

## **TINJAUAN SISTEMATIS: TRANSFORMASI PELAYANAN METROLOGI DI ERA DIGITAL (METROLOGI DIGITAL 4.0)**

Penny Chariti Lumbanraja<sup>1</sup>, Pretty Luci Lumbanraja<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) Dinas Koperasi, Perdagangan dan Perindustrian Kabupaten Asahan

<sup>2</sup>) PT. Riset Perkebunan Nusantara Kota Bogor

\*Corresponding author

Email : [pennycharitylumbanraja@gmail.com](mailto:pennycharitylumbanraja@gmail.com)

### **Abstrak**

Pelayanan metrologi legal sangat penting untuk menjawab kebutuhan dalam menjamin keadilan kegiatan perdagangan, khususnya saat proses penimbangan dan pengukuran. Metrologi sebagai elemen penting dalam perdagangan juga harus menghadapi tantangan dalam mengadaptasi perubahan zaman. Penerapan pelayanan metrologi legal pada kegiatan transaksi perdagangan ditujukan untuk perlindungan setiap hak warga negara secara keseluruhan baik bertindak sebagai pelaku usaha maupun konsumen. Transformasi yang berkembang dengan cepat mengubah kehidupan masyarakat, industri dan ekonomi. Transformasi pelayanan metrologi di era digital tentu membutuhkan proses yang panjang. Dalam memecahkan masalah ini, pengembangan infrastruktur kualitas pada metrologi digital merupakan hal yang penting. Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini ialah tinjauan sistematis literatur (*systematical literature review*). Dari hasil tinjauan yang dilakukan pada beberapa penelitian didapatkan bahwa fokus transformasi metrologi ialah dalam hal perbaikan infrastruktur kualitas untuk pembentukan dan pengembangan *metrology cloud* sehingga memberikan manfaat ekonomi dan menciptakan kepercayaan digital terhadap pengukuran. Tujuan pentingnya perbaikan kualitas infrastruktur dalam digitalisasi metrologi untuk memperkuat tiga pilar utama yaitu layanan metrologi, akreditasi dan standarisasi.

Kata Kunci: digitalisasi, metrologi, infrastruktur kualitas

### **Abstract**

Legal metrology services are very important to answer the need to ensure fairness in trading activities, especially during the weighing and measuring process. Metrology as an important element in trade must also face challenges in adapting to changing times. The application of legal metrology services in trade transaction activities is aimed at protecting every citizen's rights as a whole, whether acting as a business actor or consumer. The rapidly developing transformation is changing society, industry and the economy. Transforming metrology services in the digital era certainly requires a long process. In solving this problem, developing quality digital metrology infrastructure is important. The data analysis technique used in this research is a systematic literature review. From the results of reviews conducted in several studies, it was found that the focus of metrology transformation is on improving the quality of infrastructure for the establishment and development of metrology clouds so as to provide economic benefits and create digital confidence in measurements. The important aim of improving infrastructure quality in digitalization of metrology is to strengthen the three main pillars, namely metrology services, accreditation and standardization.

Keywords: digitalization, metrology, quality infrastructure

## PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang kian konstan menuntut perubahan sistem yang serba masif, termasuk layanan publik di bidang metrologi. Perkembangan konsep Industri 4.0 pada akhirnya menanamkan tantangan dan penguatan pada kerangka metrologi. Metrologi adalah suatu bidang yang melakukan evaluasi secara eksperimental dan teoritis untuk mengetahui adanya ketidakpastian dalam pengukuran di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi. Ada tiga jenis metrologi yang perlu dibedakan yaitu, metrologi ilmiah yang berhubungan dengan pengukuran standar, metrologi industri yang berhubungan dengan pengukuran dalam industri dan berurusan dengan metrologi legal guna perlindungan pelaku usaha dan konsumen ketika adanya kegiatan transaksi perdagangan dengan penggunaan alat ukur.

