

Metode geometrik yang berlaku di Indonesia dan diakui di tingkat internasional adalah metode *Strapping*, optik atau metode lainnya [1][2]. Metode *Strapping* menggunakan alat ukur seperti pita ukur (*tape strapping*), roda ukur, *depth tape*, dan sebagainya [1][2]. Metode *Strapping* adalah metode standar yang digunakan di Indonesia [2] karena peralatan yang digunakan relatif lebih mudah dan murah dibandingkan metode lainnya, akan tetapi membutuhkan personil lebih banyak dan waktu yang lumayan lama. Metode alternatif yang berkembang untuk kalibrasi dimensi TUSIT (gambar 2) adalah berbasis pengukuran jarak dengan metode optik pada Instrumentasi *Total Station* dalam beberapa titik uji referensi di dinding luar TUSIT. Pendekatan ini sering kali terbatas jika terdapat tambahan aksesoris pada TUSIT pada dinding luar. Untuk pengujian pada bagian dinding dalam, penggunaan *3D laser scanner* menjadi salah satu metode yang membutuhkan lebih sedikit personil dan pengukuran dimensi dalam TUSIT dalam 3D, setelah dilakukan rekonstruksi dari data titik *cloud* selama proses pemindaian [4][5]. Masalah yang perlu diperhatikan dengan *3D laser scanner* adalah untuk mengukur diameter dalam TUSIT yang kurang atau sama dengan 10 m, perangkat yang mahal dan kondisi permukaan dalam TUSIT yang menjadi masalah pada pengukuran dengan laser.



Gambar 2. Beberapa alat ukur untuk mengkalibrasi TUSIT : a) Tape Strapping [6], (b) Total Station [7], (c) 3D Laser Scanner [8].

Pendekatan lain yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan pemindaian dimensi suatu permukaan adalah dengan basis US *ranging*. Pada awal perkembangannya, US *ranging* dapat dimanfaatkan untuk keperluan navigasi dinamis yang diterapkan pada sistem robot beroda [9][10] dan robot terbang [11]. Sistem dinamis pada robot beroda dilakukan sebagai bagian dari sistem navigasi otomatis untuk menghindari dan membuat keputusan terhadap suatu rintangan. Pengembangan dari US *ranging* untuk pemetaan lingkungan dalam kondisi statis pernah diterapkan pada suatu lingkungan untuk membentuk suatu *3D spherical cap* [12] dan pada suatu objek tangki silinder berdiameter 30 cm yang digunakan untuk menentukan luas lingkaran dalam tangki silinder [13]. Penggunaan pendekatan US *ranging* memberikan beberapa aspek yang lebih unggul dibandingkan *3D laser scanner*, antara lain tidak sensitif terhadap kondisi warna dari permukaan dalam tangki dan potensi untuk pengembangan menjadi salah satu peluang untuk dikembangkan [9].

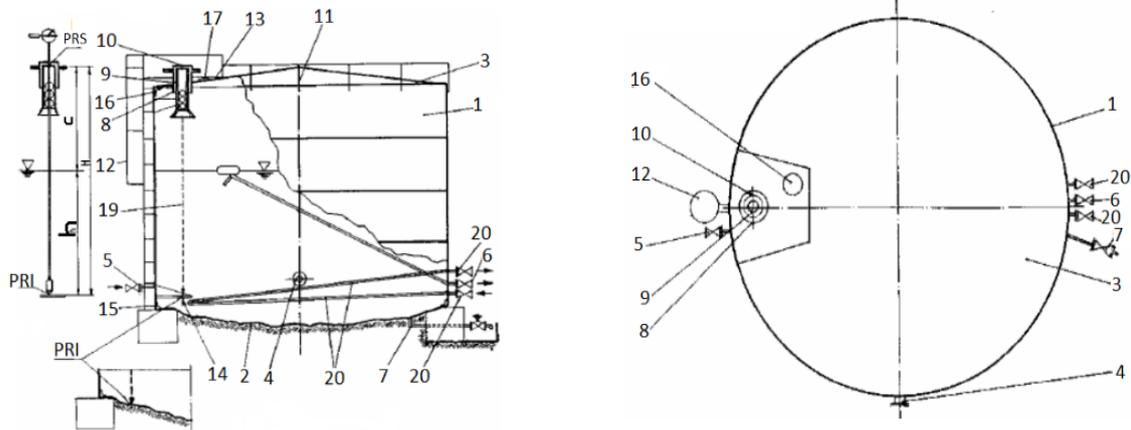
Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini tertarik untuk mengestimasi diameter dalam TUSIT pada beberapa ketinggian di cincin II dengan menggunakan sistem pemindaian ultrasonik. Hasil pemindaian adalah data *cloud* yang jumlahnya lebih banyak dibandingkan metode optik. Sistem tersebut dapat memindai jarak secara otomatis menggunakan transduser ultrasonik yang banyak digunakan pada sistem *robotic mapping* dengan beberapa pengembangan. Pengembangan yang pertama adalah sensor ultrasonik yang digunakan adalah tiga buah transduser ultrasonik HRLV-Maxsonar EZ1 yang memiliki resolusi 1 mm dengan rentang pengukuran sebesar 30-500 cm. Dua buah sensor diletakkan saling bertolak belakang secara horizontal untuk memindai jarak dari transduser ke dinding tangki sedangkan transduser ketiga digunakan untuk mengukur ketinggian purwarupa saat pengukuran dilakukan. Pengembangan yang kedua adalah jumlah titik pengukuran. Purwarupa yang akan dibuat akan memindai jarak pada sebanyak 325 titik pengukuran dalam satu kali putaran pada objek TUSIT yang berdiameter kurang dari 5 m. Jumlah titik tersebut lebih banyak dari penelitian Sutanto et. al. pada tahun 2020 [13] dimana purwarupa yang dibuat hanya untuk mengukur jari-jari silinder pada 8 titik pengukuran dalam satu kali putaran. Selain itu, jumlah titik tersebut lebih banyak juga dibandingkan dengan metode optik yang menggunakan 8-36 titik tergantung keliling tangki yang diukur [14]. Pengembangan yang ketiga adalah pemrosesan data *cloud*. Pemrosesan data yang dimaksud berupa pembersihan data *cloud* dari *outlier*. Data yang sudah bersih dari *outlier* kemudian akan digunakan mengestimasi diameter dalam TUSIT di cincin II. Untuk mengetahui akurasi pengukuran, hasil estimasi diameter dalam TUSIT di cincin II dari alat pemindai yang dibuat akan dibandingkan dengan hasil estimasi diameter dalam TUSIT yang menggunakan metode *Strapping*.

2 Tinjauan Pustaka

2.1 Konstruksi TUSIT

Dalam melakukan kalibrasi, ada baiknya penguji mengetahui konstruksi TUSIT yang akan diuji. Secara umum, konstruksi TUSIT dengan atap tetap dapat diilustrasikan seperti pada gambar 3. Berdasarkan gambar tersebut, TUSIT ini berbentuk silinder beratap kerucut. Bagian yang dikalibrasi adalah bagian TUSIT yang berada pada

ketinggian H, yaitu antara PRS dan PRI. Ketinggian tersebut terbagi ke dalam 4 cincin. Cincin tersebut merupakan *shell* (dinding tangki) yang terbuat dari lembaran plat logam yang disambungkan dengan teknik las sehingga membentuk suatu garis yang melingkar pada permukaan dinding tangki yang ditunjukkan oleh garis hitam horizontal yang melintang pada permukaan tangki. Pada metode *strapping*, ketinggian ini diukur menggunakan *depth tape*. Bagian yang berada sama tinggi dengan *dip plate* (biasa disebut meja ukur) merupakan daerah yang disebut dengan rawa. Dalam pengukuran ketinggian tersebut, orang yang mengukur perlu masuk ke dalam tangki melalui *manhole* untuk memastikan alat ukur menyentuh meja ukur.



- Keterangan:
- | | | |
|--------------------------|---------------------------------|--|
| 1 Dinding tangki | 10 Tutup pipa pengarah | 19 Sumbu pengukuran vertikal |
| 2 Dasar tangki | 11 Pagar di atap tangki | 20 Koil pemanas |
| 3 Atap tangki | 12 Tangga dengan batas pengaman | PRS Titik referensi atas |
| 4 Manhole (lubang masuk) | 13 Lantai pengukuran | PRI Titik referensi bawah |
| 5 Pipa masukan | 14 Meja ukur | H Tinggi referensi |
| 6 Pipa keluaran | 15 Pelat penguat bawah | C Ullage (jarak permukaan cairan ke PRS) |
| 7 Pipa kuras | 16 Pelat penguat atas | h Jarak permukaan cairan ke PRI |
| 8 Lubang ukur | 17 Pelat informasi kalibrasi | |
| 9 Pipa pengarah | 18 Lubang udara | |

Gambar 3. Konstruksi TUSIT dengan atap tetap (a) tampak samping dan (b) tampak atas [1].

