

Pengembangan Alat Rehabilitasi *Smart Skeleton* dengan Metode *Neurodevelopmental Therapy* dan Teknologi *Exoskeleton* bagi Penderita *Cerebral Palsy*

Develop Smart Skeleton as Rehabilitation Device Using Neurodevelopmental Therapy Methods and Exoskeleton Technology for Cerebral Palsy

Anjaswari Resti Arimbi^{1*}, Nurul Fitrah Mujahidah¹, Dim Nastiar Taufik², Bryan Mu'ad Mohammed², Muthmainnah¹, Irianto¹

¹Program Studi S1 Fisioterapi, Fakultas Keperawatan, Universitas Hasanuddin, Indonesia

²Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Indonesia

Email : arimbiar20r@student.unhas.ac.id

Abstrak – *Cerebral palsy (CP)* merupakan kondisi kelumpuhan otak kompleks yang menyebabkan gangguan motorik pada anak. Menurut data dalam *World Cerebral Palsy Day Guide*, terdapat lebih dari 17 juta orang di dunia menderita *CP*. Angka kejadian *CP* di dunia berkisar pada 2 per 1.000 kelahiran hidup sedangkan di Indonesia angka kejadian *CP* berkisar 3 – 4 dari 1.000 kelahiran hidup. Metode dasar dalam rehabilitasi penderita *CP* yaitu *Neurodevelopmental Therapy (NDT)* yang terdiri dari tiga prinsip, yaitu inhibisi, fasilitasi, dan stimulasi. Tujuan penelitian ini untuk membuat rancang bangun alat yang mampu menerapkan tiga prinsip *NDT* ke dalam teknologi *exoskeleton* sebagai alat rehabilitasi pasien *CP*. Penelitian ini menggunakan metode *research and development (R&D)* yang dibagi menjadi tiga tahap, yakni: 1) studi literatur; 2) implementasi alat; dan 3) pengujian alat. Pengujian dengan mengukur *Range of Motion (ROM) servo motor* menggunakan goniometer dan besar intensitas dan frekuensi *electrical stimulation* menggunakan multimeter digital. Hasil dari penelitian ini yaitu *smart skeleton* mampu menerapkan tiga prinsip *NDT*. Pembuatan *smart skeleton* didesain dengan menggunakan *brace, servo motor, dan electrical stimulation* sebagai komponen utama. *Range of Motion* yang dihasilkan mampu mengikuti *ROM* normal dan mampu menghantarkan arus 0 – 101,6mA serta frekuensi 0 – 91,7Hz. Kesimpulan penelitian ini yaitu *smart skeleton* berhasil mengembangkan inovasi alat rehabilitasi bagi penderita *cerebral palsy* menggunakan metode *neurodevelopmental therapy* dan *servo motor* berbasis *arduino mega* serta penambahan *electrical stimulation*.

Kata kunci: *cerebral palsy; neurodevelopmental therapy; alat rehabilitasi; exoskeleton*

Abstract - *Cerebral palsy (CP)* is a brain complex disorders that causes motoric disorders in children. Based on World Health Organization, more of 17 million people in the world diagnosed with *CP*. The prevalence rate of *CP* in the world reached 2 of 1.000 live birth. While the prevalence rate of *CP* in Indonesia reached 3 – 4 of 1.000 live birth. The rehabilitation principle of *CP* there is a basic method named *Neurodevelopmental Therapy (NDT)*, which consists of three main principles. The aim of this research is to create a rehabilitation device that able to apply *NDT* method to *exoskeleton* technology for *CP* patient. The method of this research is *research and development (R&D)* method. Which is divided into three stages, i.e. 1) literature study; 2) implementation; 3) testing. The test was carried out by measuring the *Range of Motion (ROM)* created by the *servo motor* and the current and frequency produced by the *electrical stimulant*. The results of this research are *smart skeleton* is able to apply three *NDT* principles. The *smart skeleton* manufacturing method is designed using *braces, servo motors and electrical stimulants* as the main components. The resulting *Range of Motion* is able to follow normal *ROM* and is capable of delivering a current of 0 – 101,6mA and a frequency of 0 – 91,7Hz. The conclusion of this research is *smart skeleton* has succeeded in developing innovative rehabilitation device for *CP* using *NDT* methods, *servo motor* based of *arduino mega*, and addition of an *electrical stimulation*.

Keywords: *cerebral palsy; neurodevelopmental therapy; rehabilitation device; exoskeleton*

I. PENDAHULUAN

Cerebral Palsy (CP) menjadi penyebab kecacatan dan gangguan motorik paling umum pada anak di dunia [1]. *Cerebral palsy* terjadi akibat lesi non-progresif pada otak yang sedang berkembang [2]. Kelompok otak ini menyebabkan berbagai kemungkinan gangguan pada tonus otot, Gerakan, dan keterampilan motorik dasar [3]. Selain gangguan motorik dasar ini berbagai kemungkinan komorbiditas dan gangguan partisipasi sosial dapat memperburuk kondisi penderita *CP* [4]. Menurut data dalam *World Cerebral Palsy Day Guide*, terdapat lebih dari 17 juta orang di dunia menderita *CP* [5]. Angka kejadian *CP* di dunia berkisar 2 dari 1000 kelahiran hidup sedangkan di Indonesia berkisar 3 – 4 dari 1000 kelahiran hidup [6].

Dalam menjalani aktivitasnya penderita *CP* membutuhkan orang lain atau alat bantu untuk menunjang kemampuan *activity daily living (ADL)* penderita [7]. Penderita *CP* memiliki keterbatasan melakukan aktivitas keseharian. Data menunjukkan bahwa terdapat 40,8% penderita *CP* memiliki keterbatasan kemampuan motorik dasar seperti kemampuan duduk, berdiri, berjalan, dan bermain [8]. Terdapat 7,8% penderita *CP* menggunakan perangkat genggam dalam menunjang aktivitasnya dan 33,3% tidak mampu berjalan [9].

Gangguan motorik yang dialami penderita *CP* berkaitan dengan *range of motion (ROM)* yang mempengaruhi dan dipengaruhi oleh struktur anatomis seperti sendi, tulang, otot, dan ligamen [10]. *Range of motion* ini kemudian mempengaruhi efektivitas gerak penderita yang disebabkan oleh berbagai kondisi seperti penurunan tonus otot, kontraktur otot, dan nyeri. Limitasi *ROM* pada ekstremitas atas mempengaruhi kemampuan fungsional seperti menggapai benda, pemeliharaan diri, makan, dan kemampuan motorik halus yang lebih kompleks. Selain pada ekstremitas bawah, limitasi *ROM* pada ekstremitas bawah mempengaruhi kemampuan fungsional seperti *toileting*, duduk, dan berjalan [11].

Dalam prinsip penanganan fisioterapi, metode intervensi yang paling umum dan dinilai efektif diberikan dalam penanganan penderita *CP* yaitu *neurodevelopmental therapy (NDT)*. *Neurodevelopmental therapy* bertujuan untuk meningkatkan kemampuan motorik penderita dengan memaksimalkan mungkin mengidentifikasi penurunan tonus otot, meningkatkan proprioseptif, memperbaiki postur, dan meningkatkan *ROM* penderita [12]. Metode *NDT* terdiri dari tiga prinsip yaitu inhibisi gerak dan postur abnormal penderita

dengan menggunakan *orthosis*, fasilitasi gerak dan fungsi gerak dasar dengan memberikan *active-assisted* atau *passive exercise*, serta stimulasi saraf sensorik dan motorik penderita dengan memberikan *approximation* di akhir gerak dan menggunakan mainan [13].

Neurodevelopmental therapy bertujuan untuk meningkatkan kemampuan motorik penderita dengan mengaktivasi *sensomotoric integration (SMI)*. Proses aktivasi *SMI* dapat dilakukan dengan memberikan *electrical stimulation*. Proses ini dapat terjadi karena saraf sensorik pada area yang distimulasi akan memberikan informasi pada medulla spinalis, kemudian stimulus akan diteruskan ke otak pada area 57 dan area 12 untuk diidentifikasi, kemudian impuls akan masuk ke area extrapiramidalis dan masuk pada *motor pathway* yang kemudian akan diteruskan ke otot (*sliding filament*), lalu terjadilah pergerakan motorik [14].

Penderita *CP* umumnya memakai alat bantu untuk menunjang terapi dan aktivitas kesehariannya. Alat bantu berupa *wearable robotics* seperti *orthosis*, prostetik, dan *exoskeleton* umumnya menjadi pilihan [15]. *Exoskeleton* menjadi *wearable robotics* dengan perkembangan paling masif pada aplikasi rehabilitasi karena memberikan berbagai kemungkinan baru pemulihan rehabilitasi fisik penderita seperti kemampuan perbaikan postur dan menunjang aktivitas fisik pada penderita *CP* dalam berdiri dan berjalan [16]. Teknologi *exoskeleton* dinilai mampu menyesuaikan kemampuan kinematik tubuh saat bergerak sehingga menghasilkan pergerakan motorik kompleks yang maksimal [17].