Oleh sebab itu, diperlukan pemikiran ulang mengenai hal tersebut yaitu fenomena pengukuran yang fleksibel dengan menyinkronkan Industri 4.0 bersamaan dengan Metrologi 4.0. Tujuan utama Industri 4.0 ialah untuk memaksimalkan efisiensi dan meningkatkan kualitas. Tentu tidak berbeda dengan Revolusi Industri 4.0, metrologi legal juga turut mengadopsi sistem teknologi untuk mengoptimalkan pengambilan keputusan di bidang pengukuran, meningkatkan kualitas layanan, kustomisasi massal dan efisiensi biaya. Ada keperluan sangat besar dari metrologi digital yang diterapkan untuk kebutuhan industri futuristik.

Metrologi selalu menjadi sorotan dalam sistem metode kerjanya, mulai dari instrumen pengukuran (elektronik dan mekanik) yang terlebih dahulu harus dikalibrasi dengan benar, biaya penelusuran hingga sumber daya manusia yang memiliki bidang keahlian ilmu metrologi. Seorang profesional harus mampu memastikan standar dan keandalan dari kalibrasi alat ukur. Sejauh ini beragam sistem itu masih berjalan secara konvensional, tetapi tidak menjamin banyak alat ukur dapat diuji secara menyeluruh, mengingat adanya keterbatasan di luar toleransi (R. S, 2015).

Lahirnya revolusi industri 4.0 seiring dengan adanya pengembangan sensor menjadi kekuatan untuk menciptakan inovasi yang mengarah pada kemudahan mengakses tanpa khawatir adanya keterbatasan jarak, tempat, hingga mesin operasi (Mustapää et al., 2020). Menyoroti pentingnya untuk segera mengkloning sistem kecerdasan buatan, konsep IoT (*Internet of Things*), otomasi industri akan mempermudah layanan di bidang metrologi. Oleh karena itu, sebuah organisasi tidak khawatir lagi adanya keterbatasan instrumen standar kerja dan sumber daya yang profesional (Mustapää et al., 2020).

Adapun yang menjadi tujuan penelitian ini ialah meninjau secara sistematis bagaimana deskripsi keadaan Metrologi 4.0 yang harus dipersiapkan, mulai dari prosedur kalibrasinya, memanfaatkan teknologi hingga bentuk luaran sertifikat kalibrasi tanpa menghilangkan keandalan, jaminan serta keamanan data proses pengukuran. Beberapa negara maju seperti Eropa melibatkan IoT dalam Revolusi Industri 4.0 sebagai penghubung antara dunia maya dengan dunia nyata. Transformasi digital yang telah diterapkan di sana ialah IoT, sistem tertanam, sistem *Cloud*, serta menjaga penyimpanan dan keamanan datanya (Thiel et al., 2017). Dalam bayangan Eropa, melibatkan sistem *Cloud* pada bidang metrologi ialah untuk proses penilaian kesesuaian dan pengawasan di pasar. Sehingga sistem tersebut akan memainkan perannya dalam mendorong digitalisasi pasar yang lebih terkoordinir (Thiel et al., 2017). Untuk berfungsi dengan baik, sistem digital memerlukan representasi logis dari ide-ide yang ada di dunia nyata. Untuk mengatasi kesulitan representasi, peneliti memberikan penjelasan singkat tentang interpretasinya dari konsep dan hubungan antara besaran, dimensi dan satuan. Penulis menyarankan untuk mendukung jumlah dan unit dengan data tambahan tanpa mengubah data pengguna secara signifikan tentang persepsi unit.

Hasil dari penerapan teknik komputasi lunak di India seperti penambahan data dapat mempermudah ketika proses pengawasan atau investigasi berlangsung. Data diperoleh dari sumber yang akurat seperti pengalaman dari produsen (instrumen), dari pengawasan

pasar dan dari database itu sendiri menyediakan sistem andal yang dapat menilai risiko antara desain dan pasar. Penggunaan sistem *cloud* menyediakan akses data secara transparan yang bisa digunakan untuk semua pemangku kepentingan. Jadi, itu penggunaan *cloud* tersebut akan memperkuat pembangunan infrastruktur kualitas yang berdampak pada kegiatan metrologi legal (Thiel et al., 2017). Hal ini menjalankan kerangka hukum untuk melindungi kepentingan warga negara dengan melindungi konsumen dan pengguna alat ukur. Selain itu, pembentukan *cloud* juga dapat membuka lebih banyak peluang bisnis dan akan merangsang penelitian serta inovasi teknologi berbasis data.