TUSIT yang akan diukur diameternya pada penelitian ini (lihat gambar 1) memiliki 4 cincin dan tidak digunakan sebagai alat penyimpanan cairan melainkan hanya digunakan sebagai media untuk pendidikan dan pelatihan pengujian volume TUSIT bagi para penera di seluruh Indonesia dan petugas kalibrasi dari berbagai instansi di Indonesia. TUSIT tersebut berada di Pusat Pembinaan Jabatan Fungsional, disingkat Pusbin JF, Kementerian Perdagangan. Berdasarkan pengujian menggunakan metode *Strapping* yang dilakukan di bulan Februari tahun 2022, TUSIT tersebut memiliki volume kotor sekitar 75 kL. Selain itu, TUSIT tersebut diestimasi memiliki diameter dan ketinggian seperti dinyatakan pada tabel 1.

Tabel 1. Diameter dan tinggi TUSIT hasil pengujian metode *Strapping* di Pusbin JF

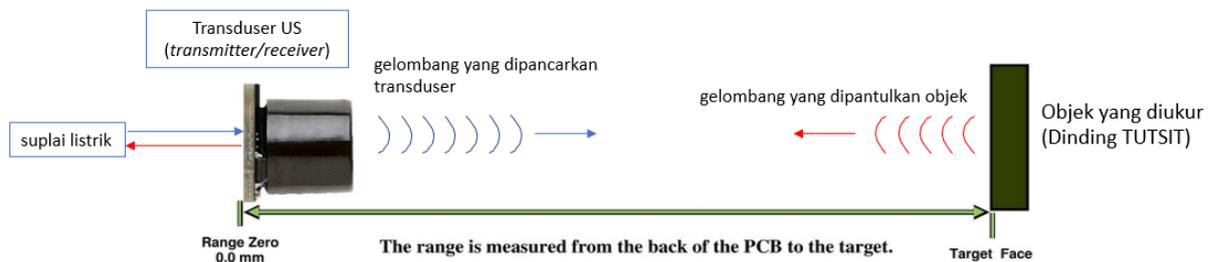
Dimensi TUSIT	Cincin I	Cincin II	Cincin III	Cincin IV
Diameter	403,76 cm	403,65 cm	403,27 cm	403,16 cm
Tinggi	151,10 cm	152,40 cm	153,30 cm	132,10 cm

2.2 Transduser Ultrasonik

Pada penelitian ini, transduser ultrasonik yang digunakan adalah transduser HRLV-Maxsonar EZ1. Transduser tersebut memiliki satu bagian yang berfungsi sekaligus sebagai *transmitter* dan *receiver*. Transduser ini memiliki resolusi 1 mm dan rentang pengukuran 30–500 cm. Kelebihan dari transduser ini adalah tidak terpengaruh oleh warna atau karakteristik visual lain dari objek yang terdeteksi serta memiliki standar internal untuk mengkompensasi pengaruh suhu lingkungan [15]. Seperti pada umumnya, transduser ultrasonik bekerja dengan mengubah sinyal listrik yang terima oleh transduser untuk diubah menjadi sinyal akustik atau gelombang suara dan selanjutnya mengubah pantulan sinyal akustik yang telah menumbuk suatu objek menjadi sinyal listrik. (Lihat gambar 4) Sinyal listrik ini dapat berupa tegangan atau hambatan listrik yang kemudian dikonversi sehingga mewakili jarak antara transduser dengan objek yang ditumbuk oleh gelombang suara. Jarak tersebut merupakan setengah dari perkalian antara cepat rambat gelombang suara di udara (340 m/s) dengan

waktu tempuh gelombang suara tersebut dari dan kembali ke transduser yang dapat dinyatakan dalam persamaan (2).

$$s = \text{jarak} = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2)$$



Gambar 4. Prinsip Kerja transduser ultrasonik [15].

2.3 Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkalibrasi atau menguji dimensi TUTSIT dengan menggunakan metode alternatif selain dari metode *Strapping*. Metode yang dimaksud adalah metode optik. Metode optik tersebut adalah metode Total Station, metode *Internal Electro-Optical Distance Ranging* (EODR) dan metode 3D *Laser Scanning*. Penelitian yang menggunakan metode EODR adalah Agboola, Akinnuli, Akintunde, Ikubanni, dan Adeleke di tahun 2019 [16]. Penelitian tersebut melakukan perbandingan kalibrasi (menentukan volume) pada tiga buah TUTSIT di Nigeria dengan menggunakan metode *Internal EODR* terhadap hasil kalibrasi metode *Strapping*. Jumlah titik pengukuran adalah sebanyak 8 titik pengukuran untuk masing-masing ketinggian pengujian yang berbeda. Penelitian yang menggunakan Total Station adalah Firmansyah, Nugroho, Prihensa, dan Muslim di tahun 2020 [17]. Penelitian ini melakukan perbandingan hasil pengukuran diameter dalam TUTSIT yang berada di Pusat Pengembangan Sumber Daya Kemetrolgian (Sekarang bernama Pusbin JF, Kementerian Perdagangan) dengan menggunakan metode Total Station terhadap hasil pengukuran diameter metode *Strapping*. Metode alternatif lainnya adalah metode 3D *laser scanning* yang pertama kali diperkenalkan oleh Knyva, Knyva, dan Rainys di tahun 2013 [18]. Mereka menggunakan metode ini untuk mengkalibrasi TUTSIT. Pada perkembangan selanjutnya, metode 3D *laser scanning* banyak digunakan oleh berbagai peneliti untuk mengkalibrasi atau mengevaluasi dimensi TUTSIT yang salah satunya dilakukan oleh Huadong, Xuemin, Xianlei, Haolei, dan Pengju di tahun 2017 [19]. Semua metode optik yang disebutkan di atas menggunakan alat survey komersial yang memanfaatkan sensor laser dimana harganya sangat mahal dibandingkan dengan alat yang digunakan dalam metode *Strapping*. Namun demikian, penelitian-penelitian yang menggunakan metode optik tersebut memberikan kesimpulan bahwa hasil kalibrasi menggunakan metode optik masih memenuhi persyaratan OIML dan memiliki akurasi yang sama baiknya dengan metode *Strapping* sehingga mahalnya alat yang digunakan dalam metode optik terbayar oleh efisiensi dan efektifitas dalam kalibrasi TUTSIT [16][17][18]. Selain itu, metode optik diklaim lebih hemat waktu dan personil dalam pengujian [16][18].

Berbeda dengan keempat penelitian tersebut, penelitian mengenai pengukuran dimensi tangki silinder tegak pernah dilakukan oleh Sutanto et al. di tahun 2020 dengan menggunakan konsep pemindai jarak seperti metode EODR dan 3D *laser scanning* namun alat pemindai yang digunakan memanfaatkan transduser ultrasonik untuk pemindaian jarak [13]. Transduser yang dimaksud adalah sebuah transduser ultrasonik HC-SR04 yang memiliki resolusi 1 cm dengan rentang pengukuran 2 - 400 cm. Dalam satu kali putaran, alat yang dibuat dapat mengambil titik pengukuran sebanyak 8 titik. Objek yang diukur adalah luas penampang melintang silinder tegak yang terbuat dari akrilik dengan diameter 30 cm dan tinggi 30 cm. Kelemahan dari alat tersebut adalah tidak dapat digunakan pada TUTSIT karena resolusi yang dibutuhkan adalah 1 mm seperti yang digunakan oleh pada metode *Strapping* atau metode optik. Selain itu, alat tersebut didesain untuk pengukuran di 8 titik sedangkan metode yang sudah ada yaitu metode *internal Electro-Optical Distance-Ranging* (EODR) ditujukan untuk pengambilan data di 8 - 36 titik dalam satu kali putaran. Oleh karena itu, pada penelitian ini, akan dirancang alat yang dapat mengambil data sebanyak 325 titik dalam satu kali putaran dan memiliki resolusi pengukuran sebesar 1 mm.