Pemberian intervensi penderita *CP* membutuhkan waktu dan intensitas yang lama untuk dapat menghasilkan peningkatan kemampuan motorik, kemandirian, dan peningkatan kualitas hidup penderita. Semakin konsisten intensitas dan waktu Latihan, maka akan semakin terlihat perkembangan motorik penderita [18].

Dengan demikian dibutuhkan sebuah pengembangan alat rehabilitasi berteknologi *exoskeleton* yang mampu menerapkan 3 prinsip *NDT* yang mudah dikontrol oleh keluarga sehingga bisa digunakan sesering mungkin oleh penderita. Dibutuhkan juga alat rehabilitasi yang dapat disesuaikan dengan usia kalender dan usia tumbuh kembang anak. Selain itu, diperlukan sebuah alat yang mampu menerapkan 3 prinsip *NDT* dengan menahan gerak dan postur abnormal penderita, mampu memfasilitasi *ROM* normal penderita, dan menstimulasi saraf sensorik dan motorik penderita.

Penggunaan alat bantu dalam intervensi fisioterapi pada penderita *CP* umumnya menggunakan *wearable robotics* seperti orthosis. Namun, orthosis hanya membantu menginhibisi gerak dan postur abnormal penderita. Seluruh pola gerak untuk melatih penderita *CP* diberikan secara manual oleh fisioterapis dan tentunya hal tersebut tidak bisa sembarangan dilakukan oleh penderita dan keluarga penderita di rumah [13]. Sementara itu, terdapat alat bantu berupa *walker frame* yang menerapkan prinsip fasilitasi dengan memberikan roda sehingga membantu penderita berjalan. Penggunaan *walker frame* memiliki resiko seperti memperbesar kemungkinan penderita terjatuh. Selain itu, pemberian inhibisi dan stimulasi masih dilakukan manual oleh fisioterapis [19]. Perkembangan *wearable robotics* berupa *exoskeleton* yang diberi nama *atlas pediatric exo* menerapkan dua prinsip *NDT* berupa inhibisi dan fasilitasi sedangkan prinsip stimulasi tidak diterapkan langsung pada alat [20]. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk membuat rancang bangun alat rehabilitasi yang dapat menerapkan 3 prinsip *neurodevelopmental therapy* dan teknologi *exoskeleton* bagi penderita *cerebral palsy*.

II. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode *research and development (R&D)* yang memiliki tujuan untuk menciptakan sebuah prototipe berupa alat rehabilitasi yang dapat menerapkan 3 prinsip *NDT* bagi penderita *CP* dengan teknologi *exoskeleton*. Model pengembangan yang digunakan pada penelitian ini yaitu model ADDIE yang disusun secara logis menggunakan pendekatan sistem. Model ADDIE terdiri dari 5 tahapan yaitu analisis, desain, pengembangan, implementasi, dan evaluasi.

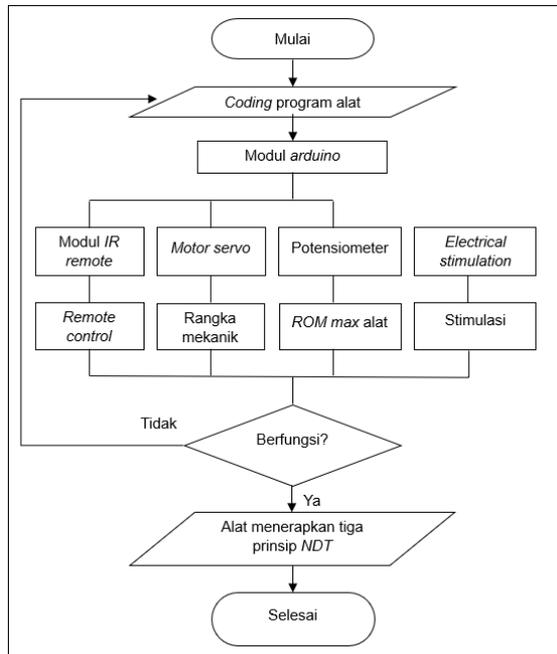
Alur penelitian ini terdiri dari 6 tahapan dimulai dari studi literatur, implementasi alat, pengujian alat, pengolahan dan analisis data, serta interpretasi dan penarikan kesimpulan. Pada tahap studi literatur dilakukan dengan mengkaji dan mengumpulkan literatur yang relevan mengenai *CP*, *NDT*, pengembangan teknologi *exoskeleton*, dan alat rehabilitasi bagi penderita *CP*. Selain itu, dilakukan studi lapangan dengan mengunjungi Yayasan Pembinaan Anak Cacat Kota Makassar. Hal tersebut dilakukan sebagai informasi perihal kondisi, tantangan, masalah, dan kendala yang dialami penderita, keluarga, dan fisioterapi penderita dengan melakukan observasi dan wawancara. Informasi yang diperoleh yaitu 70% dari penderita yang berkunjung menderita *CP*, penderita *CP* terlihat tidak nyaman yang

ditunjukkan melalui tangisan dan raungan ketika dilakukan terapi oleh fisioterapis, seluruh penderita menggunakan orthosis sebagai alat bantu dan fisioterapis melakukan manual terapi berupa fasilitasi dan stimulasi. Fisioterapis mengungkapkan bahwa penderita *CP* membutuhkan terapi pendukung yang dilakukan di rumah untuk menghindari risiko peningkatan spastisitas otot. Pemberian terapi pada seluruh penderita *CP* di Yayasan Pembinaan Anak Cacat Kota Makassar menggunakan metode intervensi dasar yaitu *NDT*. Selain itu, keluarga penderita juga mengeluhkan antrian dalam melakukan terapi dan keterbatasan jadwal terapi (antrian pasien). Keluarga mengharapkan adanya dukungan terapi yang bisa dilakukan di rumah untuk mempercepat kemungkinan pemulihan penderita. Hasil studi lapangan ini membantu perancangan desain yang sesuai dengan prinsip dasar terapi menggunakan metode *NDT* dengan memperhatikan prosedur dasar pembuatan teknologi *exoskeleton* yang dapat digunakan di rumah oleh penderita dan keluarga dengan tetap dalam pengawasan jarak jauh oleh fisioterapis.

Dalam implementasi alat terdapat 5 tahapan yaitu penyusunan desain teknis, persiapan alat dan bahan, pembuatan alat, uji sistem elektrikal dan mekanikal alat, dan finalisasi alat. Penyusunan desain teknis dilakukan dengan membuat sketsa rancangan awal desain alat dan rangkaian struktur alat dengan memperhatikan prinsip kerja dan penerapan metode *NDT*. Proses penyusunan desain teknis menggunakan *software fusion* dan *sketchup* agar menghasilkan gambar model alat dalam citra 3D. Selanjutnya, persiapan alat dan bahan berupa *arduino mega*, *servo motor*, *carbon fiber*, mesin *printer 3D*, kabel pita, kabel, sensor HCSR-04, *buzzer*, *microcontroller*, kit kabel dupond, *filament 3D*, modul L298N, *electrical stimulation*, akrilik, *LCD*, baterai litium polimer, *cable ties*, *stepper motor*, *remote control*, mr, baut, obeng, tang, dan timah solder. Proses pembuatan alat dilakukan dengan mencetak desain bagian rangka menggunakan printer 3D, kemudian merangkaikan serat karbon pada desain 3D yang telah dicetak, kemudian memasang seluruh sistem elektrikal alat (*arduino*, *servo motor*, sensor HCSR-04, dan *remote control*), kemudian menghubungkan baterai dan terakhir menguji seluruh komponen dengan baterai yang digunakan.

Pengujian sistem elektrikal dan mekanikal alat dilakukan untuk mengevaluasi *coding* yang terprogram pada seluruh sistem elektrikal dan kesesuaian komponen mekanikal alat. Uji sistem elektrikal dan mekanikal ini dilakukan dengan

menguji modul *IR remote*, *servo motor*, *potensiometer*, dan *electrical stimulation* yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



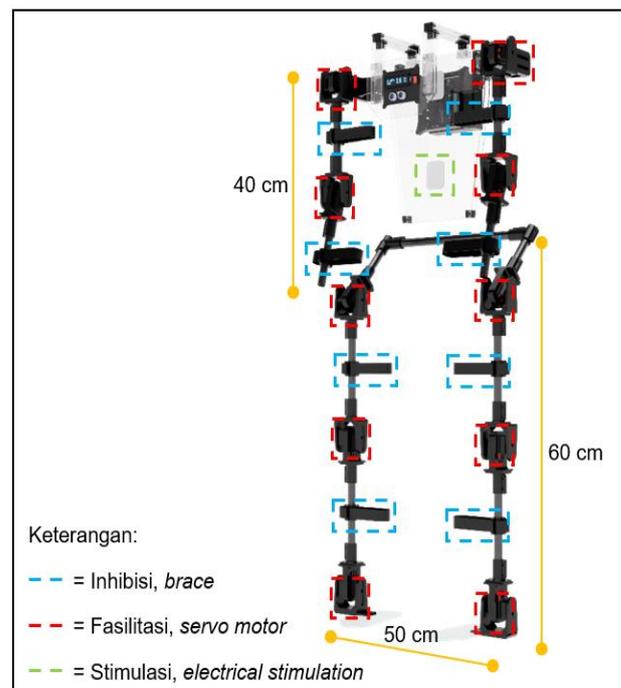
Gambar 9. Flowchart Uji Sistem Elektrikal dan Mekanikal

