacquard* lebih disukai karena dapat menghasilkan desain sirkuit yang lebih rumit dan memungkinkan untuk mengontrol benang lusi satu per satu. Sirkuit dalam kain tenun dapat dikembangkan dengan konfigurasi kain satu lapis atau berlapis-lapis.²⁴ Teknik tenunan rangkap (*double weaving*) adalah teknik menenun kain yang terdiri dari dua lapis atau lebih. Teknik tersebut bekerja dengan memisahkan benang lusi menjadi dua kelompok (bagian permukaan dan bagian bawah) kemudian menenun pengelompokan benang tersebut secara terpisah satu sama lain hingga menghasilkan dua lapisan kain yang saling bertumpuk. Konstruksi berlapis tersebut memungkinkan untuk merancang pola setiap lapisan secara terpisah dan menyisipkan benang konduktif ke lapisan permukaan atau lapisan bawah dalam konfigurasi yang berbeda.³⁶

METODE

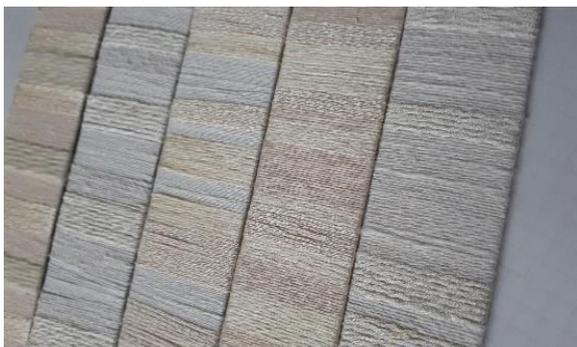
Penelitian dilakukan untuk mempelajari pengaplikasian teknik tenunan rangkap (*double weaving*) yang umumnya menghasilkan kain rangkap (*double cloth*), sebagai salah satu cara dalam mengaplikasikan benang konduktif pada produk tekstil. *Double weaving* berpotensi menjadi salah satu cara untuk mengintegrasikan perangkat elektronik ke dalam struktur tekstil karena potensi *double weaving* dapat menghasilkan dua lapis kain atau satu lapis kain yang memiliki ketebalan. Keunggulan tersebut membuat *double weaving* memiliki potensi untuk menghasilkan ‘kantong’ atau celah lubang atau ruang diantara dua lapis kain tersebut sehingga memungkinkan untuk memasukkan dan menyembunyikan perangkat elektronik ke dalam kain.

Teknik menenun *pick-up* dan *pick-down* (mengangkat atau menurunkan beberapa kelompok benang lusi pada kelompok benang lapisan atas atau lapisan bawah yang seharusnya tidak terangkat menjadi ikut terangkat atau seharusnya terangkat jadi tidak terangkat ketika hendak menghasilkan

shed pada saat menenun) digunakan dalam proses teknik *double weaving*. Dengan menggunakan teknik *pick-up* dan *pick-down* tidak hanya menghasilkan tekstur dan motif yang berbeda, tetapi juga lapisan atau celah yang dapat diatur bentuknya dengan menggunakan bantuan *pick-up stick*, sehingga dapat membantu dalam membentuk jalur untuk benang konduktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui struktur dan potensi motif yang dapat dihasilkan dengan teknik *double weaving*. Penelitian diawali dengan mempelajari bahan yang digunakan yang tidak mengganggu performa dari benang konduktif tersebut sebagai bahan untuk menghasilkan *e-textiles*.

Metode penelitian gabungan kualitatif dan eksploratif menjadi dasar pengerjaan penelitian. Penelitian terbagi menjadi dua tahap. Tahap pertama mencakup studi material, potensi material yang diperoleh, dan studi teknik *double weaving* untuk mengetahui teknik yang dapat diaplikasikan pada produk *e-textiles* dengan membuat prototip berukuran kecil. Tahap kedua yaitu melanjutkan pembuatan prototip dalam ukuran besar.

Tahap pertama diawali dengan membuat struktur kain tenun rangkap menggunakan teknik *double weaving* dengan mempertimbangkan material dan bentuk struktur yang dapat dilalui oleh benang konduktif. Kain prototip yang dihasilkan pada tahap pertama berukuran sekitar 8 cm x 8 cm dan 10 cm x 10 cm. Alat yang digunakan adalah Alat Tenun Bukan Mesin (ATBM) tipe *table loom* dengan 8 *harness*, 8 injakan, dan hanya satu *beam* lusi bagian belakang yang digunakan.