3 Metode

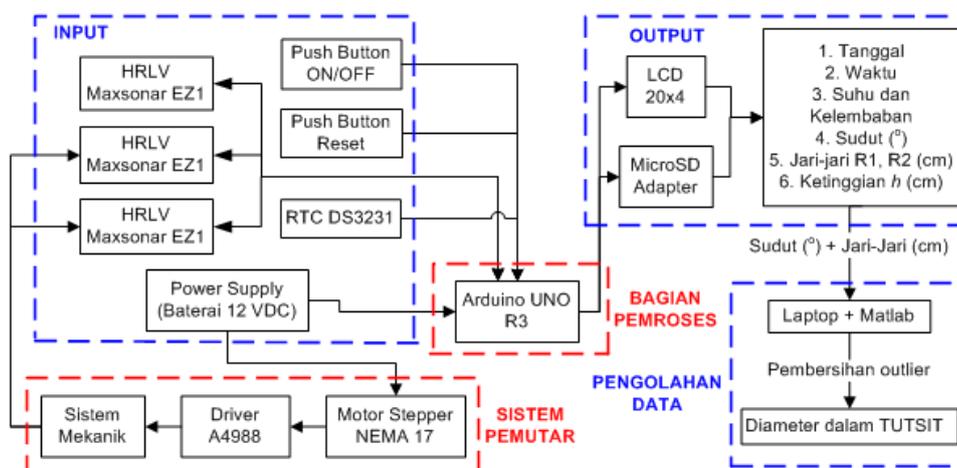
3.1 Spesifikasi

Purwarupa yang dirancang dan dibuat dalam penelitian ini memiliki beberapa spesifikasi tertentu agar dapat melakukan pemindaian sesuai tujuan penelitian. Spesifikasi yang dimaksud adalah:

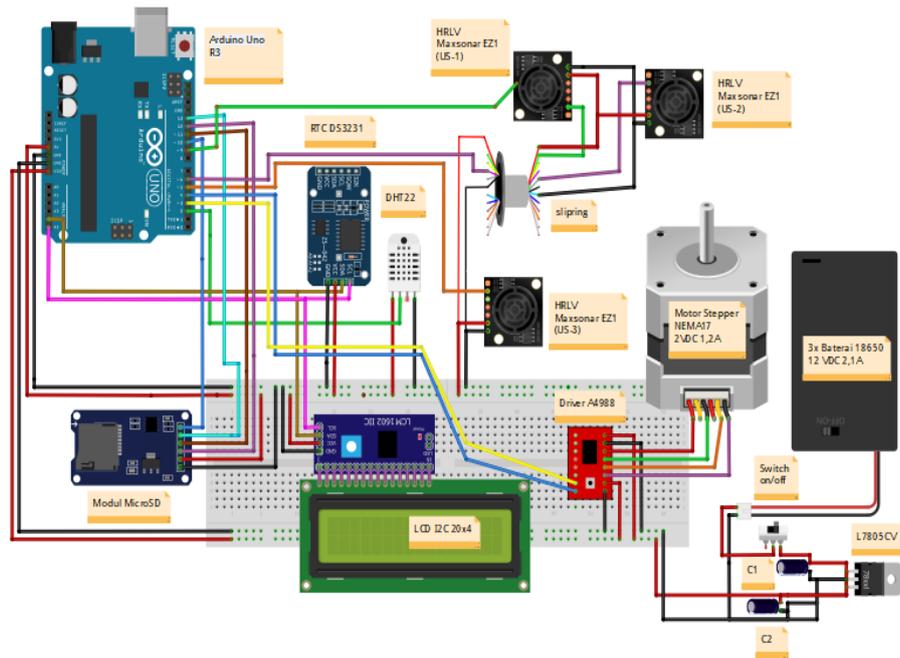
1. Alat pemindai dapat digunakan untuk mengukur diameter tangki hingga 10 m dengan resolusi 1 mm. Hal ini disebabkan alat pemindai menggunakan 3 transduser ultrasonik HRLV-Maxsonar EZ1 yang memiliki resolusi 1 mm dan rentang pengukuran 30-500 cm.
2. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Uno R3.
3. Alat pemindai dapat berotasi 360° secara horizontal, kontinu, dan otomatis.
4. Dalam satu kali putaran, alat pemindai dapat mengambil data di 325 titik pengukuran yang berbeda.
5. Peralatan dan perlengkapan yang digunakan untuk menguji purwarupa memiliki riwayat kalibrasi yang baik.
6. Objek pengukuran adalah diameter TUSIT di cincin II.
7. TUSIT yang diuji adalah tangki kosong yang biasa digunakan untuk pendidikan dan pelatihan kalibrasi TUSIT di Pusbin JF, Kementerian Perdagangan.
8. Suhu dan kelembaban hanya digunakan untuk memberikan informasi kondisi lingkungan dalam pengukuran karena sensor ultrasonik digunakan pada kondisi dalam ruangan yang tertutup dan cenderung stabil.
9. Hasil pengukuran ketinggian oleh transduser ultrasonik yang ketiga hanya untuk mengetahui posisi ketinggian pemindaian.

3.2 Rancang Bangun Purwarupa

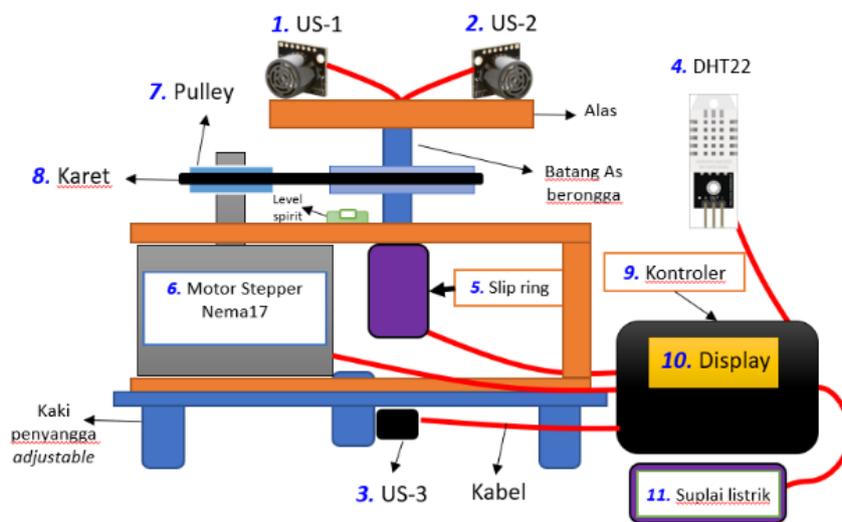
Pada pengukuran diameter dalam tangki, purwarupa alat pemindai dirancang dan dibangun dengan mengikuti blok diagram sistem pada gambar 5, diagram pengkabelan pada gambar 6 dan desain purwarupa seperti pada gambar 7. Berdasarkan gambar 5 dan gambar 7, purwarupa memiliki 4 bagian utama, yaitu bagian masukan, bagian pemroses, sistem pemutar dan bagian output. Bagian input terdiri dari 3 transduser ultrasonik bertipe HRLV-Maxsonar EZ1 (nomor 1, 2, dan 3), sensor DHT22 (nomor 4), RTC DS3231, beberapa *button*, dan sumber daya baterai 12VDC (11). Dengan jarak maksimum pengukuran yang sama, transduser ultrasonik yang digunakan memiliki resolusi yang lebih baik (1 mm) dibandingkan dengan transduser ultrasonik yang banyak digunakan dalam pembuatan purwarupa semisal HC-SR04 (cm). Sistem pemutar meliputi motor *stepper*, *driver* A4988, dan sistem mekanik. Sistem mekanik tersebut terdiri dari *slip ring*, *pulley*, *timing belt*, 2 buah nivo tabung (*level spirit*), serta penyangga transduser dan kaki penyangga. Bagian pemroses adalah mikrokontroler Arduino Uno R3. Bagian keluaran terdiri dari layar LCD12x04 dan *adapter microSD*. Hasil dari pemindaian berupa tanggal, waktu, sudut, jari-jari, ketinggian, suhu dan kelembaban akan disimpan ke dalam kartu *microSD* dan ditampilkan di layar LCD. Agar diperoleh hasil pengukuran diameter yang akurat, data yang tersimpan dalam *microSD* akan diolah menggunakan laptop dan aplikasi MATLAB® untuk pembersihan *outlier* pada data dan perhitungan diameter.



Gambar 5. Diagram blok sistem pemindai diameter berbasis *ultrasound ranging*.