Proses pengujian alat, terbagi menjadi 2 yaitu pengujian besar sudut *ROM servo motor* dan pengujian besar intensitas dan frekuensi *electrical stimulation*. Pengujian besar sudut *ROM servo motor* dilakukan menggunakan goniometer dengan interpretasi apabila nilai *ROM servo motor* yang dihasilkan alat melebihi nilai normal derajat *ROM* gerak pada setiap regio maka prinsip fasilitasi alat dapat diterima. Sedangkan pengujian besar intensitas dan frekuensi *electrical stimulation* dilakukan dengan menggunakan goniometer. Interpretasi pengujian ini yaitu dilihat dari intensitas dan frekuensi alat yang di uji menggunakan multimeter digital. Apabila intensitas dan frekuensi *electrical stimulation* melebihi nilai dosis intervensi penderita *CP* sebesar 20 – 50mA dan 10 – 60Hz, maka prinsip stimulasi dapat diterima. Data hasil pengujian kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan dijelaskan secara deskriptif.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototipe ini diberi nama *smart skeleton*. Prototipe ini dibuat dengan memerhatikan berbagai aspek pembuatan *exoskeleton* dan penerapan metode *NDT* bagi penderita *CP*. Dalam membuat desain *exoskeleton* terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan meliputi biomekanik, mekanik alat, dan *power supply*. Biomekanik menjadi

penting dalam merancang sebuah alat rehabilitasi karena alat rehabilitasi harus mengikuti kaidah ergonomi dan anatomi tubuh manusia [21]. Mekanik alat akan menentukan berbagai aspek seperti kemampuan manuver dari aktuator, kekuatan struktural, keamanan, dan bobot alat [22]. *Power supply* yang digunakan dalam merancang alat rehabilitasi ditentukan berdasarkan banyak komponen elektrikal yang digunakan seperti aktuator. Selain itu, *power supply* yang digunakan tergantung dari kebutuhan portabel atau non-portabel, semakin besar daya yang dibutuhkan maka memerlukan sumber listrik dalam pengoperasiannya [23]. *Smart skeleton* memiliki dimensi lebar 50 cm, panjang lengan 40 cm, dan panjang tungkai 60 cm. Berat keseluruhan *smart skeleton* yaitu 3,5 kg. Desain *smart skeleton* dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 10. Desain Smart Skeleton

Smart skeleton menerapkan tiga prinsip *NDT* dengan prinsip inhibisi yang diwujudkan dengan menggunakan *carbon fiber* sebagai komponen kerangka utama. Prinsip inhibisi diberikan dengan memilih *carbon fiber* sebagai komponen rangka utama dalam *smart skeleton*. *Carbon fiber* dipilih karena dalam penelitian uji daya tarik yang dilakukan oleh Fajarudin dan Widodo (2021), *carbon fiber* mampu menahan hingga 620 N/mm² pada sudut tarikan 90°. Selain itu, dalam eksperimen yang dilakukan oleh Navaneethan dan Nandhini (2021) *carbon fiber* mampu menahan hingga 433 N/mm² pada sudut tarikan 90° dengan

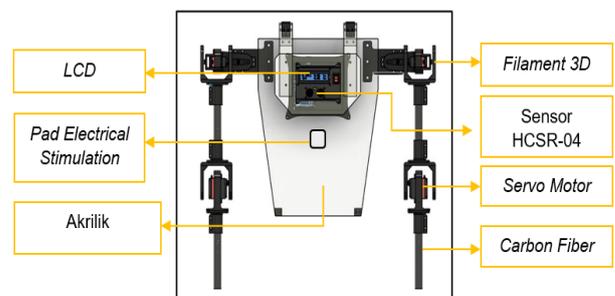
nilai *maximum breaking load* 7123N. *Carbon fiber* terdiri dari atom karbon yang disusun menyilang sehingga saling mengikat dan memperkuat ikatan karbon. Pada penelitian yang dilakukan oleh Lerner dkk (2019) *carbon fiber* digunakan menjadi komponen utama kerangka pembuatan *ankle orthosis* karena dinilai kuat untuk menahan deformitas *ankle* yang dialami penderita *CP*. Selain itu, *carbon fiber* ini kuat karena memiliki densitas rasio yang besar. Prinsip inhibisi juga diterapkan dengan pemasangan *brace* pada tungkai dan lengan penderita. *Brace* diletakkan pada tungkai dan lengan penderita dengan jumlah keseluruhan 8 *brace*.

Prinsip fasilitasi didukung dengan adanya 12 *servo motor* yang berada pada setiap sendi tubuh manusia. *Servo motor* ini diprogram dalam *arduino mega* dengan pola gerak yang sesuai dengan *ADL* penderita seperti berjalan dan makan. Gerakan yang terbentuk yaitu pada regio *shoulder* (fleksi, ekstensi, dan abduksi), *elbow* (fleksi dan ekstensi), *hip* (fleksi dan ekstensi), *knee* (fleksi dan ekstensi), dan *ankle* (dorso fleksi dan plantar fleksi). Prinsip fasilitasi pada *smart skeleton* menggunakan *servo motor*. *Servo motor* dapat memberikan besar sudut defleksi yang cukup dalam pemenuhan nilai normal *ROM*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Tualeka dkk (2022) *servo motor* digunakan pada alat terapi kaki pasca *stroke* karena memiliki nilai presisi yang cukup stabil digunakan pada alat rehabilitasi. Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa alat yang dibuat dapat meningkatkan kekuatan otot kaki dan stabilitas *knee joint* yang membantu penderita pasca *stroke* dalam rehabilitasi fisik. Selain itu, penelitian lain dilakukan oleh Amali dan Batan (2021) juga menggunakan *servo motor* dalam menghasilkan pergerakan *elbow* pronasi dan supinasi. *Servo motor* dipilih karena dianggap mampu menggerakkan plat-plat rancangan dan memiliki torsi yang dapat menahan berat lengan penderita.

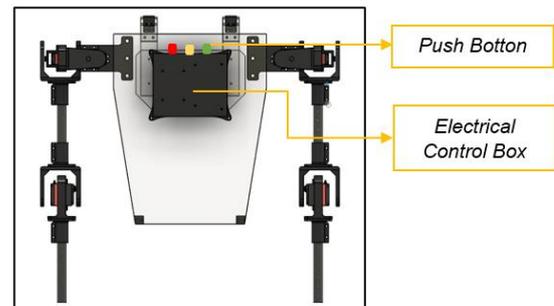
Prinsip stimulasi pada *smart skeleton* diberikan dengan memasang *electrical stimulation* yang bisa digunakan untuk menstimulasi akar saraf dan jaringan otot penderita dan juga untuk membantu mengaktifasi *SMI* penderita. *Electrical stimulation* dilengkapi kabel pad yang dapat diperpanjang hingga 1,5 m. Prinsip stimulasi pada *smart skeleton* diterapkan dengan memberikan fitur *electrical stimulation* yang berfungsi dalam mengaktifasi *SMI*, meningkatkan *ROM*, dan kemampuan motorik penderita *CP*. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Mooney dan Rose (2019) yang menunjukkan bahwa *neuromuscular electrical stimulation* meningkatkan pergerakan

ankle saat fase *swing* dan *initial contact* pada pola berjalan, meningkatkan kecepatan berjalan, dan meningkatkan partisipasi otot. Namun, *neuromuscular electrical stimulation* dinilai tidak cukup untuk mengatasi kelainan berjalan yang lebih kompleks pada penderita *CP* derajat berat sehingga memerlukan terapi yang lebih kompleks untuk mengontrol abnormalitas berjalan pada penderita *CP*. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Liu dan Li (2023) menunjukkan hasil yang sejalan. Terjadinya peningkatan yang signifikan pada skor *modified ashworth scale* dan *modified tardieu scale* pada gerakan di *hip*, *knee*, dan *ankle* penderita *spactic cerebral palsy* dengan *GMFCS* level 3 – 4 dengan efek samping minimal.