Gambar 1. Swatch susunan benang untuk komposisi tenun *double weaving*



Gambar 2. Prototip awal penelitian dengan teknik *double weaving* berukuran 8 cm x 8 cm



Gambar 3. Prototip awal berukuran 10 cm x 10 cm dengan benang konduktif yang berhasil dimasukkan dan berhasil menyalakan LED *sequins*

Percobaan tahap kedua dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh dari tahap pertama. Kain prototip yang dihasilkan pada tahap kedua berukuran 60 cm x 100 cm. Alat yang digunakan adalah Alat Tenun Bukan Mesin (ATBM) tipe *jack loom* dengan 16 *harness*, 18 injakan dan menggunakan satu *beam* lusi bagian belakang. Pada tahap kedua dilakukan variasi pembentukan motif pada kain dan akan dianalisis pengaruh jalur dan performa kerja dari benang konduktif tersebut.

Bahan

Pembuatan kain tenun *double weaving* menggunakan benang-benang berbahan dasar serat alam seperti katun, nanas, dan sutra. Benang-benang tersebut berasal dari serat yang sudah diolah dan masing-masing memiliki karakter yang berbeda.



Gambar 4. Proses pembuatan prototip tahap dua, kain berukuran 60 cm x 100 cm dengan ATBM

Benang konduktor yang digunakan dibedakan menjadi dua tipe berdasarkan ketebalan yaitu benang konduktor tipis (2 *ply*) dan sedang (3 *ply*) dengan bahan dasar serat *stainless steel*

produksi Adafruit. Benang konduktif 2 *ply* memiliki karakteristik yang kuat dan halus, ideal untuk semua proyek *wearable/e-textiles*. Benang tersebut memiliki resistansi rendah, 16 ohm per kaki sehingga dapat digunakan untuk menyalakan LED dan komponen elektronik lainnya yang digunakan di bawah ~ 50 mA. Sedangkan untuk benang konduktif 3 *ply*, memiliki karakteristik lebih tebal dari benang kapas/benang poliester pada umumnya dan dapat dijahit menggunakan tangan atau mesin jahit. Benang 3 *ply* memiliki resistansi 10 ohm per kaki untuk komponen yang digunakan di bawah ~ 100 mA. Di samping itu, pada penelitian ini menggunakan *LED sequins* sebanyak 20-30 lampu untuk diaplikasikan pada prototip dan *LilyPad coin cell battery holder* sebagai panel elektrik.

Peralatan

Peralatan dalam menghasilkan *e-textiles* kain tenun *double weaving* menggunakan dua tipe Alat Tenun Bukan Mesin (ATBM). Pada tahap pertama digunakan ATBM tipe *table loom* dengan 8 *harness* dan 8 injakan dan pada tahap kedua digunakan ATBM tipe *jack loom* dengan 16 *harness* dan 18 injakan. Kedua ATBM tersebut menggunakan satu *beam* benang lusi pada bagian belakang. Sedangkan untuk memasang dan memasukkan benang konduktif, *LED sequins* serta panel elektrik menggunakan jarum jahit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keunggulan teknik tenunan rangkap (*double weaving*) dapat dilihat dari dihasilkannya ketebalan dan lapisan pada kain. Teknik tersebut menghasilkan tidak hanya satu lapis kain, tetapi juga beberapa lapis kain sehingga bisa menghasilkan beberapa lembar kain atau menghasilkan satu lembar kain yang terdiri dari beberapa lapis yang menyatu dan menghasilkan ketebalan tertentu. Keunggulan tersebut menghasilkan 'kantong' atau celah lubang atau ruang dalam kain yang berpotensi digunakan sebagai jalur untuk memasukan benang konduktif.