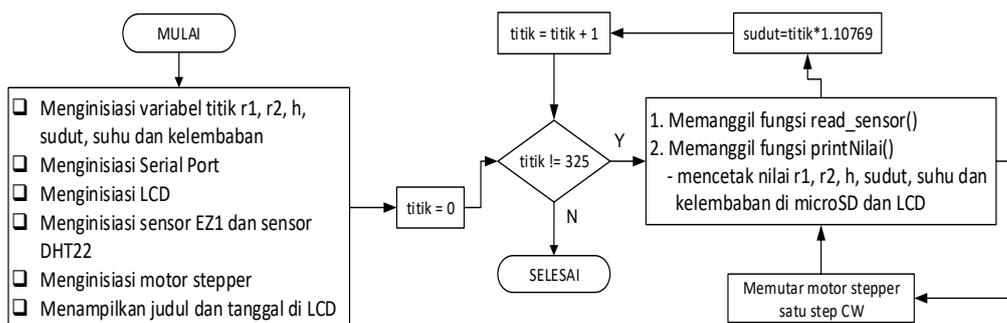


Gambar 6. Diagram pengkabelan purwarupa alat pemindai berbasis *ultrasound ranging*.



Gambar 7. Desain purwarupa alat pemindai berbasis *ultrasound ranging*.

Agar dapat memindai titik ukur sebanyak 325 titik, purwarupa mengikuti diagram alir pada gambar 8. Berdasarkan diagram tersebut, purwarupa akan bergerak sebesar kelipatan $1,10769^\circ$ hingga mencapai 360° sehingga purwarupa dapat memindai jarak di 325 titik. Setelah mencapai 360° , purwarupa akan kembali ke posisi semula dan memulai pemindaian kembali. Purwarupa ini akan berhenti memindai hanya jika dihentikan oleh pengguna atau baterainya habis daya.



Gambar 8. Diagram alir perangkat lunak purwarupa.

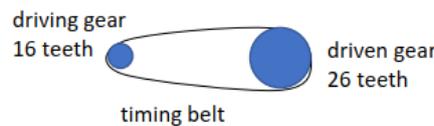
Penentuan 325 titik pada perangkat lunak purwarupa dilakukan dengan memperhatikan rasio gearnya dan perbandingannya step terkecil yang digunakan pada stepper (1 step = 1,80). Gear yang digunakan adalah driven gear 26 teeth dan driving gear 16 teeth. Driving gear dan driven gear dihubungkan oleh timing belt seperti gambar 8. Berdasarkan hasil perhitungan, rasio gearnya adalah $\frac{26}{16}$ atau sebesar 1,625. Artinya, untuk dapat memperoleh 1 step (langkah) dari driven gear maka driving gear perlu melakukan 1,625 step. Jika satu putaran adalah 360o maka 1 putaran driven gear adalah 585o. Nilai tersebut diperoleh dengan mengalikan 1,625 dengan 360o. Karena motor stepper bergerak 1 step sebesar 1,8o sehingga 1 putaran motor stepper membutuhkan jumlah step sebanyak:

$$1 \text{ putaran driven gear} = \frac{585^{\circ}}{1,8^{\circ}} = 325 \text{ step} \tag{3}$$

Dengan demikian, dibutuhkan 325 step dari motor stepper agar driven gear dapat berputar sebesar 360o pada sistem gear di atas. Artinya, 1 step purwarupa adalah sebesar:

$$1 \text{ step purwarupa} = \frac{360^{\circ}}{325} = 1,10769^{\circ} \tag{4}$$

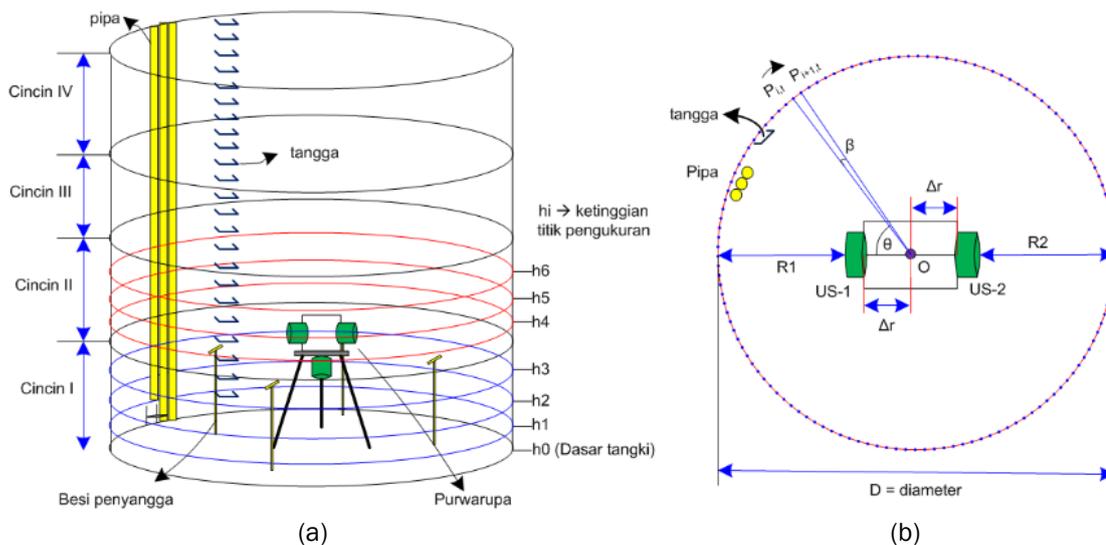
Berdasarkan hal tersebut, dua transduser US-1 dan US-2 seperti pada gambar 9 akan berotasi secara horizontal sebanyak 325 step atau masing-masing, akan memindai objek sekitar di 325 titik.



Gambar 9. Skema driving gear dan driven gear yang dihubungkan oleh timing belt.

3.3 Objek yang Diukur

Pada penelitian ini, skema pemindaian TUSIT yang ada di Pusbin JF seperti pada gambar 10.



Gambar 10. Skema pemindaian jarak oleh purwarupa di dalam tangki (a) tampak samping (b) tampak atas.

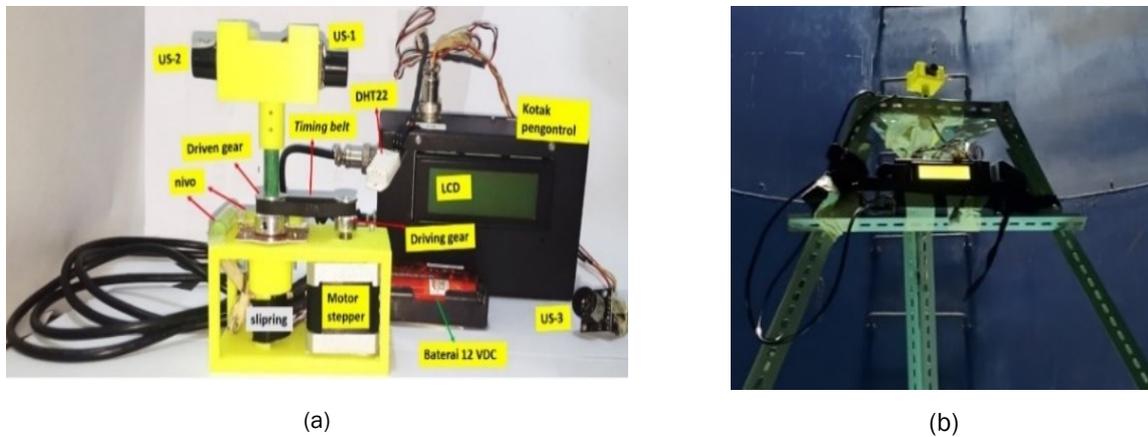
Skema pengukuran jari-jari dalam TUSIT dilakukan di dalam TUSIT seperti pada gambar 10. Pada gambar tersebut, purwarupa diletakkan di tengah-tengah tangki atau di posisi O. Simbol *i* menunjukkan banyak titik target pengukuran sebanyak 325 titik data untuk satu kali putaran. Simbol *t* adalah bilangan antara 1 hingga 6 yang mewakili posisi ketinggian purwarupa ketika pengukuran dilakukan (dari h1-h6). Untuk *t* bernilai 1-3 maka pengukuran tersebut dilakukan di h1-h3 pada cincin I sedangkan untuk *t* bernilai 4-6 berarti pengukuran dilakukan di ketinggian h4-h6 pada cincin II. Misalkan *t* = 4 maka pengukuran dilakukan di ketinggian h4 pada cincin II seperti gambar 10(a). Perhatikan pergerakan US-1 pada gambar 10(b). Setelah purwarupa dihidupkan maka secara otomatis bagian alat pemindai akan berotasi mengikuti arah jarum jam dan mengukur jarak antara titik O dan titik P atau besar segmen OP. Misalkan jarak yang akan diukur adalah segmen antara titik O(x₀,y₀) dan titik P_{*i*,4} (x_{*i*},y_{*i*}) atau segmen OP_{*i*,4}. Artinya, pengukuran dilakukan pada segmen untuk pengukuran ke-*i* pada ketinggian ke-4 atau h4. Untuk dapat mengukur segmen selanjutnya, OP_{*i+1*,4}, sistem mekanik purwarupa menggerakkan transduser dari titik P_{*i*,4} (x_{*i*},y_{*i*}) ke P_{*i+1*,4} (x_{*i+1*},y_{*i+1*}) sebesar sudut β. Adapun sudut θ pada