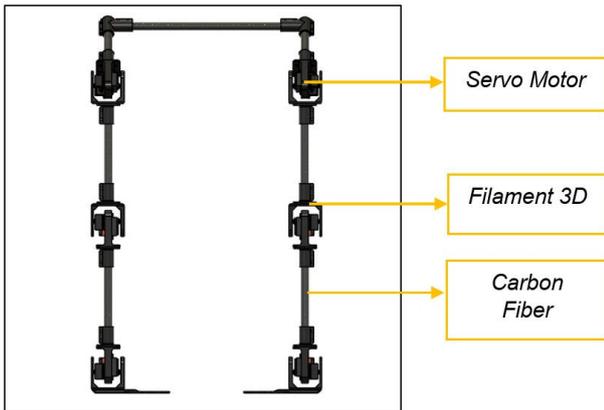
Selain itu, *Smart skeleton* dilengkapi sensor HCSR-04 yang diprogram agar dapat membaca objek 2cm – 40cm. Jarak tersebut menjadi jarak optimal dalam membaca objek dengan bentuk yang lebih kecil dan tidak rata sebagai upaya keamanan pada penderita. Baterai Li-Po yang digunakan pada *smart skeleton* bersifat portabel dan memiliki daya sebesar 2200mAh dengan lama pengisian ulang 1 jam untuk 3 jam pemakaian. Durasi penggunaan alat disesuaikan dengan kebutuhan dosis terapi penderita dalam satu hari. Pengguna dapat melakukan pengisian ulang baterai pada saat penderita melakukan *rest* atau waktu relaksasi dalam sesi harian terapi. Untuk gambaran Detail Desain *Smart Skeleton* dapat dilihat pada **Gambar 3- Gambar 9**.



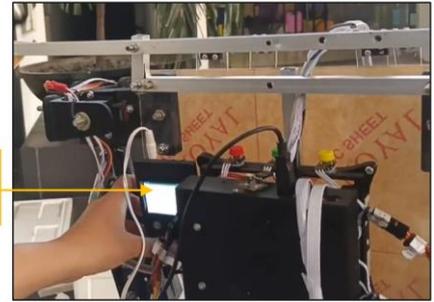
Gambar 11. Detail Desain Smart Skeleton Tampak Depan



Gambar 12. Detail Desain Smart Skeleton Tampak Belakang



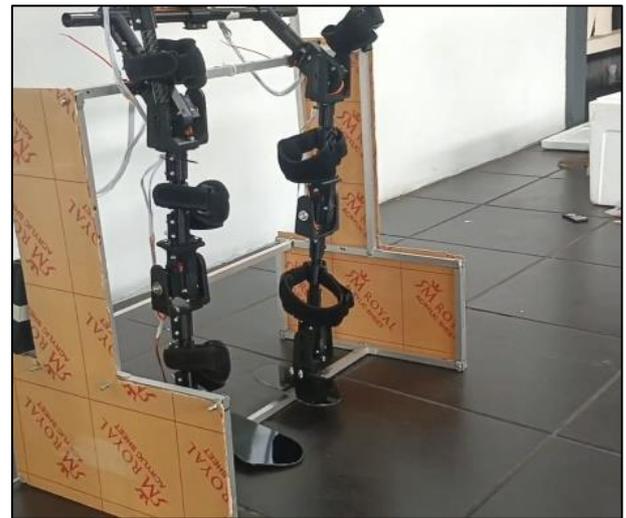
Gambar 13. Detail Desain Smart Skeleton Ekstremitas Bawah



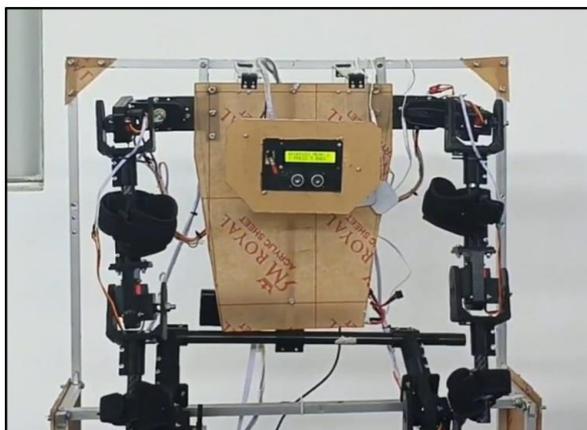
Gambar 16. Smart Skeleton Tampak Belakang



Gambar 14. Smart Skeleton



Gambar 17. Ekstremitas Bawah Smart Skeleton



Gambar 15. Smart Skeleton Tampak Depan

Dalam merancang dan membuat *smart skeleton* hal yang diperhatikan yaitu *clinical design spesification* yang teorinya dikemukakan oleh McDaid (2017) yang memuat aspek-aspek seperti *mechanical function*, *weight*, usia target, manfaat terapeutik, *safety*, kenyamanan, dan operasional. Dapat dilihat seperti pada **Tabel I**. Dalam setiap aspek terdapat pula spesifikasi desain yang ideal bagi penderita *CP* seperti dapat dioperasikan di rumah dan tanpa profesional sehingga *smart skeleton* dirancang dengan pengontrolan yang mudah dengan otomatis (*remote control*) dan manual (potensiometer). Selain itu, *smart skeleton* juga dirancang dengan menggunakan *brace* yang dapat dilepas-pasang sehingga nyaman bagi pengguna.

Berdasarkan teori tersebut *smart skeleton* mampu memenuhi seluruh syarat alat rehabilitasi penderita *CP* kecuali pada syarat berat tubuh pengguna yang mampu menahan 80kg karena dibutuhkan rencana tindak lanjut berupa penggantian *servo motor*. *Servo motor* yang lebih besar dan penyusunan mekanik yang lebih baik sehingga mampu menopang hingga berat badan penderita 80kg.

Tabel I. Clinical Design Spesification.

Requirement	Clinical Design Spesification	Smart Skeleton
Mechanical functionality	1. Mudah dioperasikan (digunakan di rumah tanpa profesional).	Mampu
	2. Mendukung pola jalan normal dengan langkah.	Mampu
	3. Mampu berjalan untuk isyarat proprioseptif yang melibatkan subjek.	Mampu
	4. Mampu melewati tanjakan kecil pada medan datar.	Mampu
	5. Kecepatan berjalan sesuai ritme berjalan normal.	Mampu
	6. Memenuhi seluruh nilai ROM.	Mampu
	7. Stabil dan tidak perlu penyeimbang.	Mampu
	8. Kontrol hip dan knee secara mandiri.	Mampu
	9. Dapat disesuaikan dengan berbagai panjang langkah.	Mampu
Weight	Mampu menahan berat tubuh hingga 80kg.	Memerlukan rencana tindak lanjut
Usia target	Rentang usia dan masalah pada penderita dengan usia 5 – 15 tahun.	Mampu
Manfaat terapeutik	Memberikan latihan yang dapat meningkatkan kualitas hidup pengguna.	Mampu
Safety	Terdapat sebuah upaya proteksi anak (alat tidak melukai pengguna).	Mampu
Kenyamanan	Pengguna menggunakan tanpa rasa sakit.	Mampu
Operasional	Alat dapat dikontrol dan diadaptasi sesuai dengan kemampuan dan ukuran anak.	Mampu

Sumber: [31]

Hal ini terjadi karena *servo motor* pada *smart skeleton* hanya memiliki torsi sebesar 21,8kg/cm meskipun memiliki sudut defleksi yang besar mencapai 180° [17]. Aktuator yang lebih besar diperlukan dalam menghasilkan kestabilan dalam pergerakan *smart skeleton*. Aktuator seperti *Ares Actuator* yang digunakan pada *Atlas Pediatric Exo* penelitian yang dilakukan oleh Delgado dkk (2021) menjadi pilihan yang lebih baik karena memiliki torsi dan kekakuan yang lebih besar. Selain itu, *Ares Actuator* dapat digunakan sesuai dengan kemampuan minimal penderita tanpa benturan dan menyimpan dan melepaskan energi pada elemen pasif elastik serta relatif lebih aman bagi pengguna.

Dengan desain *smart skeleton* ini, terdapat beberapa indikasi pengguna yaitu penderita *CP* dengan nilai *GMFCS* level 2 – 4, *milestone* atau usia tumbuh kembang >12 bulan yang memiliki

kontrol kepala dan *trunk* yang baik, serta memiliki riwayat rehabilitasi rutin. Selain itu, sebelum penggunaan penderita harus melalui pemeriksaan sensorik berupa tajam tumpul jika ingin menggunakan *electrical stimulation*. Klasifikasi *GMFCS* ini mengelompokkan penderita *CP* berdasarkan kemampuan motorik yang dapat dilakukan secara mandiri (*self-initiated*) oleh penderita. Instrument klasifikasi *GMFCS* ini telah terbukti validitas dan reabilitasnya dalam klasifikasi fungsi motorik penderita *CP* [32]. Pada penderita *CP* dengan *GMFCS* 2 – 4 penderita memiliki *self-initiated* yang dapat mengurangi pembebanan pada *smart skeleton*. Usia kalender dan usia tumbuh kembang dievaluasi menjadi prediktor awal yang akan menentukan intervensi pada penderita *CP*. Penderita *CP* seringkali mengalami keterlambatan pada tumbuh kembang yang berpengaruh pada kesesuaian intervensi dan latihan. Kontrol kepala dan *trunk* menjadi indikator paling awal dalam penentuan keterlambat. *Smart skeleton* dirancang untuk penderita *CP* dengan kontrol kepala dan *trunk* yang baik. Hal tersebut menyesuaikan dengan desain dan torsi *servo motor* yang digunakan pada *smart skeleton*. Selain itu, riwayat rehabilitasi rutin juga menjadi indikasi pengguna untuk mengurangi kemungkinan penderita dengan spastistas otot tinggi. Penderita dengan riwayat rehabilitasi rutin sejak dini dapat meningkatkan kemungkinan lebih baik pada spastisitas dan peningkatan kualitas hidup [7]. Hal tersebut didasari pada torsi *servo motor* dan filament 3D yang dapat pecah sehingga membahayakan penderita. Sebelum menggunakan *electrical stimulation* penderita harus melalui pemeriksaan sensorik untuk mengetahui kemampuan sensorik penderita dalam menangkap sensasi superfisial. Hal ini dilakukan karena *electrical stimulation* menghasilkan arus listrik yang akan mengalir hingga otot penderita yang akan menimbulkan kondisi kurang nyaman bagi penderita [33]. Rangkaian mekanis komponen *smart skeleton* dapat dilihat pada **Gambar 10**.