Dalam penelitian, digunakan ATBM dengan satu buah *beam* benang lusi pada bagian belakang dengan pertimbangan digunakannya alat tenun yang tidak terlalu kompleks dalam mengoperasikan dan fokus pada rumus struktur yang digunakan. Pada perancangan protoip awal dimulai dengan membuat *double weaving* atau kain dengan lapisan ganda yang terdiri dari dua lapis kain yang memiliki permukaan kain yang berbeda. Pada prototip awal dipelajari konstruksi tenun yang dapat disisipkan benang konduktif di dalamnya seperti polos, *twill*, dan satin pada *weaving plan* dan mencoba menghasilkan bentuk yang sederhana yaitu kotak pada prototip tersebut. Keberagaman jenis benang juga dipertimbangkan untuk mengetahui tampilan struktur dan tekstur yang dihasilkan.



Gambar 5. Tampak lapisan dari kain rangkap yang dihasilkan dengan teknik *double weaving* yang dapat menjadi celah untuk benang konduktif



Gambar 6. Cara memasukkan benang konduktif ke dalam kain tenun *double weaving* dengan menggunakan jarum jahit



Gambar 7. Silangan atau ikatan yang terjadi antara lapisan kain bagian atas dan lapisan kain bagian bawah akibat dari teknik *pick-up*

Prototip yang dihasilkan sangat bergantung pada bahan yang digunakan dan konstruksi tenun yang digunakan pada teknik *double weaving*.

Seluruh benang yang digunakan dapat dipakai selama memiliki ketebalan, diameter benang dan komposisi ukuran yang sesuai, berdasarkan dari komposisi benang dari *swatch* yang dibuat yang diperlihatkan pada gambar 1. *Swatch* dibuat dengan tujuan untuk memperhitungkan komposisi benang yang digunakan baik dari segi ukuran dan estetika tampilan yang kemungkinan dapat dihasilkan saat prototip dibuat. Berdasarkan *swatch* yang dibuat secara garis besar benang dapat digunakan, tetapi bergantung dengan rumus tenun yang digunakan pada teknik *double weaving* tersebut.

Seperti yang dapat dilihat dari tabel 1, terdapat sembilan prototip yang dihasilkan dengan menggunakan teknik *double weaving*. Kesembilan prototip tersebut dapat disisipkan benang konduktif di dalamnya dan dapat menghasilkan jalur untuk benang konduktif tersebut. Teknik *pick-up* yang digunakan untuk mengangkat beberapa kelompok benang lusi pada lapisan kain bagian bawah menghasilkan ruang atau lubang karena benang lusi tersebut ikut terangkat ketika sedang mengangkat benang lusi pada lapisan kain bagian atas. Hal tersebut dapat dilihat dari dihasilkannya motif atau tekstur dengan struktur kain yang seharusnya muncul pada lapisan kain bagian bawah di lapisan kain bagian atas dan mengunci atau mengikat beberapa area tenun pada kain bagian atas dan kain bagian bawah menjadi saling bersilangan atau mengikat seperti yang diperlihatkan pada gambar 2 dan 7.

Namun, masih terdapat beberapa kekurangan seperti pada prototip nomor 5, 7, dan 8. Pada prototip nomor 5 benang konduktif sulit dimasukkan atau disisipkan akibat dari konstruksi tenun yang digunakan pada prototip tersebut. Enam belas langkah awal yang menjadi pola kunci utama struktur tenun dengan diselingi teknik tenun biasa (tidak ada *pick-up*) diantara struktur kain bagian atas dan bagian bawah (area *weave plan* yang hanya diberi tanda X hitam) membuat kain menjadi padat

dan berantakan terutama dibagian antara lapisan atas kain dengan lapisan bawah kain karena ada bagian kain yang tidak tertunen. Motif atau tekstur yang dibuat dengan teknik *pick-up* tidak berhasil dan sulit untuk memasukkan benang konduktif. Sedangkan pada prototip nomor 7 dan 8 benang dapat dimasukkan, tetapi benang tersebut tetap terlihat dikarenakan ada bagian tenun yang tidak rapat akibat variasi dari struktur yang digunakan selama menenun.

Kondisi prototip yang struktur rapat dan tidak antara benang lusi dan benang pakan diakibatkan oleh adanya variasi struktur tenun yang digunakan serta tegangan benang lusi yang menjadi tidak stabil untuk kedua lapisan kain ganda tersebut akibat *beam* benang lusi bagian belakang yang digunakan hanya satu. Kondisi tersebut berakibat adanya tegangan benang lusi dengan pakan yang saling menjalin atau mengeriting (*crimp*) menjadi berbeda pada masing-masing lapisan. Namun, dari segi fungsi *e-textiles*, benang konduktif berhasil disisipkan ke dalam prototip kain *double weaving* dengan cara mengaitkan benang tersebut ke jarum dan menyisipkannya seperti pada gambar 6 kecuali pada prototip nomor 5.