Harapannya, melibatkan sistem digital dalam pelayanan metrologi akan sangat diperlukan untuk mendongkrak kualitas pertumbuhan industri di tanah air seperti produk yang berstandar, inovasi pasar, pertumbuhan ekonomi, hingga pengawasan yang merata. Selama ini, banyaknya keterbatasan termasuk perangkat maupun fasilitas infrastruktur lainnya yang membuat layanan metrologi tidak bergerak secara menyeluruh hingga ke pelosok daerah. Sementara, menjaga kebenaran alat ukur yang digunakan untuk bertransaksi merupakan suatu keharusan disebabkan kesesuaian antara pengorbanan masyarakat dengan jumlah ialah haknya para konsumen. Ketidakmerataan layanan metrologi legal di era digital ini yang membuat sebuah inovasi harus segera dicapai agar layanan ke segala publik dapat berjalan secara paripurna. Penerapan sistem digital akan mempengaruhi kualitas infrastrukturnya dalam hal ini mencakup layanan metrologi, standarisasi hingga akreditasi organisasi tersebut (Mustapää et al., 2020).

Mengingat di Indonesia sendiri di waktu yang mendatang di mana generasi bertalenta digital akan selalu dinanti-nantikan. Kolaborasi digitalisasi infrastruktur dan teknologi metrologi akan bersamaan menciptakan peluang tenaga kerja yang besar, khususnya ahli di bidang teknis dan IT. Keduanya ini akan menjadi persyaratan utama untuk membangun infrastruktur pengukuran berbasis digital (Thiel et al., 2017).

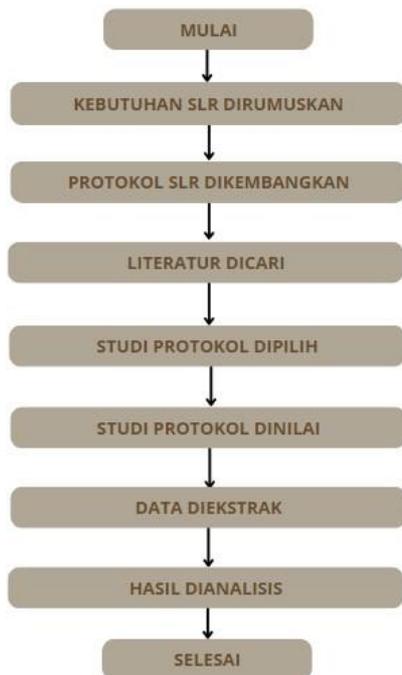
Transformasi digital bidang metrologi adalah bagian penting dari infrastruktur negara dan perekonomian yang berkualitas, dan OIML membantu proses ini. Di dalamnya, OIML dan BIPM berkolaborasi untuk membentuk kelompok tugas baru pada tahun 2020. Kelompok ini memiliki rencana tindakan untuk mendorong transformasi metrologi digital (Xiong et al., 2021).

## **METODOLOGI**

### **Metode Tinjauan**

Tinjauan sistematis atau SLR (*Systematical Literature Review*) merupakan sebuah studi dengan mengumpulkan semua bukti pendukung untuk menjawab pertanyaan suatu penelitian berdasarkan topik tertentu (R. S., 2015). Dalam hal ini, tinjauan sistematis mengkaji literatur tentang transformasi pelayanan metrologi di era digital yang saat ini tengah berkembang. SLR dilakukan pada tiga tahapan yaitu: merencanakan, melaksanakan dan melaporkan tinjauan pustakanya. Adapun yang menjadi langkah-langkah tinjauan sistematis ialah merumuskan pertanyaan dalam penelitian (pengidentifikasi). Tujuannya ialah untuk menampilkan karya tinjauan yang telah dikaji pada pendahuluan (R. S., 2015).

Pada Gambar 1 menunjukkan langkah-langkah sistematikal tinjauan literatur. SLR dilakukan dalam tiga tahap, yaitu: merencanakan, melaksanakan dan melaporkan tinjauan literatur. Protokol penelitian menjelaskan rincian proses dalam mempelajari masalah transformasi metrologi yang mulai diadaptasi dengan perkembangan digital.