gambar 10(b) tersebut merupakan besar total sudut yang mewakili pergerakan transduser US-1 dari posisi asal ke titik $P_{i+1,t}$. Segmen OP merupakan jari-jari dalam lingkaran dan nilainya akan tersimpan sebagai data jari-jari US-1 atau disingkat $R1$ dalam satuan cm. Untuk transduser US-2, segmen yang tersimpan sebagai jari-jari US-2 disingkat sebagai $R2$ dalam satuan cm. Dengan demikian, hasil pemindaian pada satu ketinggian akan diperoleh data sebanyak 325 titik pengukuran untuk $R1$ dan 325 titik pengukuran untuk $R2$. Untuk data ketinggian yang diukur oleh transduser US-3, datanya akan tersimpan sebagai h dalam satuan cm.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Desain Purwarupa

Hasil desain purwarupa dapat dilihat pada gambar 11. Berdasarkan gambar 11(a), purwarupa terbagi dalam tiga bagian utama, yaitu bagian pemindai, bagian pengontrol dan *display*, dan bagian *supply* daya. Bagian pemindai terdiri dari 3 transduser ultrasonik (US-1, US-2 dan US-3), *driving gear*, *driven gear*, *timing belt*, *slipring*, motor *stepper* dan nivo tabung. Bagian pengontrol dan *display* terdiri dari komponen-komponen elektronik seperti Arduino, RTC DS3231, LCD 20x4, dan sebagainya. Untuk bagian suplai daya adalah baterai 12 VDC. Ketika pengukuran dilakukan, tampilan purwarupa yang dipasang di atas tripod yang terbuat dari besi siku berlubang dapat dilihat pada gambar 11(b).



Gambar 11. Wujud purwarupa alat pemindai (a) sebelum dipasang pada tripod dan (b) setelah dipasang pada tripod ketika pengukuran berlangsung.

4.2 Hasil Uji Fungsionalitas Purwarupa

Purwarupa telah berfungsi sebagaimana mestinya berdasarkan apa yang ditunjukkan oleh tampilan layar LCD dan isi file yang tersimpan dalam microSD seperti pada gambar 12. Berdasarkan gambar 12, keluaran transduser ultrasonik US-1, US-2, dan US-3, berturut-turut diwakili oleh $r1$, $r2$, dan h . Huruf T dan H mewakili keluaran suhu dan kelembaban yang berasal dari sensor DHT. Adapun simbol x mewakili besar sudut putar yang telah dilakukan oleh sistem mekanik. Untuk keluaran RTC berupa tanggal dan waktu ditampilkan di awal setelah purwarupa dihidupkan. Hal tersebut selaras dengan apa yang ditunjukkan oleh isi file JARI2.txt yang tersimpan dalam microSD seperti yang ditampilkan oleh tabel 2. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa, secara berurutan, tanggal, waktu, suhu, kelembaban, sudut putar, keluaran US-1, keluaran US-2, dan keluaran US-3. Keluaran US-1 berupa jari-jari hasil pemindaian transduser ultrasonik ke-1 yang selanjutnya disimbolkan $R1$. Keluaran US-2 berupa jari-jari hasil pemindaian transduser ultrasonik ke-2 yang selanjutnya disimbolkan $R2$. Keluaran US-3 berupa ketinggian dari posisi pengukuran yang dilakukan purwarupa yang selanjutnya disimbolkan dengan h .



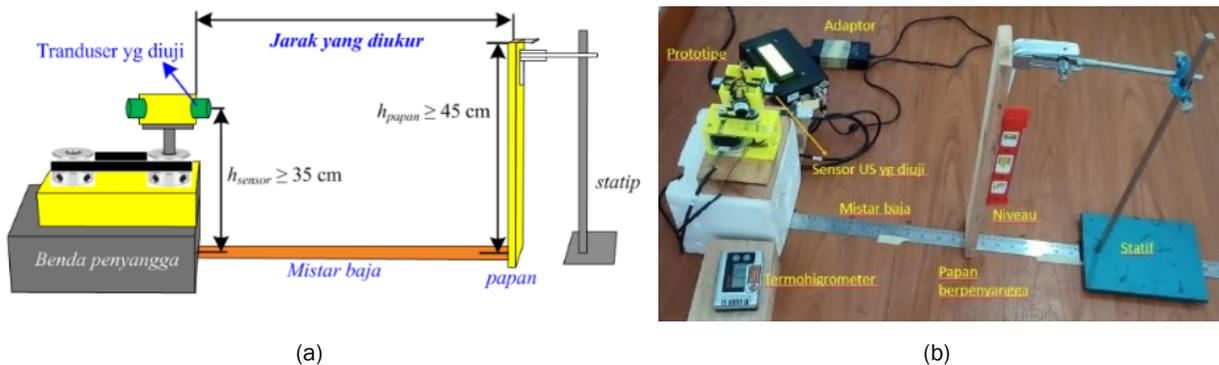
Gambar 12. Tampilan keluaran purwarupa di (a) layar LCD.

Tabel 2 Keluaran purwarupa di file JARI2.txt yang disajikan dalam tabel

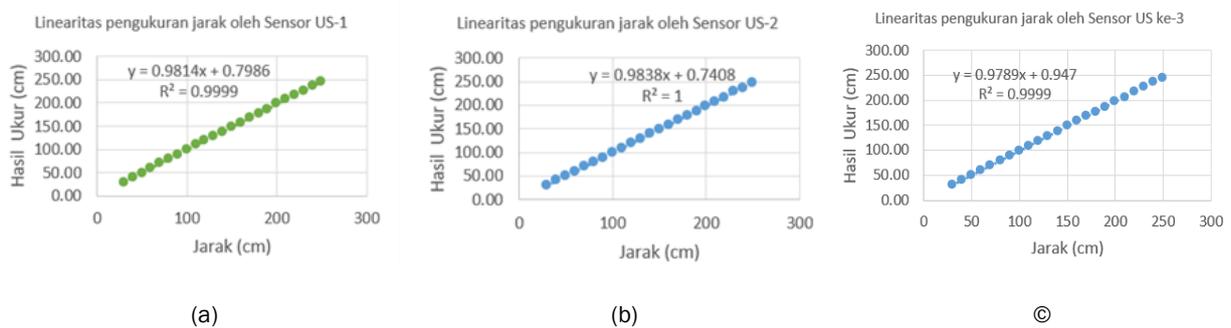
Keluaran Purwarupa di JARI2.txt							
RTC DS3231		DHT22		Sudut Putar	HRLV-Maxsonar EZ-1 (cm)		
Tanggal	Waktu	T(°C)	Kelembaban (%)	x(°)	r1(US1)	r2(US2)	h(US3)
25.04.2022	13:13:57	28,80	58,68	358,89	198,47	200,00	115,93
25.04.2022	13:13:59	28,80	58,68	360,00	186,94	199,07	103,37
25.04.2022	13:14:00	28,80	58,68	1,11	198,99	198,87	116,04
25.04.2022	13:14:01	28,80	58,68	2,22	199,09	198,77	115,32
25.04.2022	13:14:01	28,70	58,58	3,32	199,09	198,77	95,33

4.3 Hasil Uji Linieritas Pengukuran Jarak

Sebelum digunakan untuk mengukur diameter dalam tangki, purwarupa melalui uji linieritas terlebih dahulu dengan membandingkan penunjukan transduser ultrasoniknya dalam membaca jarak objek yang diukur terhadap penunjukan mistar baja dimana objek ukur berada. Mistar baja tersebut memiliki daya baca yang sama seperti pita ukur yang digunakan dalam metode *Strapping* yaitu sebesar 1 mm. Uji linieritas ini dilakukan secara bergantian terhadap ketiga transduser US-1, US-2, dan US-3. Masing-masing transduser akan dilihat hasil pengukuran jaraknya terhadap benda yang ada di depannya berupa papan. Papan yang berada di atas mistar baja tersebut akan digeser posisinya dengan kelipatan 10 cm dari posisi 30-250 cm terhadap posisi transduser. Skema uji linieritas dapat dilihat pada gambar 13(a) dan kondisi uji linieritas yang sebenarnya dapat ditunjukkan oleh gambar 13(b). Hasil uji linieritas tersebut dapat dilihat pada gambar 14. Berdasarkan gambar tersebut, linieritas penunjukan jarak oleh ketiga transduser sangat baik. Hal ini dapat dilihat dari koefisien korelasi masing-masing transduser yang lebih besar atau sama dengan 99,99%.