Dari kesembilan prototip tersebut dapat dilihat kalau konstruksi tenun polos dan *twill* lebih mudah dalam menenun dengan teknik *double weaving* dan menghasilkan struktur yang kuat dan sesuai untuk dikombinasikan. Kedua konstruksi tersebut sesuai untuk disisipkan benang konduktif. Sedangkan konstruksi tenun satin memiliki struktur yang lemah dan tidak cocok untuk disisipkan benang konduktif. Apabila konstruksi tersebut dikombinasikan dengan konstruksi tenun lain akan membuat tampilan kain tidak rapi seperti pada prototip nomor 1, 7, dan 8. Walaupun benang konduktif berhasil disisipkan atau dimasukkan, dari segi tampilan benang konduktif tersebut tetap terlihat dan menyebabkan tampilan kain menjadi tidak rapi dan tidak kuat.

Tabel 1. Komposisi bahan, teknik, dan hasil pemasangan benang konduktif pada prototip untuk tahap pertama penelitian

Prototip ke-	Bahan	Pola Tenun	Kondisi Benang Konduktif	Weave Plan
1	Katun 40/3	Front: satin $\frac{1}{4}(m \rightarrow 2)$ Back: <i>twill</i> $\frac{2}{1}/1$	Dapat dimasukkan dengan rapi dan tertutup	<p>The diagram shows the weave plan for Prototip 1. It includes a 'FRONT (F)' view with 5 rows and 5 columns, and a 'BACK (B)' view with 3 rows and 3 columns. A larger 'DOUBLE WEAVING' diagram shows 8 rows and 8 columns. Conductive threads are indicated by 'X' marks in the weave plan. The diagram also includes 'Pick ups: 3, 6, 8' and 'Pick downs: 1, 2, 4, 5, 7'.</p>

Prototip ke-	Bahan	Pola Tenun	Kondisi Benang Konduktif	Weave Plan
2	Katun 40/3	Front: polos Back: $twill \frac{2}{2}/1$	Dapat dimasukkan dengan rapi dan tertutup	<p>DOUBLE WEAVING</p> <p>Pick up: 3, 4, 7, 8 Pick down: 1, 2, 5, 6</p>
3	Lusi: katun 40/3 Pakan: <i>silk</i> Front: <i>silk</i> Back: <i>silk slub</i>	Front: polos Back: $twill \frac{2}{2}/1$	Dapat dimasukkan dengan rapi dan tertutup	<p>DOUBLE WEAVING</p> <p>Pick up: 3, 4, 7, 8 Pick down: 1, 2, 5, 6</p>
4	Lusi: katun 40/3 Pakan: front: <i>pineapple yarn</i> Back: katun 40/3	Front: $twill \frac{2}{2}/1$ Back: polos	Dapat dimasukkan dengan rapi dan tertutup	<p>DOUBLE WEAVING</p> <p>Pick up: 3, 4, 7, 8 Pick down: 1, 2, 5, 6</p>
5	Katun 40/3	Front: $twill \frac{2}{2}/1$ Back: $twill \frac{1}{4}/1$	Sulit untuk memasukkan	<p>DOUBLE WEAVING</p> <p>Pick up: 2, 4, 6, 8 Pick down: 1, 3, 5, 7</p>
6	Katun 40/3	Front: $twill \frac{2}{2}/1$ Back: $twill \frac{2}{2}/1$	Dapat dimasukkan dengan rapi dan tertutup	<p>DOUBLE WEAVING</p> <p>Pick up: 3, 4, 7, 8 Pick down: 1, 2, 5, 6</p>
7	Katun 40/3	Front: <i>satın</i> $\frac{1}{4} (m \rightarrow 2)$ Back: $twill \frac{1}{2}/1$	Dapat dimasukkan dengan rapi namun, ada kemungkinan benang akan terlihat	<p>DOUBLE WEAVING</p> <p>Pick up: 2, 5, 8 Pick down: 1, 3, 4, 6, 7</p>