Gambar 1. Langkah Sistematis Tinjauan Literatur

Di dalam langkah protokol penelitian bertujuan mengarahkan pelaksanaan peninjauan dan meminimalisir kemungkinan terjadinya bias di dalam penelitian. Hal yang dilakukan dalam mengembangkan protokol tinjauan sistematis ialah dengan merincikan spesifikasi tentang metode dan proses yang akan digunakan, desain studi, menjelaskan ekstraksi data dari studi individu dan menganalisis hal-hal yang akan dilakukan.

**Pertanyaan Penelitian**

Pertanyaan penelitian dibangun untuk menjaga agar tinjauan tetap terfokus. Pertanyaan yang dibangun harus membahas 5 elemen dasar yang dikenal sebagai PICOC. Adapun PICOC merupakan kriteria SLR yang terdiri atas *Populations, Intervention, Comparison, Outcomes and Context* (R. S, 2015).

Tabel 1. Ringkasan PICOC

Populasi	Perdagangan
Intervensi	Transformasi pelayanan metrologi pada sistem perdagangan
Perbandingan	Tidak ada [1],[5]

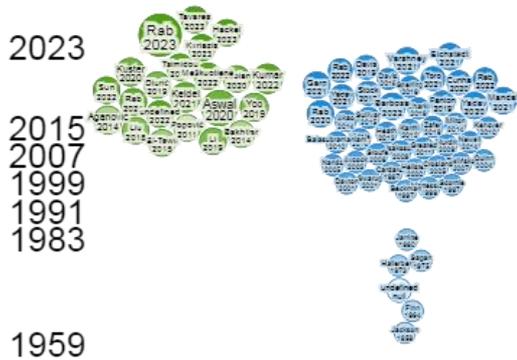
Hasil	Prediksi adaptasi sistem yang sesuai
Konteks	Studi di industri dan praktisi

Pertanyaan tinjauan yang ditunjukkan ialah

1. Jurnal mana yang paling banyak secara signifikan membahas transformasi pelayanan metrologi di era digital?
2. Siapa yang paling aktif dan penelitian mana yang paling berpengaruh dalam membahas transformasi pelayanan metrologi di era digital?
3. Metode seperti apa yang digunakan untuk membahas transformasi pelayanan metrologi di era digital?
4. Metode seperti apa yang memberikan kinerja terbaik untuk transformasi pelayanan metrologi di era digital?
5. Metode seperti apa yang diusulkan untuk transformasi pelayanan metrologi di era digital?

**Strategi Pencarian**

Sebelum memulai pencarian, kumpulan database yang sesuai harus dipilih untuk meningkatkan kemungkinan menemukan artikel yang sangat relevan (Barbosa et al., 2022). Proses pencarian penelitian terdiri atas beberapa rangkaian kegiatan, yaitu memilih perpustakaan digital nasional/internasional, mendefinisikan jenis rangkaian pencarian, mencari studi dasar yang relevan, memilih studi dasar yang sesuai dengan rangkaian pencarian dan membuat daftar studi dasar dari perpustakaan digital yang sesuai dengan rangkaian pencarian [4]. Adapun basis data perpustakaan digital sebagai tempat pencarian studi ialah *Science Direct* (<https://www.sciencedirect.com/>), *Library Genesis* (<https://libgen.is/>), dan *researchrabbitapp.com*.



Gambar 2.  
Tampilan *Timeline* Penelitian Terdahulu

Gambar 2 menunjukkan tampilan *timeline* penelitian terdahulu sesuai dengan kata kunci penelitian. Dalam hal ini rangkaian pencarian ialah berkaitan dengan gagasan pokok tinjauan/penelitian ini yaitu transformasi metrologi. Rangkaian pencarian ini disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan spesifik dari setiap basis data. Pencarian dibatasi mulai tahun publikasi 2015-2023. Jenis publikasi yang digunakan ialah jurnal dan artikel penelitian lainnya yang berkaitan dengan rangkaian pencarian.