Seluruh rangkaian komponen dikendalikan dan dikelola oleh *arduino mega* dengan *power supply* dari baterai litium polimer (Li-Po), seperti pada **Gambar 11**. Sifat baterai Li-Po yang portabel mempermudah pergerakan *smart skeleton* ke segala arah. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ahmad, Suryoatmojo, dan Riawan (2023) baterai Li-Po menjadi baterai portabel yang memiliki kemampuan *recharge* dengan daya cukup besar dan mudah ditemukan. Namun, baterai Li-Po memiliki *life-cycle* tertentu apabila mengalami

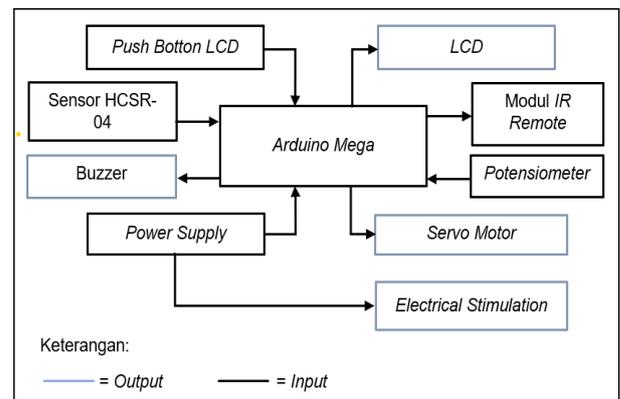
undercharging atau *overcharging* sehingga dalam proses *recharge* diperlukan kehati-hatian.

Push botton LCD digunakan untuk mengatur gerak *smart skeleton* berdasarkan menu program yang tertampil pada *LCD*. Pengontrolan *servo motor* dilakukan dua cara yaitu otomatis dengan *input* modul *IR remote*. Selain itu, pengontrolan dapat dilakukan secara manual dengan *potensiometer*. *Potensiometer* berfungsi untuk membaca batas sudut dari putaran *servo motor*. Sedangkan besar sudut *servo motor* diatur berdasarkan pulsa yang diprogram pada *arduino mega*. Sinyal yang masuk ke *arduino mega* akan diproses dan menghasilkan *output* berupa gerak *servo motor smart skeleton*. Upaya keamanan *smart skeleton* menggunakan sensor *HCSR-04* sebagai pembaca objek yang akan bekerja sama dengan *buzzer* sebagai tanda peringatan berupa bunyi. Sensor *HCSR-04* akan mendeteksi keberadaan objek dengan memantulkan gelombang ultrasonik yang kemudian akan memberi informasi keberadaan objek pada *arduino mega* yang kemudian akan menghasilkan *output* bunyi pada *buzzer*.

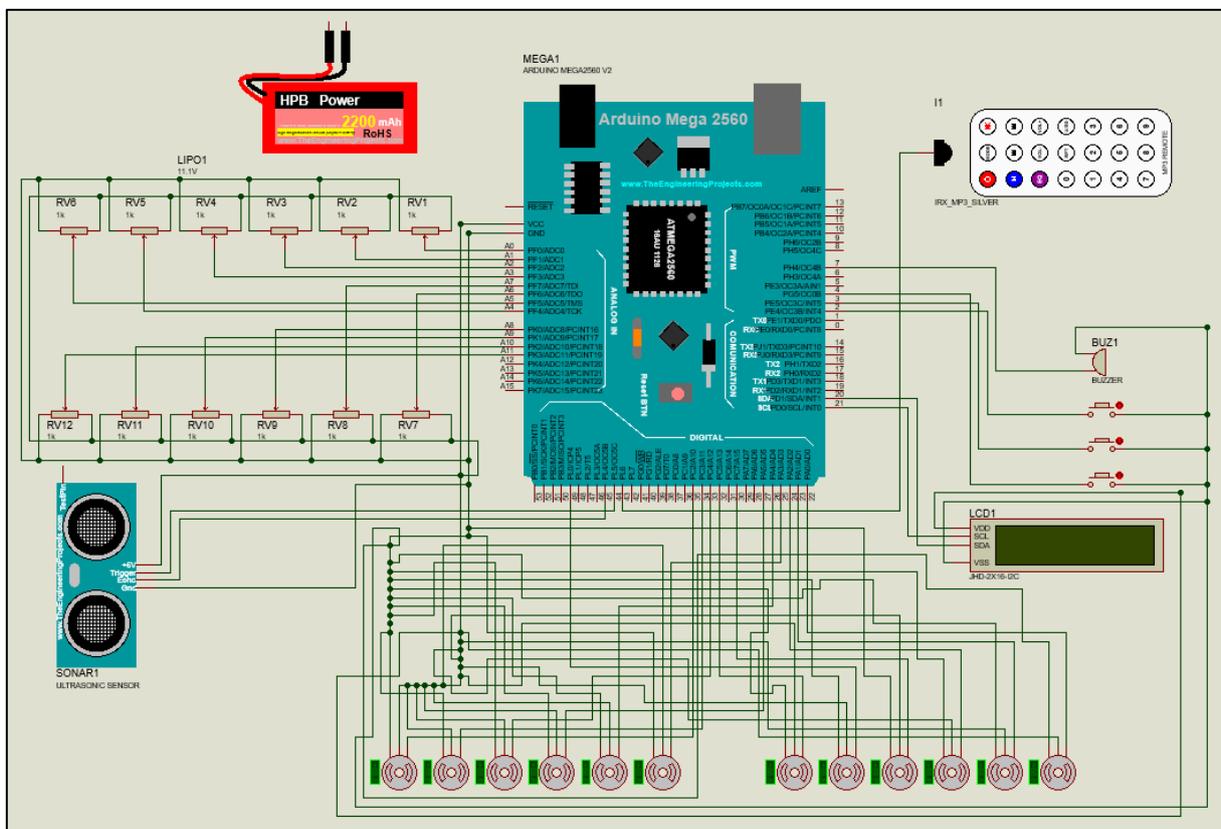
Rangkaian *smart skeleton* memiliki dua *power supply* yang berbeda karena *electrical stimulation* memiliki baterai bawaan yang terpisahkan dari

rangkaian utama *smart skeleton*. *Electrical stimulation* akan menghasilkan *output* berupa aliran Listrik yang dapat menstimulasi saraf dan otot. Namun, rangkaian seluruh komponen *smart skeleton* tetap menjadi sebuah kesatuan.

Smart skeleton bertujuan untuk mengaktifasi *SMI* penderita, meningkatkan *ROM*, dan meningkatkan kemampuan motorik penderita dengan menerapkan metode *NDT*. Prinsip inhibisi bertujuan untuk menghambat dan menurunkan tonus otot penderita untuk kembali ke kondisi anatomis penderita. Hal tersebut dilakukan untuk meredakan spastisitas yang terjadi penderita *CP*.