Gambar 13. Skema uji linieritas pengukuran jarak oleh transduser US-1, US-2, dan US-3 pada jarak 30-250 cm.

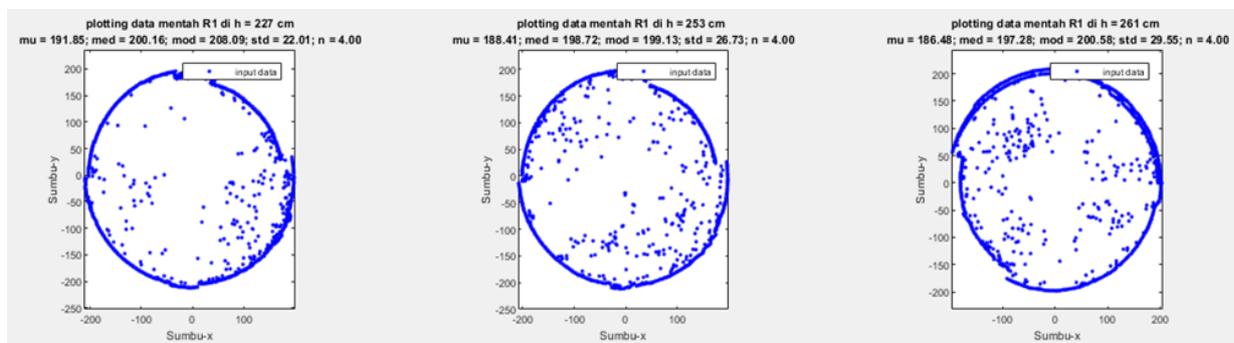


Gambar 14. Linieritas pengukuran jarak oleh transduser (a) US-1, (b) US-2, (c) US-3 pada jarak 0-250 cm.

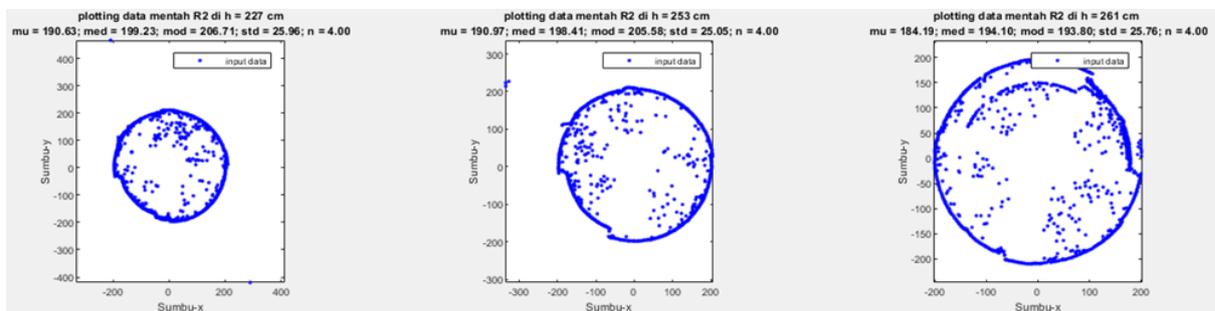
4.4 Hasil Pengukuran Diameter Dalam TUTESIT di Cincin II

Hasil pengukuran diameter dalam TUTESIT di cincin II yang dilakukan pemindaian sebanyak 4 kali putaran (*n*) atau 1300 titik pengukuran di ketinggian 227 cm, 253 cm, dan 261 cm ditampilkan dalam bentuk plot titik (*scatter plot*) dapat dilihat pada gambar 15 dan 16. Pengukuran yang dilakukan pada ketinggian 261 cm diberi

perlakuan berbeda berupa tidak adanya pengaturan kedataran dari purwarupa sedangkan pada pengukuran di ketinggian yang lain, kedataran purwarupa sangat diperhatikan dengan memperhatikan gelembung nivo tabung. Pada gambar dapat dilihat bahwa titik-titik data tidak membentuk lingkaran sempurna melainkan menunjukkan seperti $\frac{3}{4}$ lingkaran dengan terdapat $\frac{1}{4}$ bagian kurva yang lebih menjorok ke dalam. Bagian yang menjorok tersebut saling bertolak belakang antara plot data US-1 (gambar 15) dengan plot data US-2 (gambar 16). Hal ini mengafirmasi posisi pemasangan kedua buah transduser yang saling bertolak belakang. Selain itu, kurva yang lebih menjorok ke dalam mengafirmasi keberadaan benda koreksi seperti pipa (berwarna kuning) dan tangga (berwarna biru tua) yang diilustrasikan pada gambar 3.6(a). Namun demikian, plot data pada gambar 15 menunjukkan titik-titik data yang pada kondisi sebenarnya di cincin II tidak ada benda koreksi selain kedua benda tersebut. Dengan kata lain, titik-titik data ini merupakan *outlier* pada hasil pemindaian US-1 dan US-2. Hal ini dapat disebabkan karena sinyal suara pantulan yang (*echo* palsu) yang diterima oleh receiver terbaca lebih cepat yang berakibat jarak yang terhitung lebih pendek dibandingkan dengan data seharusnya seperti yang ditunjukkan oleh titik-titik data yang menyebar tidak beraturan dan berada di tengah $\frac{3}{4}$ lingkaran. Hal tersebut ditampilkan oleh semua plot titik pada gambar 15 dan gambar 16. Sebaliknya, *echo* palsu juga terjadi untuk data yang mewakili *echo* palsu yang dianggap diterima lebih lama dibandingkan yang seharusnya sehingga terdapat titik data yang terletak di luar gambar $\frac{3}{4}$ lingkaran seperti pada gambar 16(a) dan 16(b). Kedua hal tersebut, *outlier* yang ada di dalam dan di luar $\frac{3}{4}$ lingkaran, dapat terjadi akibat *noise* atau kesalahan pengukuran oleh purwarupa.



Gambar 15. Plot titik data hasil pemindaian US-1 di ketinggian (a) 227 cm, (b) 253 cm, dan (c) 261 cm.

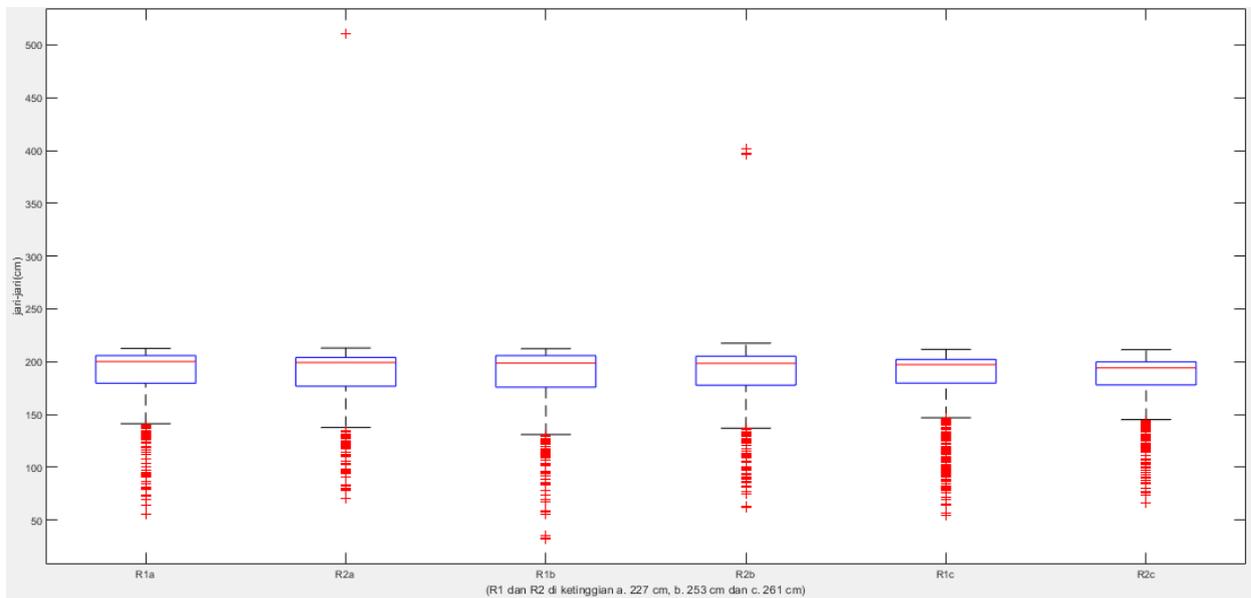


Gambar 16. Plot titik data hasil pemindaian US-2 di ketinggian (a) 227 cm, (b) 253 cm, dan (c) 261 cm.