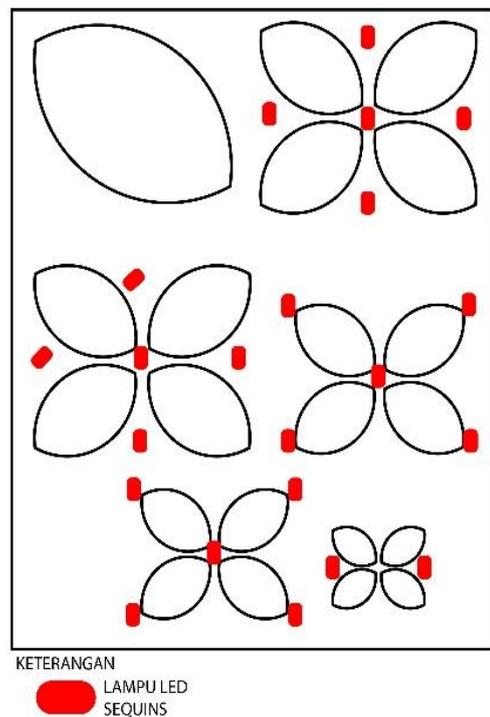
Prototip ke-	Bahan	Pola Tenun	Kondisi Benang Konduktif	Weave Plan
8	Katun 40/3	<i>Irregular satin</i> $\frac{1}{5}$ dan polos	Dapat dimasukkan namun, benang tetap akan terlihat	
9	Lusi: katun 40/3 Pakan: <i>Middle: silk</i> <i>Back: silk slub</i> <i>Front: pineapple yarn</i>	<i>Treble-cloth</i> <i>Middle: polos</i> <i>Back: twill</i> $\frac{1}{2}/1$ <i>Front: twill</i> $\frac{1}{2}\backslash 1$	Dapat dimasukkan dengan rapi dan tertutup	

Berdasarkan hasil penelitian tahap pertama yang diperlihatkan pada tabel 1, khususnya dari prototip nomor 1 hingga 8 yang menghasilkan variasi kerapatan dan kemungkinan variasi bentuk serta tekstur yang dihasilkan maka untuk selanjutnya dicoba dihasilkannya prototip nomor 9 yang menggunakan struktur *treble-cloth* (tiga lapis kain) untuk menghasilkan kain tertutup rapat dan rapi, sehingga benang konduktif yang akan dimasukkan dapat tertutup oleh kain dan komponen elektronik lainnya seperti panel elektrik juga dapat tertutup oleh kain. Prototip nomor 1 hingga 8 dapat diaplikasikan untuk produk *e-textiles*, tetapi struktur *treble-cloth* dicoba untuk menghasilkan tidak hanya kain yang rapat dan rapi serta bervariasi motif kain yang bisa dihasilkan, tetapi juga untuk memperlihatkan potensi dapat dimasukkannya lebih banyak perangkat elektronik atau yang strukturnya rumit.

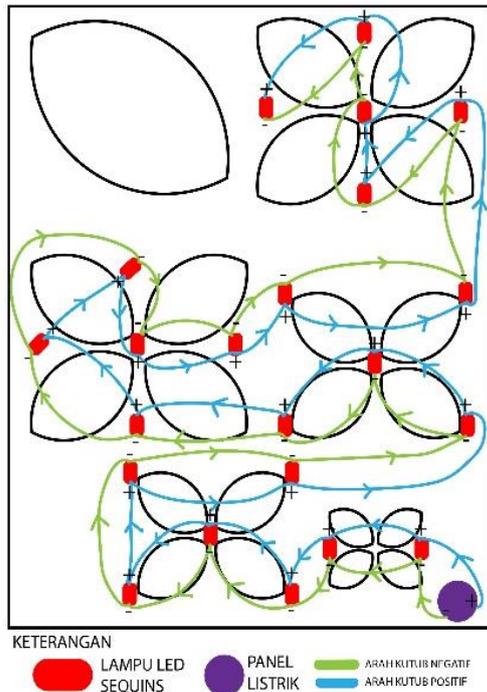
Dengan struktur tiga lapis kain, diperkirakan dapat membuat sirkuit elektronik yang lebih rapi dan terstruktur di dalam kain. Struktur tiga lapis kain menghasilkan tidak hanya ruang untuk benang konduktif, tetapi juga memungkinkan motif yang lebih variatif dalam bentuk geometris dan tidak kaku. Walaupun dengan dua lapis kain dapat menghasilkan motif serta ruang untuk benang konduktif, tetapi struktur tiga lapis kain dapat lebih rapi karena menerapkan teknik *pick-up* dan *pick-down* yang menahan kelompok benang lusi dari lapisan atas dibawah sehingga benang lusi yang tidak digunakan tidak muncul di sisi lapisan kain yang tidak diperlukan.