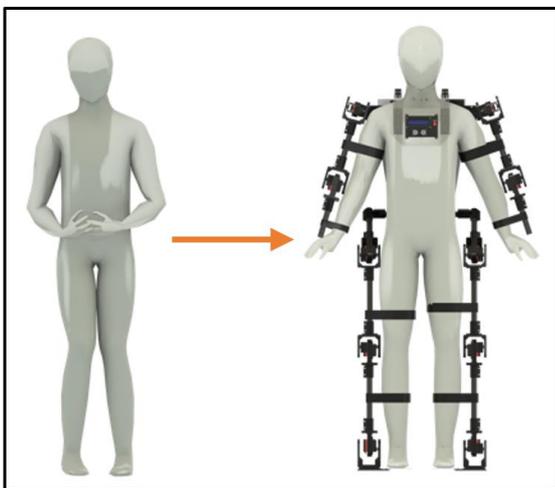


Gambar 18. Bagan Sistem Elektronika Smart Skeleton



Gambar 19. Skematik Rangkaian Smart Skeleton

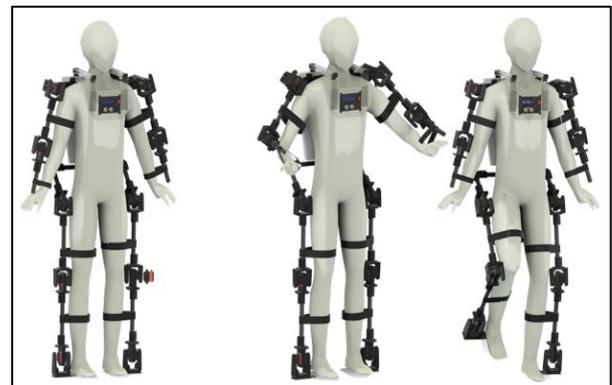
Dalam penelitian yang dilakukan Te Velde dkk (2022) dikatakan bahwa secara sederhana prinsip pelaksanaan metode *NDT* mencakup 2 elemen yaitu fasilitasi gerak untuk meningkatkan kontrol postural dan melatih penderita untuk bergerak secara normal pada pola motorik yang seharusnya. Penelitian lain yang dilakukan oleh Khan dkk (2022) mengatakan bahwa pada prinsipnya pelaksanaan terapi berbasis *NDT* memiliki dasar untuk memberikan *normal mobility experience* pada penderita *CP* untuk mengurangi kerusakan motor-sensor dan meningkatkan kemampuan fungsional penderita. Kontrol postural pada penderita *CP* dilakukan untuk mempertahankan, memperoleh, atau memulihkan keadaan keseimbangan selama posisi atau aktivitas apapun. Prinsip Inhibisi pada Smart Skeleton dapat dilihat pada **Gambar 12**.



Gambar 20. Prinsip Inhibisi pada Smart Skeleton

Sistem kerja prinsip fasilitasi dilakukan dengan pemberian pola rehabilitasi *re-patterning* dengan pola gerak yang telah diprogram melalui pengontrolan manual dan otomatis seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 13**. Sedangkan prinsip stimulasi dilakukan dengan meletakkan pad pada origo dan insersio dari otot yang ingin distimulasi atau dengan meletakkan pad dengan teknik animal vegetatif untuk menstimulasi saraf simpatik dan parasimpatik penderita. Hal terpenting dalam fasilitasi penderita *CP* yaitu melakukan pola terapi *re-patterning*. Penelitian yang dilakukan oleh Sopandi dan Nesi (2021) menunjukkan hasil bahwa pemberian intervensi *neurosensomotor reflex integration* dan *neurodevelopmental therapy* yang dilakukan berulang (*re-patterning*) dapat memperbaiki tonus otot, merubah pola gerak abnormal, dan mengembangkan pola-pola gerak motorik dasar. Pengulangan membantu penderita *CP* untuk

mengenali pola gerak normal yang diajarkan sebagai upaya penanaman memori motorik. Penelitian lain yang dilakukan oleh Rahmadiva dkk (2020) dengan membuat *exoskeleton* yang dipadukan dengan *electrical stimulation* juga mengungkapkan bahwa dalam rehabilitasi penderita dengan *range of motion* terbatas dibutuhkan terapi yang sifatnya intensif dan repetitif untuk membantu pemulihan dan mendorong perubahan neuroplastis otak. Penelitian yang dilakukan oleh Harjpal dkk (2022) menunjukkan peningkatan kemampuan motorik dan keseimbangan setelah diberikan perlakuan yang sama dan berulang selama 6 minggu berupa *neurodevelopmental therapy*, *static wearbearing exercises* dan *task-oriented approaches*.



Gambar 21. Prinsip Fasilitasi pada Smart Skeleton

Prosedur penggunaan *smart skeleton* dimulai dengan menghubungkan baterai pada *electrical control box* dan nyalakan alat. Selanjutnya pilih menu program manual atau otomatis pada *LCD*. Kemudian, pasang alat pada penderita dengan mengeratkan *brace* lengan dan tungkai untuk menginhibisi gerak dan postur abnormal penderita. Selanjutnya, keluarga penderita dapat memilih gerakan yang ingin difasilitasi. Fitur *electrical stimulation* dapat diaktifkan pada menu *electrical stimulation* sesuai dengan dosis yang dibutuhkan oleh penderita.

Pengujian besar sudut *ROM servo motor* dilakukan menggunakan goniometer. Hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel II**. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan pengontrolan manual *smart skeleton* menggunakan potensiometer. Nilai *ROM* yang dihasilkan oleh *smart skeleton* tidak semua melampaui nilai normal. Namun, nilai tersebut cukup untuk mendukung pola gerak *ADL* normal seperti pola aktivitas makan, berjalan, dan pemeliharaan diri. Dengan demikian, masih dibutuhkan penyesuaian *range* besar sudut *servo motor* yang diprogram

agar nilai *ROM* dapat berada tepat pada nilai *ROM* normal.

Tabel II. Hasil Uji Range of Motion Servo Motor

Joint	Gerakan	ROM Normal	ROM Smart Skeleton	Keterangan
Elbow	Fleksi	140°	110°	100° – 129° pada pola aktivitas makan
Shoulder	Ekstensi	0°	0°	-
	Fleksi	180°	180°	90° – 160° pada pola aktivitas pemeliharaan diri
	Ekstensi	50°	0°	0° umumnya pada aktivitas keseharian
Hip	Abduksi	180°	110°	45° – 90° pada pola gerak merangkul
	Fleksi	100°	150°	25° – 30° pada pola berjalan normal
Knee	Ekstensi	30°	35°	10° pada pola berjalan normal
	Fleksi	150°	110°	15° – 20° pada pola berjalan normal
Ankle	Ekstensi	0°	0°	0° pada pola berjalan normal
	Dorso fleksi	30°	90°	5° – 10° pada pola berjalan normal
	Plantar fleksi	20°	90°	10° – 15° pada pola berjalan normal

Sumber: Data Primer dan [39]

Penelitian yang dilakukan oleh Noei dan Lakany (2022) menunjukkan bahwa dalam pengembangan alat rehabilitasi pada kondisi neurologis dan muskuloskeletal, memerlukan analisis karakteristik kinematik tubuh manusia yang meliputi besar sudut, torsi, dan gaya untuk memaksimalkan *ROM* dalam melakukan aktivitas yang lebih kompleks seperti *ADL*.

Range of motion menjadi faktor penting yang harus diperhatikan dalam pembuatan alat rehabilitasi dalam pemenuhan aspek biomekanik penderita. *Range of motion* dipengaruhi oleh faktor klinis seperti limitasi sendi, peningkatan tonus otot, kontraktur otot, dan nyeri. Gejala yang dialami penderita akan semakin memburuk seiring bertambahnya usia terlebih di masa pertumbuhan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Wibeck dkk

(2023) menunjukkan bahwa *ROM* pada penderita *CP* dewasa tidak berhubungan dengan usia penderita. Namun, pada penderita *CP* anak dan dewasa muda saling berkaitan antara usia dan tingkat kerusakan yang sebanding. Pada penelitian yang dilakukan oleh Dogan dkk (2019) menunjukkan bahwa *ROM* mempengaruhi kemandirian dan optimalisasi dalam melakukan aktivitas keseharian. Penelitian dilakukan pada 46 sampel sehat yang menghasilkan kesimpulan bahwa dalam aktivitas keseharian *ROM* yang dibutuhkan meliputi ekstensi *shoulder* 37°, fleksi *shoulder* 91°, abduksi 63°, fleksi *elbow* 124°, dan ekstensi 23°.

Penelitian yang dilakukan oleh Delgado dkk (2021) menunjukkan bahwa alat bantu berteknologi *exoskeleton* dapat meningkatkan *ROM* penderita *spastic cerebral palsy*. Hal tersebut dibuktikan oleh hasil pengujian *ROM* alat menggunakan goniometer dalam pola berjalan penderita. Selain itu digunakan juga *hand-held dynamometer* dan *modified ashworth scale* untuk mengevaluasi peningkatan kekuatan dan spastisitas otot. Hasil uji coba pada 3 penderita *CP* menunjukkan bahwa alat rehabilitasi dengan teknologi *exoskeleton* ini mampu meningkatkan kekuatan dan *ROM* pada penderita. Selain itu, terjadi penurunan spastisitas yang signifikan pada ketiga sampel. Peningkatan *ROM* setelah penggunaan *robot-assisted gait* mungkin terjadi karena perubahan psikologi positif yang dialami penderita dalam memotivasi diri untuk terus berlatih. Penelitian yang dilakukan oleh Moll dkk (2022) menunjukkan pengaruh positif terhadap mobilitas sendi setelah menggunakan *robot-assisted gait*. Luasnya penggunaan *exoskeleton* dalam rehabilitasi memberikan fokus pada gerak dan fungsi individu dalam mencapai *ROM* semaksimal mungkin. Pengujian besar intensitas dan frekuensi *electrical stimulation* dapat dilihat pada Tabel III.