### Seleksi Studi

Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk memilih studi dasar yang relevan. Subjek penelitian dikatakan harus memenuhi kriteria inklusi, biasanya mencakup karakteristik seperti demografis dan geografis serta periode waktu yang ditentukan. Kriteria eksklusi, yang juga dikenal sebagai kriteria penolakan, adalah keadaan di mana subjek yang memenuhi kriteria inklusi tidak dapat diterima untuk berpartisipasi dalam penelitian. Kriteria eksklusi bukanlah kebalikan dari kriteria inklusi (*Buku\_Panduan Manajemen Penelitian Kuantitatif*, n.d.). Kriteria tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria	Keputusan
1. Studi di bidang praktisi dan industri skala besar dan kecil	Inklusi
2. Studi membahas dan membandingkan pencapaian negara dalam program transformasi pelayanan metrologi di era digital	Inklusi
3. Tinjauan sistematis	Inklusi
4. Jurnal internasional dan nasional	Inklusi
5. Tidak menggunakan media sosial	Eksklusi
6. Pengecualian studi yang diterbitkan sebelum 2015	Eksklusi

Menurut (Mengist et al., 2020), adanya penerapan kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat diperlukan untuk mempersempit hasil sehingga menjadikan makalah yang paling relevan untuk mencapai tujuan dari tinjauan sistematis ini.

### Penilaian Kualitas Studi

Menilai kualitas studi berarti mengevaluasi kualitas metodologis dari artikel/jurnal pilihan. Penilaian kualitas studi digunakan untuk menentukan kekuatan kesimpulan studi yang akan diuraikan.

### Ekstrak data

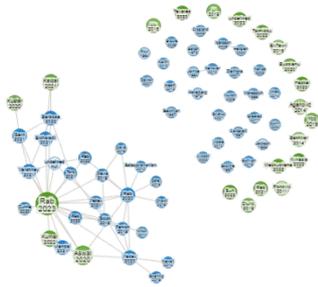
Studi utama yang dipilih diekstraksi untuk mengumpulkan data yang berkontribusi untuk menjawab pertanyaan penelitian yang terdapat dalam ulasan ini (R. S, 2015). Ekstrak/sintesis data bertujuan mengumpulkan bukti dari studi yang dipilih untuk menjawab pertanyaan penelitian. Pada tahapan ini dilakukan pengelompokan data penting yang diperoleh dari studi-studi terpilih untuk diambil sebagai jawaban pertanyaan (R. S, 2015).

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### •Jurnal (Publikasi) Yang Signifikan

Dalam tinjauan literatur ini, terdapat 50 artikel dari 720 artikel yang dicari berdasarkan kata

kunci yang sesuai pada situs *researchrabbitapp.com* (ditunjukkan pada Gambar 3). Sebanyak 21 artikel yang dijadikan ulasan, dinilai dari hasil penelitian, jangkauan luas, sudut pandang yang mengkaji tentang transformasi layanan metrologi di era digital. Karena fokus tinjauan ini adalah pada sektor perdagangan, maka fokus rangkaian pencarian ialah hanya pada sektor tersebut.



Gambar 3.  
Tampilan Network Penelitian Terdahulu

- Penelitian Yang Paling Aktif dan Berpengaruh

Dalam studi tinjauan literatur ini, penelitian yang berkontribusi dalam upaya menggagas transformasi metrologi di era digital yang tentu berdampak pada kualitas pengukuran digital yaitu dilakukan oleh peneliti FG Toro, Eichstadt, Keidel dan beberapa peneliti lainnya.

- Topik Penelitian di Bidang Digitalisasi Metrologi

Hampir semua aspek kehidupan telah diubah oleh teknologi digital, termasuk aktivitas pengukuran dalam komunitas metrologi. Selain itu, hampir tidak ada aktivitas di dunia saat ini yang tidak melibatkan pengukuran atau metrologi. Oleh karena itu, penting untuk meningkatkan kesadaran tentang peran teknologi digital dalam bidang metrologi, pengembangannya, dan cara menghadapi masalah metrologi di era digital. Dengan demikian, diharapkan dapat meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan kualitas hidup mereka.

Di Indonesia, dua lembaga teknis—Kementerian Perdagangan dan Badan Standardisasi Nasional—bertanggung jawab atas pengelolaan metrologi. Lembaga-

lembaga ini memiliki lingkup dan wewenang yang berbeda. Tetapi keduanya memiliki tujuan yang sama: memastikan bahwa semua pengukuran di Indonesia disesuaikan dengan standar internasional (SI).