Hasil prototip nomor 9 kemudian digunakan dalam memproduksi prototip dalam ukuran besar pada penelitian tahap kedua. Struktur *treble-cloth* dapat dihasilkan dengan menggunakan teknik *double weaving* sebagai dasar serta teknik *pick-up*

dan *pick-down*, sehingga tipe alat tenun yang digunakan tidak berubah yaitu ATBM, tetapi jumlah *harness* dan injakan yang perlu disesuaikan. Bentuk geometris dan teratur seperti kawung menjadi inspirasi utama dalam menghasilkan prototip pada tahap kedua. Bentuk kawung digunakan tidak hanya sebagai elemen estetika, tetapi juga untuk mengetahui potensi benang konduktif, perkiraan jalur yang dihasilkan dan performa ketika LED *sequins* dinyalakan.



Gambar 8. Sketsa rancangan kain prototip tahap kedua



Gambar 9. Sketsa tampak alur dari benang konduktif yang dipasang di dalam kain

Prototip tahap kedua dicoba untuk menghasilkan kain yang tidak memperlihatkan jalur benang konduktif secara jelas. Benang dimasukkan dan disusun secara seri dengan dua puluh dua buah *LED sequins* yang dipasang dengan teknik jahit pada beberapa bagian kain ukuran 60 cm x 100 cm seperti yang diperlihatkan pada gambar 8. Hal yang perlu diperhatikan pada saat pemasangan *LED sequins* adalah merencanakan dan merancang jalur benang konduktif supaya tidak terjadi arus pendek akibat dua helai atau lebih yang memiliki kutub yang sama atau kutub yang berbeda bertemu. Setiap benang konduktif yang dimasukkan untuk menghubungkan *LED sequins* selalu mengarah kepada kutub yang sama di *LED sequins* dan panel listrik tersebut (kutub positif ke kutub positif dan kutub negatif ke kutub negatif), sehingga posisi dari *LED sequins* perlu direncanakan khususnya dari sisi masing-masing kutub.

Rencana dan rancangan perkiraan jalur benang konduktif diperlihatkan pada gambar 9. Teknik *pick-up* dan *pick-down* serta jangkauan area yang dibuat dari bentuk kawung yang ukurannya bervariasi membantu dalam membentuk jalur untuk benang konduktif karena terbentuk area atau batasan sehingga membantu dalam memperkirakan jalur dan jarak supaya benang konduktif tidak saling bertemu dan mengakibatkan terjadinya arus pendek. Bentuk kawung tersebut dihasilkan dari penggunaan struktur tiga lapis kain pada lapisan kain bagian atas dan bawah muncul bentuk kawung tersebut, tetapi berbeda jenis benang pakan.



Gambar 10. Kain tenun hasil prototip tahap kedua



Gambar 11. Susunan lampu LED yang menyala pada kain prototip tahap kedua

Benang konduktif berhasil disisipkan atau dimasukkan dengan teknik jahit ke dalam kain. Selain itu, lampu *LED sequins* dan panel elektrik dijahit pada kain tersebut. *LED sequins* dijahit pada permukaan tampak atas dari lapisan kain bagian atas, sedangkan panel listrik dijahitkan pada lapisan kain bagian tengah. Dengan lubang atau 'kantong' yang dihasilkan oleh teknik *double weaving* memudahkan pemasangan peralatan elektronik dan membuat susunan lampu secara seri. Lubang atau 'kantong' tersebut mencegah terjadinya arus pendek akibat benang konduktif yang saling bertautan atau bergesekan. Kendala yang terjadi pada penelitian ini diantaranya jarak dari masing-masing *LED sequins* dan benang konduktif yang menghubungkannya terlalu Panjang. Di samping itu lubang atau 'kantong' yang areanya sangat luas, tidak berbentuk jalur yang tegas dan kokoh, sehingga menyebabkan benang konduktif mudah bergesekan dan bergoyang apabila kain dilipat atau dikibaskan. Namun secara garis besar lampu *LED sequins* dan benang konduktif berhasil terpasang di kain dan lampu *LED sequins* dapat menyala.