Pemberian *electrical stimulation* pada penderita *CP* sudah menjadi hal yang umum dan sering dilakukan oleh terapis karena intensitas dan frekuensi yang cukup untuk menghasilkan kontraksi otot. Kontraksi otot dapat terjadi akibat depolarisasi motor pada saraf local untuk memfasilitasi kekuatan otot dan mengurangi spastisitas pada penderita *CP*. *Electrical stimulation* akan diletakkan pada permukaan kulit dan melalui elektroda peningkatan kontraksi otot akan terjadi [29].

Tabel III. Hasil Pengujian Besar Intensitas dan Frekuensi Electrical Stimulation

Level	Nilai Frekuensi Maksimum (Hz)	Nilai Intensitas (mA)
1	0	0
2	91,7	10,1
3	91,7	14,9
4	91,7	20,5
5	91,7	25,0
6	91,7	30,1
7	91,7	35,7
8	91,7	39,5
9	91,7	45,1
10	91,7	49,9
11	91,7	55,6
12	91,7	60,6
13	91,7	65,2
14	91,7	70,2
15	91,7	74,9
16	91,7	80,1
17	91,7	84,9
18	91,7	90,3
19	91,7	94,6
20	91,7	101,6

Sumber: Data Primer

Penelitian yang dilakukan oleh Shapkova dkk (2020) mengkombinasikan teknologi *exoskeleton* dengan *electrical stimulation* dalam alat bantu berjalan pada penderita *spinal cord injury*. *Electrical stimulation* dapat mengaktifasi dan meningkatkan sirkuit lokomotor tulang belakang. Penggunaan *electrical stimulation* pada terapi konvensional juga memberikan pengaruh yang lebih baik pada peningkatan motorik pada penderita *CP* dibanding tanpa *electrical stimulation*. Penelitian yang dilakukan oleh Salazar dkk (2019) membuktikan bahwa *electrical stimulation* dapat meningkatkan level *GMFCS* dan memberikan efek positif terhadap penderita untuk memperbaiki masalah berjalan penderita. Hal tersebut terjadi karena *electrical stimulation* mendorong adaptasi saraf dan otot pada peningkatan fungsional. Penggabungan *electrical stimulation* dan *exoskeleton* juga memberikan peningkatan kemampuan berjalan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Shideler dkk (2020) yang mendemonstrasikan penerapan awal sistem dalam menstimulasi *quadriceps* penderita *CP* dalam kondisi berjalan menggunakan *exoskeleton*. Penerapan tersebut menghasilkan perbaikan langsung pada fleksi *knee* saat berdiri dan berjalan.

Pemberian dosis intensitas dan frekuensi yang dinilai cukup bagi penderita *CP* terdapat pada *systematic review* yang dilakukan oleh Mooney dan Rose (2019) sebesar 20 – 50mA dan 10 – 60Hz. Pemberian *electrical stimulation* dapat dilakukan selama aktivitas berjalan penderita untuk memberikan kekuatan otot yang lebih baik bagi penderita. Pada penelitian yang dilakukan oleh Cobo-Vicente (2021) frekuensi 20 – 35Hz dan intensitas 20 – 100mA dinilai cukup untuk diberikan pada penderita *CP*. Pemberian *electrical stimulation* dapat dilakukan selama 6 – 8 minggu. Namun, umumnya setelah 2 minggu terapi peningkatan motorik dapat dilihat. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Elbasan dkk (2019) memberikan frekuensi sebesar 60Hz dan intensitas yang disesuaikan selama 4 minggu pada penderita *CP* menunjukkan terjadi peningkatan yang signifikan dalam kemampuan duduk, kontrol postural, dan kemampuan motorik pada sampel.

Smart skeleton menerapkan prinsip inhibisi dengan tujuan menahan gerak dan postur abnormal penderita melalui pemilihan komponen utama berupa *carbon fiber* dan pemasangan *brace* pada setiap lengan. Prinsip fasilitasi diterapkan dengan menggunakan *servo motor* yang telah diprogram dengan pola gerak seperti fleksi-ekstensi, abduksi, gerakan makan, gerakan memeluk, dan gerakan berjalan. Masing-masing gerakan telah terprogram dalam *remote control* dengan pola 6-10 repetisi. Pada prinsip stimulasi diterapkan dengan menggunakan *electrical stimulation* yang diletakkan pada area animal vegetatif persarafan dan secara local pada kelompok otot tertentu.

IV. KESIMPULAN

Smart skeleton menerapkan tiga prinsip *NDT* dalam satu alat dapat diwujudkan dengan pemilihan komponen yang sesuai seperti *carbon fiber* dan *brace* untuk inhibisi, *servo motor* untuk fasilitasi, dan *electrical stimulation* untuk stimulasi. Mekanisme kerja *smart skeleton* dalam mengaktifasi *SMI*, meningkatkan *ROM*, dan meningkatkan kemampuan motorik dapat terwujud dengan penerapan 3 prinsip *NDT* yang bersifat *re-patterning* dan pengontrolan alat secara manual dan otomatis sehingga memungkinkan penggunaan alat di rumah. *Servo motor* pada *smart skeleton* bertujuan untuk meningkatkan kemampuan motorik penderita yang keseluruhan nilai *ROM*-nya memenuhi nilai *ROM* normal dalam aktivitas seperti makan, memeluk, meraih benda, dan berjalan. *Electrical stimulation* pada *smart skeleton* bertujuan untuk mengaktifasi *SMI* menggunakan *electrical stimulation* yang memiliki