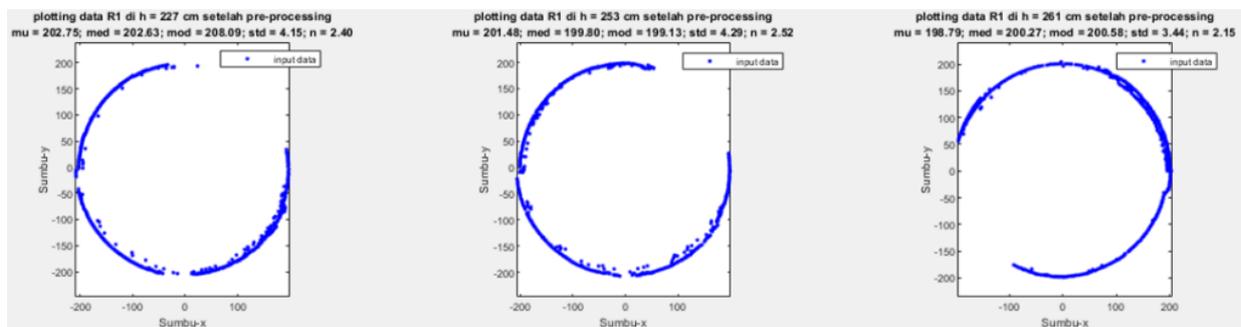
Walaupun terdapat *outlier*, secara statistik, hasil pemindaian purwarupa menunjukkan hasil yang tidak terlalu buruk. Hal ini ditunjukkan oleh tabel 3. Pada tabel tersebut, R1a, R1b, dan R1c menyatakan hasil pemindaian US-1 di ketinggian 227 cm, 253 cm, dan 261 cm secara berurutan. Hal serupa berlaku untuk R2a, R2b, dan R2c. Berdasarkan tabel tersebut, meskipun nilai rata-rata data R1 dan R2 cukup jauh dari nilai jari-jari target, 201, 83 cm, akan tetapi nilai median dan nilai modulusnya menunjukkan hal sebaliknya. Artinya, hasil pemindaian yang dilakukan masih dapat diperbaiki atau ditingkatkan akurasi dengan menghilangkan *outlier* pada data. Keberadaan *outlier* dapat dijelaskan secara statistik melalui *box plot* pada gambar 17. Pada gambar tersebut, *outlier* ditunjukkan oleh statis '+' berwarna merah, nilai median ditunjukkan oleh garis statistik pada *box plot* yang berwarna merah. Lebar *box plot* menunjukkan banyaknya data yang berkerumun di sekitar nilai median. Ekor (*whisker*) pada *box plot* tersebut menunjukkan jarak atau sebaran data terhadap titik pusat data. Semakin pendek ekor maka semakin sempit sebaran datanya. Sebaliknya, semakin panjang ekor berarti semakin besar sebaran datanya terhadap titik pusat.

Tabel 3. Data statistik hasil pemindaian US-1 dan US-2

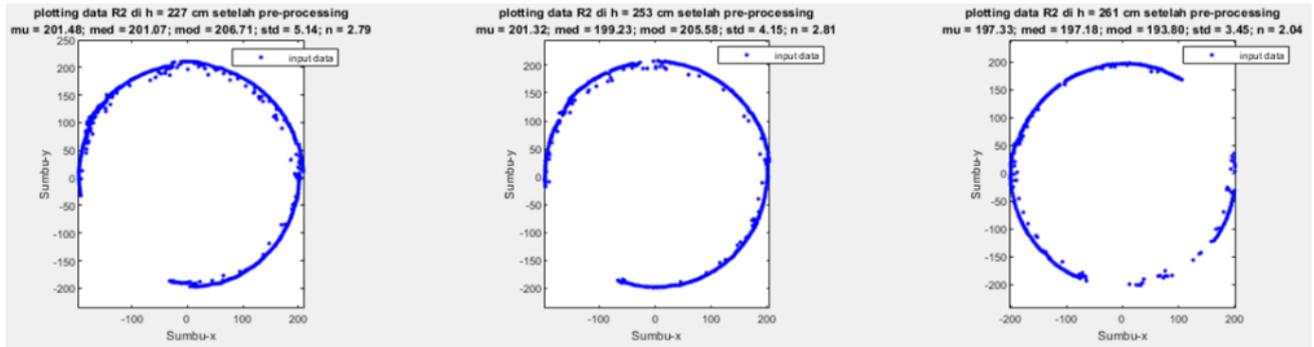
No	h (cm)	Jari-jari	Rata-rata (cm)	Median (cm)	Modus (cm)	Stdev (cm)
1	227	R1a	191,85	200,16	208,09	22,01
2		R2a	190,63	199,23	206,71	25,96
3	253	R1b	188,41	198,72	199,13	26,73
4		R2b	190,97	198,41	205,58	25,05
5	261	R1c	186,48	197,28	200,58	29,55
6		R2c	184,19	194,10	193,80	25,76



Gambar 17. Box plot data hasil pemindaian US-1 dan US-2 di ketinggian 227 cm, 253 cm, dan 261 cm.



Gambar 18. Plot titik data hasil pemindaian US-1 yang telah melalui pembersihan outlier di ketinggian (a) 227 cm, (b) 253 cm, dan (c) 261 cm.



Gambar 19. Plot titik data hasil pemindaian US-2 yang telah melalui pembersihan outlier di ketinggian (a) 227 cm, (b) 253 cm, dan (c) 261 cm

Setelah melalui proses pembersihan *outlier* dalam pemrosesan awal data (*pre-processing*), plot titik data hasil pemindaian menjadi lebih bersih dan dapat menampilkan profil penampang melintang tangki dengan lebih baik. Hasil plot dapat dilihat pada gambar 18 dan 19. Secara umum, jumlah titik data yang tersisa dari hasil pembersihan *outlier* sebanyak lebih dari 700 titik data ($n > 2$). Filter yang digunakan dalam pembersihan *outlier* adalah dengan menggunakan persamaan berikut

$$|R_i - R_{median}| < \Delta R \tag{5}$$

Batas ΔR yang digunakan adalah 16. Nilai tersebut ditentukan dengan pertimbangan bahwa agar dapat mengeliminasi *outlier* namun tidak mengurangi kejelasan profil dinding dalam tangki atau penampang melintang dalam tangki. Dengan mempertimbangkan nilai R_{target} , rentang deviasi standar dari semua data R1 dan R2 sebesar 22,01 cm – 29,55 cm dan setengah dari deviasi standar tertinggi adalah sekitar 15 cm maka dipilih nilai ΔR lebih besar satu angka dari nilai tersebut, yaitu sebesar 16 cm. Nilai ini tentunya dapat dipilih lebih kecil tergantung pada *outlier* yang dimiliki pada data yang menunjukkan hasil pemindaian purwarupa.

Secara statistik, data hasil pemrosesan awal dapat ditampilkan dalam tabel 4. Nilai rata-rata dari hasil pemindaian menjadi lebih baik secara signifikan setelah melalui pemrosesan awal dibandingkan dengan nilai median maupun nilai modus dari data hasil pemindaian. Nilai rata-rata pemindaian transducer US-1 dan US-2 menjadi lebih akurat atau mendekati nilai R_{target} . (201,83 cm). Selain itu, jarak antar data terhadap nilai rata-ratanya menjadi lebih sempit, yaitu sekitar 3,44 cm – 5,14 cm.