Sejak redefinisi SI pada tahun 2019, komunitas metrologi mulai menentukan bagaimana metrologi akan berkembang di waktu yang mendatang. Penelitian (F. G., Toro & H., 2021) menuliskan bahwa dibutuhkan potensi inovasi dan pembaruan signifikan pada sistem pelayanan metrologi. Di dalam penelitiannya mengkaji bagaimana digitalisasi metrologi mempengaruhi layanan metrologi saat ini hingga masa depan, apa saja yang diperlukan dalam digitalisasi metrologi dan bagaimana perkembangan metrologi digital. Menurut lembaga metrologi nasional di beberapa negara berbeda, pembaharuan metrologi dimaksud pada fokus ilmu data, layanan metrologi yang baru serta inovasi teknologi. Dua lembaga metrologi disebut NMI (*National Metrology Institute*) di Eropa yaitu NPL (*National Physical Laboratory*) dan PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) mengorganisir upaya penelitian dan pengembangan kerangka kerja yang membaca potensi digitalisasi metrologi di masa depan.

NPL terutama berfokus pada analisis data dan pendekatan pemberdayaan kualitas data. Dalam misinya itu, NPL menyematkan data pengukuran ke dalam infrastruktur digital terpercaya yang akan mendukung rantai penelusuran di masa depan. Strategi digitalisasi NPL dipersiapkan untuk memperbaharui layanan metrologi saat ini dengan memperhatikan penilaian kualitas data yang dapat diterapkan secara efektif dalam berbagai situasi seperti meningkatkan reprodutifitas dalam data sains. Di dalam strategi ini, NPL membutuhkan kesepakatan dari keseluruhan yang tidak hanya di tingkat nasional tetapi hingga internasional tentang prosedur penilaian kualitas data berbasis metrik yang akan digunakan untuk menciptakan kepercayaan digital. Berbagai sinergi antar institusi metrologi lain berkolaborasi agar memastikan setiap layanan metrologi baru

tidak hanya dipahami, tetapi secara signifikan dapat diakui institusi lain.

Didukung penelitian (Xiong et al., 2021), NIM mendirikan "Pusat Data Ilmiah Metrologi" dan sebuah kelompok kerja digitalisasi yang bekerja secara intensif pada *Metrology for Digital Transformation (M4DT)*. M4DT berpartisipasi dalam proyek SmartCom, NIM, strategi transformasi PTB berbasis digital dan pedoman DCC dengan memilah tujuan dan prinsip transformasi digital secara komprehensif. Penelitian ini mengusulkan kerangka kerja digital untuk informasi metrologi, yang memberikan opsi bagi NMI untuk menerapkan transformasi digital. Tujuan M4DT adalah untuk menjamin bahwa nilai-nilai pengukuran data serta algoritma dapat digabungkan dan ditemukan di dunia digital dengan cara yang sehat. Untuk dapat mencapai tujuan tersebut, perlu diperhatikan bahwa mesin-mesin yang terlibat dalam pengukuran, seperti standar metrologi, alat ukur, komputer, *cloud*, dll., memiliki kemampuan untuk membaca dan memahami informasi metrologi. Selain itu, mesin-mesin ini memiliki kemampuan untuk melakukan operasi secara mandiri berdasarkan informasi yang dikumpulkan.

Penelitian (F. G., Toro & H., 2021) menjelaskan pendekatan PTB terhadap digitalisasi metrologi ialah untuk menciptakan transformasi layanan metrologi berbasis digital (sistem virtual), menciptakan metrologi baru dengan fokus pada kualitas data dan sistem komunikasi. Di dalam penelitian dan pengembangannya, PTB melakukan perampingan infrastruktur kualitas yang disebut *Quality Infrastructure (QI)* dengan menggunakan sistem *Metrology Cloud*. Tujuannya ialah untuk memusatkan layanan metrologi baru (layanan metrologi legal) sembari mempromosikan inovasi dari sektor swasta. Adanya pembaruan digitalisasi metrologi ialah dengan memperbaharui sistem layanan dengan membuat alur kerja digital. Strategi digitalisasi ini menghadirkan pendekatan yang lebih inklusif, dan pengembangan sertifikat kalibrasi digital (*digitalization of calibration data/reports/certificates* disingkat DCCs). Hasil kalibrasi telah dicatat dalam sertifikat kalibrasi yang sudah ada, yang biasanya dicetak