nilai intensitas dan frekuensi yang mencukupi standar kebutuhan bagi penderita CP. Selain itu, *smart skeleton* dilengkapi dengan komponen pendukung seperti *remote control* dan potensiometer yang memungkinkan pengontrolan otomatis dan manual. Terdapat juga sensor HCSR-04 yang dapat membaca objek sebagai media keamanan pengguna. Secara keseluruhan tujuan penelitian ini telah tercapai karena *smart skeleton* mampu menerapkan 3 prinsip NDT dengan desain rancangan berupa teknologi *exoskeleton* yang dinilai cukup untuk memenuhi kebutuhan penderita CP.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Marpole, A. M. Blackmore, N. Gibson, M. S. Cooper, K. Langdon, dan A. C. Wilson, "Evaluation and management of respiratory illness in children with cerebral palsy" *Front. Pediatr.*, vol. 8, no. 1, hlm. 1–13, 2020.
- [2] M. A. Ream dan L. Lehwald, "Neurologic consequences of preterm birth," *Curr. Neurol. Neurosci. Rep.*, vol. 18, no. 8, 2018.
- [3] M. Jackman dkk., "Interventions to improve physical function for children and young people with cerebral palsy: international clinical practice guideline," *Dev. Med. Child Neurol.*, vol. 64, no. 5, hlm. 536–549, 2022.
- [4] J. Hallman-Copper dan C. F. Rocha, "Cerebral Palsy," *StatPearls Publishing*, 2022.
- [5] Cerebral Palsy Alliance, "World Cerebral Palsy Day Campaign Guide," *World Cerebral Palsy Day*, 2023.
- [6] S. E. Wulandari, S. Hartini, dan U. Noviana, "Dukungan orang tua dalam mengoptimalkan pertumbuhan dan perkembangan anak dengan cerebral palsy: studi kasus," *J. Keperawatan Klin. dan Komunitas*, vol. 6, no. 2, hal. 69, 2022.
- [7] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, "Hari Cerebral Palsy Dunia, Tingkatkan Keperdulian Stakeholder," *Kementerian Kesehatan Republik Indonesia*, 2020.
- [8] M. Sadowska, B. Sarecka-Hujar, dan I. Kopyta, "Cerebral palsy: Current opinions on definition, epidemiology, risk factors, classification and treatment options," *Neuropsychiatr. Dis. Treat.*, vol. 16, hal. 1505–1518, 2020.
- [9] I. Rosidiana, L. N. Hidayah, W. Lestari, dan I. Silmia, "Status gizi dan kemampuan motorik anak dengan cerebral palsy," *J. Penelit. Kesehat. Suara Forikes*, vol. 14, no. 4, hal. 101–107, 2023.
- [10] A. Setyorini dan N. Setyaningrum, "Pengaruh Latihan Range of Motion (Rom) Aktif Assitif Terhadap Rentang Gerak Sendi Pada Lansia Yang Mengalami Imobilisasi Fisik," *J. Ilm. Ilmu Keperawatan dan Ilmu Kesehat. Masy.*, vol. 13, no. 2, hal. 77–84, 2019.
- [11] A.-L. Wibeck, K. Himmelman, U. Jonsson, dan M. N. Eek, "Range of Motion Limitations in Middle-aged Adults With Cerebral Palsy," *Arch. Rehabil. Res. Clin. Transl.*, vol. 5, no. 4, hal. 100303, Des 2023.
- [12] A. Te Velde dkk., "Neurodevelopmental Therapy for Cerebral Palsy: A Meta-analysis," *Pediatrics*, vol. 149, no. 6, hal. 64–93, 2022.
- [13] A. Prima dan A. Achadi, "Kepuasan Penggunaan Alat Ortotik Prostetik: Systematic Literatur Review," *J. Ners Community*, vol. 13, no. 5, hal. 568–576, 2022.
- [14] D. Aras, J. Tammasse, dan M. Syaiful, "The Effect of Sensomotoric Integration Exercise on Balance Disorder of Post Stroke Patients," *Int. J. Sci. Basic Appl. Res.*, vol. 42, no. 4, hal. 124–130, 2018.
- [15] S. Fox, O. Aranko, J. Heilala, dan P. Vahala, "Exoskeletons: Comprehensive, comparative and critical analyses of their potential to improve manufacturing performance," *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 31, no. 6, hal. 1261–1280, 2020.
- [16] S. K. Hasan dan A. K. Dhingra, "State of the art technologies for exoskeleton human lower extremity rehabilitation robots," *J. Mechatronics Robot.*, vol. 4, no. 1, hal. 211–235, 2020.
- [17] M. Sarajchi, M. K. Al-hares, dan K. Sirlantzis, "Wearable Lower-Limb Exoskeleton for Children With Cerebral Palsy: A Systematic Review of Mechanical Design, Actuation Type, Control Strategy, and Clinical Evaluation," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 29, hal. 2695–2720, 2021.
- [18] R. Ibrahim dan P. Syafitri, "Efektivitas intervensi bobath pada anak dengan cerebral palsy: Artikel reviu," *Indones. J. Heal. Sci.*, vol. 2, no. 2, hal. 59–67, 2022.
- [19] C. Naura, S. Hafizah, P. Hasibuan, P. Amanda, dan A. Irma, "Perancangan dan Pengembangan Produk Alat Terapi Untuk Anak Penderita Cerebral Palsy dengan Metode Brainstorming," *Talent. Conf. Ser. Energy Eng.*, vol. 4, no. 1, hal. 333–347, 2021.
- [20] E. Delgado dkk., "ATLAS2030 pediatric gait exoskeleton: Changes on range of motion, strength and spasticity in children with cerebral palsy. A case series study," *Front. Pediatr.*, vol. 9, hal. 1–9, 2021.
- [21] F. Nazari, N. Mohajer, D. Nahavandi, A. Khosravi, dan S. Nahavandi, "Applied exoskeleton technology: A comprehensive review of physical and cognitive human-robot interaction," *IEEE Trans. Cogn. Dev. Syst.*, vol. 15, no. 3, hal. 1102–1122, 2023.
- [22] S. A. F. Suhaimi, N. M. H. T. Suhaimi, dan M. H. M. Ramli, "Design and analysis of a lower limb exo-skeleton suit for post stroke patient: Static and ergonomic analyses," *Mekatronika*, vol. 3, no. 2, hal. 6–18, 2021.
- [23] S. Yeem, J. Heo, H. Kim, dan Y. Kwon, "Technical analysis of exoskeleton robot," *World J. Eng. Technol.*, vol. 07, no. 01, hal. 68–79, 2019.
- [24] H. Fajarudin, dan R. D. Widodo, "Kekuatan tarik material fiber carbon dan fiber glass berdasarkan orientasi serat berbasis matriks epoxy," *J. Inov. Mesin*, vol. 3, no. 1, hal. 20–26, 2021.
- [25] K. S. Navaneethan dan B. K. Nandhini, "A study on mechanical properties of synthetic fiber reinforced polymer composites," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2387, hal. 1–8, 2021.
- [26] Z. F. Lerner dkk., "a pilot study of individuals with cerebral palsy," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 26, no. 10, hal. 1985–1993, 2019.
- [27] Z. I. Tualeka, A. U. Bani, dan F. Nugroho, "Perancangan dan pembuatan prototype alat terapi kaki pasca stroke berbasis arduino atmega328," *J. Inf. Syst.*, vol. 2, no. 1, hal. 100–105, 2022.
- [28] L. Y. Amali dan I. M. L. Batan, "Perancangan alat rehabilitasi pergelangan tangan pasien pasca stroke yang digerakkan motor servo," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 10, no. 1, hal. 124–130, 2021.
- [29] J. A. Mooney dan J. Rose, "A Scoping Review of Neuromuscular Electrical Stimulation to Improve Gait in Cerebral Palsy: The Arc of Progress and Future Strategies," *Front. Neurol.*, vol. 10, no. August, hal. 1–14, 2019.
- [30] Y. Liu dan H. Li, "Electrical stimulation for children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis for randomized controlled trials," *Neuropediatrics*, vol. 54, no. 6, hal. 381–387, 2023.
- [31] A. J. McDaid, "Design, analysis and multicriteria optimization of an overground pediatric robotic gait trainer," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 4, hal. 1674–1684, 2017.
- [32] M. R. Begum, M. A. Hossain, dan S. Sutana, "Gross motor function classification system (GMFCS) for children with cerebral palsy," *Int. J. Physiother. Res.*, vol. 7, no. 6, hal. 3181–3286, 2019.
- [33] P. N. T. Y. Mahardani, K. D. K. Kesumaputri, V. K. Wijaya, dan D. K. Wati, "Efikasi TENS untuk Mengatasi Nyeri Punggung dan Lutut dengan Penyebab Non-Spesifik: Kajian Sistematis," *J. Kedokt. Meditek*, vol. 28, no. 2, hal. 215–226, 2022.
- [34] R. N. Ahmad, H. Suryoatmojo, dan D. C. Riawan, "Rancang bangun pengisi daya untuk baterai lithium-polymer dengan mempertimbangkan kompensasi resistansi," *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 25, no. 2, hal. 48–57, 2023.
- [35] A. K. Khan dkk., "Effects of neurodevelopmental therapy on gross motor function and postural control in children with spastic cerebral palsy: A randomized controlled trial," *Biomed. J.*, vol. 5, no. 5, hal. 298–304, 2022.
- [36] M. A. Sopandi dan N. Nesi, "Fisioterapi pada kasus cerebral palsy," *Indones. J. Heal. Sci.*, vol. 1, no. 2, hal. 47–50, 2021.

- [37] M. Rahmadiva, A. Arifin, M. H. Fatoni, dan S. H. Baki, "Rancang bangun hand tracking glove sebagai antarmuka untuk game rehabilitasi," *J. Tek.*, vol. 9, no. 1, hal. 36–41, 2020.
- [38] P. Harjpal, A. Raipure, R. K. Kovala, dan M. I. Qureshi, "The effect of neuro-physiotherapy on gross motor function in a male child with spastic diplegic cerebral palsy: A case report," *Cureus*, vol. 14, no. 9, hal. 9–12, 2022.
- [39] Department of Sosial and Health Services, "Range of joint motion evaluation chart," *Washington State: Department of Sosial and Health Services*, 2018.
- [40] V. Noei dan H. Lakany, "Analysis of movement of an elbow joint with a wearable robotic exoskeleton using OpenSim software," in *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, Jul 2022, hal. 4342–4345.
- [41] M. Doğan *dkk.*, "Functional range of motion in the upper extremity and trunk joints: Nine functional everyday tasks with inertial sensors," *Gait Posture*, vol. 70, hal. 141–147, Mei 2019.
- [42] F. Moll *dkk.*, "Use of Robot-Assisted Gait Training in Pediatric Patients with Cerebral Palsy in an Inpatient Setting—A Randomized Controlled Trial," *Sensors*, vol. 22, no. 24, hal. 1–19, 2022.
- [43] E. Y. Shapkova, E. V. Pismennaya, D. V. Emelyannikov, dan J. L. Contreras-vidal, "Exoskeleton Walk Training in Paralyzed Individuals Benefits From Transcutaneous Lumbar Cord Tonic Electrical Stimulation," *Front. Neurosci.*, vol. 14, no. May, hal. 1–16, 2020.
- [44] A. P. Salazar, A. S. Pagnussat, G. A. Pereira, G. Scopel, dan J. L. Lukrafka, "Neuromuscular electrical stimulation to improve gross motor function in children with cerebral palsy: a meta-analysis," *Brazilian J. Phys. Ther.*, vol. 23, no. 5, hal. 378–386, 2019.
- [45] B. L. Shideler, T. C. Bulea, J. Chen, C. J. Stanley, A. J. Gravunder, dan D. L. Damiano, "Toward a hybrid exoskeleton for crouch gait in children with cerebral palsy: Neuromuscular electrical stimulation for improved knee extension," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 17, no. 1, hal. 1–14, 2020.
- [46] F. Cobo-Vicente, A. F. San Juan, E. Larumbe-Zabala, A. J. Estévez-González, M. V. F. Donadio, dan M. Pérez-Ruiz, "Neuromuscular electrical stimulation Improves Muscle Strength, Biomechanics of Movement, and Functional Mobility in Children With Chronic Neurological Disorders: A Systematic Review and Meta-Analysis," *Phys. Ther.*, vol. 101, no. 10, hal. 1–19, 2021.
- [47] B. Elbasan, K. U. Akaya, M. Akyuz, dan D. Oskay, "Effects of neuromuscular electrical stimulation and Kinesio Taping applications in children with cerebral palsy on postural control and sitting balance," *J. Back Musculoskelet. Rehabil.*, vol. 31, no. 1, hal. 49–55, Feb 2018.