Tabel 4. Data statistik hasil pemindaian US-1 dan US-2 setelah melalui pemrosesan awal

No	h (cm)	Jari	Rata2 (cm)	Median (cm)	Modus (cm)	Stdev (cm)
1	227	R1a	202,72	202,63	208,09	4,15
2		R2a	201,48	201,07	206,71	5,14
3	253	R1b	201,48	199,80	199,13	4,29
4		R2b	201,32	199,23	205,58	4,15
5	261	R1c	198,79	200,27	200,58	3,44
6		R2c	197,18	197,18	193,80	3,45

Jika dibandingkan dengan nilai diameter target D_{target} , akurasi pengukuran diameter dalam oleh alat pemindai berbasis *ultrasound ranging* dapat dilihat pada tabel 5. Kesalahan pengukuran diameter hasil pemindaian di ketinggian 227 cm dan 253 cm masih di bawah $\pm 2,02$ cm atau $\pm 0,50\%$. Hal yang berbeda ditunjukkan oleh kesalahan pengukuran diameter di ketinggian 261 cm yang masih di atas 4,04 cm atau 1%, yaitu -6,07 cm atau 1,50% untuk R1 dan -9,29 cm atau 2,30% untuk R2. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedataran purwarupa saat pemindaian sangat mempengaruhi hasil pengukuran diameter dalam TUSIT.

Tabel 5. Evaluasi hasil pengukuran diameter dalam oleh alat pemindai berbasis *ultrasound ranging*

No	h (cm)	Jari	Rata2 (cm)	D _{hitung}	D _{target}	Error (cm)	%E
1	227	R1a	202.72	405.44	403.65	1.79	0.44
2		R2a	201.48	402.96	403.65	-0.69	0.17
3	253	R1b	201.48	402.96	403.65	-0.69	0.17
4		R2b	201.32	402.64	403.65	-1.01	0.25
5	261	R1c	198.79	397.58	403.65	-6.07	1.50
6		R2c	197.18	394.36	403.65	-9.29	2.30

5 Kesimpulan

Penelitian ini telah mengembangkan sistem pemindaian diameter dalam Tangki Silinder Tegak menggunakan sensor ultrasonik dan dapat digunakan dengan baik pada TUSIT berkapasitas 75 kL di cincin II. Berdasarkan hasil uji fungsionalitas, purwarupa yang dirancang dapat memberikan data hasil pengukuran jarak antara purwarupa dengan dinding dalam tangki (jari-jari) beserta data ketinggiannya. Berdasarkan hasil uji linearitas dari ketiga sensor ultrasonik yang digunakan, US-1, US-2, dan US-3, diperoleh hasil yang sangat baik, yang ditunjukkan oleh nilai koefisien korelasi yang lebih besar atau sama dengan 99,99%. Pada proses pengolahan data perhitungan diameter dalam tangki, penggunaan filter dalam tahapan pemrosesan awal berhasil mengurangi jumlah data *outlier* sehingga penunjukan nilai rata-rata jari-jari hasil pemindaian menjadi lebih akurat. Untuk uji pemindaian diameter dalam TUSIT, nilai kesalahan pengukuran diameter oleh prototipe adalah sebesar $\pm 0,5\%$ dari nilai diameter target, 403,65 cm ketika kedataran posisi purwarupa sebelum pemindaian diperhatikan sedangkan jika posisi kedataran purwarupa yang tidak diperhatikan maka kesalahan pengukuran diameternya adalah sekitar $\pm 2,3\%$.

6 Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Kementerian Perdagangan Republik Indonesia yang memberikan dukungan pendanaan penelitian ini sebagai bagian penelitian tesis pascasarjana Instrumentasi dan Kontrol, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

7 Referensi

- [1] OIML-R71, "Fixed storage tanks. General requirements," *OIML Recom.*, vol. 2008, pp. 1–32, 2008.
- [2] Dirjen PDN, SK Dirjen PDN No. 25 Tahun 2010 ttg Tangki Ukur Tetap Silinder Tegak. Kementerian Perdagangan RI, Jakarta, 2010.
- [3] Menteri Perdagangan RI, Peraturan Menteri Perdagangan Nomor 67 Tahun 2018 tentang Alat-alat Ukur, Takar, Timbang, dan Perlengkapannya yang Wajib Ditera dan Ditera Ulang, Kementerian Perdagangan RI, Jakarta, pp. 1–6, 2018.
- [4] K. Pukanská, S. Labant, K. Bartoš, J. Gašinec, and J. Zuzik, "Determination of deformation of high-capacity tank using terrestrial laser scanning," *Acta Montan. Slovaca*, vol. 19, no. 1, pp. 41–46, 2014.
- [5] K. Burak, V. Kovtun, and M. Nychvyd, "Building 3D surfaces of land storage vertical cylindrical steel tank using bicubic spline interpolation," *Geod. Cartogr.*, vol. 45, no. 2, pp. 85–91, 2019, doi: 10.3846/gac.2019.6301.
- [6] O. O. Agboola, P. P. Ikubanni, R. A. Ibikunle, A. A. Adediran, and B. T. Ogunsemi, "Generation of Calibration Charts for Horizontal Petroleum Storage Tanks Using Microsoft Excel," *Mapan - J. Metrol. Soc. India*, vol. 32, no. 4, pp. 321–327, 2017, doi: 10.1007/s12647-017-0224-6.
- [7] Almega Sejahtera, "Jangan Abaikan Kalibrasi Tangki Anda." pp. 1–11, 2019, [Online]. Available: <https://almeگانews.wordpress.com/2019/09/20/jangan-abaikan-kalibrasi-tangki-anda/>. [Accessed March 14, 2021]
- [8] C.R.Kennedy, "Leica HDS ScanStation P40 Laser Scanner LEICA HDS SCANSTATION P40 LASER SCANNER," 2021. <https://survey.crkennedy.com.au/products/lg6009377/leica-hds-scanstation-p40-laser-scanner> [Accessed Mar. 03, 2021].
- [9] M. Elsayed, M. T. Soe, W. W. Kit, and H. Abdalla, "An innovative approach to developing a 3D virtual map creator using an ultrasonic sensor array," *Int. J. Technol.*, vol. 10, no. 7, pp. 1344–1354, 2019, doi: 10.14716/ijtech.v10i7.3245.
- [10] S. F. Ahmad, A. H. Kamal, and I. Mobin, "Ultrasonic Sensor Based 3D Mapping & Localization," *Int. J.*

- Comput. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 140–151, 2016.
- [11] K. Nakajima, C. Premachandra, and K. Kato, “3D environment mapping and self-position estimation by a small flying robot mounted with a movable ultrasonic range sensor,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 289–298, 2017, doi: 10.1016/j.jesit.2017.01.007.
- [12] F. T. Moreno-Ortiz, E. Castillo-Castañeda, and A. Hernández-Zavala, “Detección y localización de superficies en un ambiente 3d a través de un solo sensor y casquetes esféricos ultrasónicos,” *Ing. e Investig.*, vol. 37, no. 3, pp. 37–44, 2017, doi: 10.15446/ing.investig.v37n3.59508.
- [13] W. Sutanto, S. Hadisupadmo, R. Widyasti, and A. Salsabiila, “Prototipe Alat Ukur Luas Lingkaran Dalam Silinder Tegak Menggunakan Sensor Ultrasonik (2020).pdf,” *J. Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 12, pp. 19–28, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.5614%2Fjoki.2020.12.1.3>.
- [14] American Petroleum Institute, “Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 2-Tank Calibration,” no. February. 2003.
- [15] www.maxbotix.com, “HRLV-MaxSonar-EZ™ Series.” pp. 1–17, 2014. [Online]. Available: https://www.maxbotix.com/documents/HRLV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf. [Accessed December 14, 2021].
- [16] O. O. Agboola, B. O. Akinnuli, M. A. Akintunde, P. P. Ikubanni, and A. A. Adeleke, “Comparative Analysis of Manual Strapping Method (MSM) and Electro-Optical Distance Ranging (EODR) Method of Tank Calibration,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1378, no. 2, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1378/2/022062.
- [17] V. Firmansyah, P. Nugroho, H. Yienda Prihensa, and A. Muslim, “Comparison Study of Vertical Cylinder Tank Diameter Measurement Between Strapping and Optical Method,” *Spektra J. Fis. dan Apl.*, vol. 5, no. 3, pp. 231–238, 2020, doi: 10.21009/spektra.053.07.
- [18] V. Knyva, M. Knyva, and J. Rainys, “New Approach to Calibration of Vertical Fuel Tanks,” *Electron. Electr. Eng.*, vol. 19, no. 8, pp. 37–40, 2013, doi: 10.5755/j01.eee.19.8.5391.
- [19] H. Huadong, L. Xuemin, C. Xianlei, S. Haolei, and Y. Pengju, “The automatic measurement system of large vertical storage tank volume based on 3D laser scanning principle,” *ICEMI 2017 - Proc. IEEE 13th Int. Conf. Electron. Meas. Instruments*, vol. 2018-Janua, pp. 211–216, 2017, doi: 10.1109/ICEMI.2017.8265768.