KESIMPULAN

Penggunaan teknik *double weaving* untuk menghasilkan *e-textiles* memperlihatkan hasil yang rapi. *Double weaving* dapat menjadi salah satu cara mengaplikasikan benang konduktif dalam *e-textiles*. *Double weaving* juga berpotensi menghasilkan sirkuit listrik pada tekstil dikarenakan keunggulan dari teknik tersebut. Potensi struktur yang beragam serta teknik *pick-up* dan penggunaan *pick-up stick* yang menghasilkan ‘kantong’ pada kedua lapis kain ketika ditenun, dapat membantu menghasilkan alur untuk benang konduktif. ‘Kantong’ tersebut dapat memperkecil risiko terjadinya arus pendek akibat gesekan dan lipatan, serta mempertahankan posisi benang konduktif tersebut. Kelebihan lainnya, mencegah benang berinteraksi langsung dengan kulit dari pemakai kain tersebut.

Teknik *double weaving* untuk produk *e-textiles* perlu dipelajari lebih lanjut. Pembuatan jalur yang lebih terstruktur, terbaca, dan mudah dilalui oleh benang konduktif, pemilihan material yang mencakup pada jenis benang, ukuran, dan tekstur benang, serta permainan motif yang dapat dihasilkan dengan teknik tersebut merupakan peluang besar untuk *double weaving* diintegrasikan dengan *e-textiles*. Teknik tersebut menghasilkan kain *e-textiles* yang fungsional dan menarik dari segi estetika.

PUSTAKA

1. Kuusk, K. *Crafting Sustainable Smart Textile Services*. PhD. Thesis. Eindhoven University of Technology (2016).
2. Yilmaz, N.D. Introduction to Smart Nanotextiles. In: Yilmaz, N.D. ed. *Smart Textiles*. Beverly: Scrivener Publishing, 3-37 (2018).
3. Ossevoort, S.H.W. Improving the Sustainability of Smart Textiles. In: Kirstein, T. (ed). *Multidisciplinary Know – How for Smart Textiles Developer*. Cambridge: Woodhead Publishing, 399-419 (2013).
4. Ferraro, V. Smart Textiles and Wearable Technologies for Sport Design Approach. *Proceedings of 2nd International Electronic Conference on Sensors and Applications*, 1-6 (2015).
5. Das, S.C., et al. Smart Textiles – New Possibilities in Textile Engineering. *Proceedings of International Conference on Mechanical, Industrial, and Materials Engineering 2013 (ICMIME2013)*, 1-6 (2013).
6. Ruckdashel, R.R., Dhanya V., J.H. Park. Smart textiles: A toolkit to fashion the future. *Journal of Applied Physics* **129** (130903), 130903-1 – 130903-17 (2021).
7. Seymour, S. *Functional Aesthetic | Vision in Fashionable Technology*. New York: Springer (2010).
8. Kuusk, K., Wensveen, S., & Tomico, O. Craft Qualities Translated from Traditional Crafts to Smart Textiles Services. *Studies in Material Thinking*. **14**, 03-21 (2016).
9. Kane, F., Nimkulrat, N., & Walton, K.. 2016. Introduction. In: Nimkulrat, N., Kane, F., Walton, K. (eds). *Crafting Textiles in the Digital Age*. London: Bloomsbury, 1-13 (2016).
10. Valentine, L., et al. Design Thinking for Textiles: let’s make it meaningful. *The Design Journal* **20** (1), 964-976 (2017).
11. Köhler, A.R. Challenges for eco-design of emerging technologies: The case of electronic textiles. *Materials and Design* **51**, 51-60 (2013).
12. Gonçalves, C., et al. Wearable E-Textile Technologies: A Review on Sensors, Actuators and Control Elements. *Inventions* **3** (14), 1-13 (2018).
13. Stegmaier, T. Recent Advances in Textile Manufacturing Technology. In: Shisoo, R. ed. *The Global Textile and Clothing Industry*. Cambridge: Woodhead Publishing, 113-130 (2012).
14. Ismar, E., et al. Futuristic Clothes: Electronic Textiles and Wearable Technologies. *Global Challenges* **4** (7), 1-14 (2020).
15. Hughes-Riley, T., Tilak D., and Colin C. A Historical Review of the Development of Electronic Textiles. *Fibers* **6** (34), 1-15 (2018).
16. Viswanathan, S. E-Textile and its Applications. *International Journal of Engineering Science and Computing (IJSC)* **9** (03), 20174-20176.
17. Posch, Irene. E-Textile Tooling: New Tools-New Culture?. *Journal of Innovation and Entrepreneurship* **6** (10), 1-6 (2017).
18. Andersen, K., et al. Digital Craftmanship in the Wearable Senses Lab. *ISWC’19: Proceedings of the 23rd International Symposium on Wearable Computers*, 257-260 (2019).
19. Syudzzaman, Md, et al. Smart Textiles and Nanotechnology: A General Overview. *Journal of Textile Science & Engineering* **5** (1), 1-7 (2015).

20. Stewart, R., Sophie, S., Astrid B. Making Grooves With Needles: Using e-textiles to encourage gender diversity in embedded audio system design. *Proceedings of Designing Interactive Systems Conference*, 163-172 (2018).
 21. Strand, K.S., Peter H., Laila B.F. E-Textiles: An interdisciplinary approach: Problem Solving in an Educational Context. *Form Akademisk* **13** (6), 1-14 (2020).
 22. Nevay, S., et al. Crafting Textile Connections: A mixed-methods approach to explore traditional and e-textile for wellbeing. *The Design Journal* **22** (1), 487-501 (2019).
 23. Li, Qiao, et al. Fabric Circuit Board Connecting to Flexible Sensors or Rigid Components for Wearable Applications. *Sensors* **19** (3745), 1-15 (2019).
 24. Dhawan, A., et al. Woven Fabric-Based Electrical Circuits – Part I: Evaluating Interconnect Methods. *Textile Research Journal* **74** (10), 913-919 (2004).
 25. Varnaitė, Sandra. The Use of Conductive Yarns in Woven Fabric for Protection Against Electrostatic Field. *Materials Science (Medžiagotyra)* **16** (2), 133-137 (2010).
 26. Stavrakis, A.K., Mitar S., Goran M.S. Electrical Characterization of Conductive Threads for Textile Electronics. *Electronics* **10** (967), 1-13 (2021).
 27. Ismar, E., et al. Towards Embroidered Circuit Board from Conductive Yarns for E-Textiles. *IEEE Access* **8**, 155329-155336 (2020).
 28. El-Newashy, R.F., Saad, M.A., and Turky, G.M. Integration of Conductive Yarns into Fabric by Stitching. *Journal of American Science* **8** (3), 213-217 (2012).
 29. Choudhury, M.A. & Vaidyanathan, A.M. E-Textile: Review on Smart Wearable Fabric. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* **07** (06), 3267-3272 (2020).
 30. Agcayazi, T., et al. Flexible Interconnects for Electronic Textiles. *Advanced Materials Technologies* **3** (10), 1-32 (2018).
 31. Halaceli, H. Relief effects of woven elastic fabrics in view of crafted surfaces. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* **51**, 348-352 (2012).
 32. Sun, R., et al. Weaving a Second Skin: Exploring Opportunities for Crafting On-Skin Interfaces Through Weaving. *Proceedings of DIS'20: Designing Interactive Systems Conference 2020*, 365-377 (2020).
 33. Friske, M., Shanel W., Laura D. AdaCAD: Crafting Software for Smart Textiles Design. *Proceedings of CHI'19: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-13 (2019).
 34. Islam, S., et al. The Construction Principle of Double Cloth. *Trends in Textile Engineering & Fashion Technology* **1**(2), 1-10 (2018).
 35. Akter, S., & Chowdhury, S. The Construction Principle of Double Cloth and Its Properties. *Trends in Textile Engineering & Fashion Technology* **4**(4), 545-554 (2018).
 36. Devendorf, L. & Di Lauro, C. Adapting Double Weaving Technique and Yarn Plying Technique for Smart Textiles Applications. *In Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '19)*, 77–85 (2019).
-