sebagai dokumen kertas atau *file PDF*. Oleh karena itu, menafsirkan data dalam sistem manajemen kalibrasi atau sistem serupa lainnya masih menggunakan cara yang manual. Tugas pembuatan sertifikat kalibrasi sebagian besar masih belum tersedia dalam format yang dapat dibaca oleh mesin. Jadi langkah awal dalam digitalisasi pelayanan metrologi adalah mendefinisikan dan mengembangkan format presentasi digital yang dapat dibaca oleh mesin informasi kalibrasi, yaitu DCC (Barbosa et al., 2022). Strategi PTB dalam memperbaiki infrastruktur kualitas untuk membuat komunitas metrologi lainnya berpartisipasi dalam pendekatan terpusat serta holistik yang berfokus pada kebutuhan pasar Jerman.

Di dalam penelitian (N., G., S., R., 2021) menuliskan hal yang dilakukan Institut Metrologi Federal (METAS) selama beberapa tahun terakhir ialah menciptakan, mengembangkan dan menerapkan pendekatan baru, alat baru dan layanan baru untuk menjadikan METAS sebagai aktor terkemuka dalam menciptakan metrologi digital. Bagi METAS, digitalisasi metrologi ialah menciptakan paradigma untuk mendatangkan teknologi inovatif dari berbagai bidang sekaligus memperbaharui pelayanan metrologi di laboratorium METAS. Proyek pembaharuannya yang dilakukan adalah meneliti dan mengembangkan alat baru, layanan metrologi baru, analisis data, simulasi dan pemodelan, bahkan menafsir ulang arti perangkat yang sedang diuji dalam metrologi digital (jaringan sensor). Pendekatan dinamis yang menjadi strategi digitalisasi METAS ialah sistem pengukuran yang inovatif berarti terdesentralisasi dan sistem pengukuran berjejaring dengan satu atau beberapa sensor. Strategi kedua ialah menciptakan layanan metrologi digital dengan merampingkan kebutuhan laboratorium/pelanggan menjadi produk baru yang disempurnakan (DCCs) dan/atau prosedur baru yang inovatif. Tujuan pendekatan METAS menuju digitalisasi metrologi yaitu untuk membangun masa depan metrologi jangka panjang yang jelas, berfokus pada pembaruan penciptaan layanan metrologi yang gesit.

Sebagai tambahan pada penelitian [8] dijelaskan titik awal untuk mendefinisikan strategi digitalisasi METAS adalah daftar

peluang penelitian dan pengembangan, ditentukan oleh dua bidang yang menjadi analisis tren digital, yaitu:

- a) Topik Litbang "Digitalisasi untuk metrologi":
- Fitur integritas, ketersediaan dan kerahasiaan data pengukuran dari sistem jaringan;
  - Digitalisasi data/laporan/sertifikat kalibrasi (melalui DCC);
  - Manajemen Data Penelitian (*Research Data Management - RDM*) menuju pembuatan keputusan berbasis data dalam pelayanan metrologi.
- b) Topik Litbang "Metrologi untuk digitalisasi":
- Analisis data dalam jumlah besar (misalnya teknik penelitian kuantitatif);
  - Perangkat simulasi dan pengukuran virtual (misalnya sertifikasi dan verifikasi sistem pengukuran oleh sarana data umum dan Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligent - AI*)/Mesin pemodelan pembelajaran (*Machine Learning - ML*));
  - Keandalan dan interpretabilitas algoritma AI dan hasil berbasis ML;
  - Layanan Kalibrasi dan Sertifikasi untuk Industri 4.0.

Penelitian (N., G., S., R., 2021) menjelaskan untuk meningkatkan pertumbuhan industri dan ekonomi, pengukuran secara hukum sangat dibutuhkan. Berdasarkan studi yang dilakukan, Garg memperkirakan bahwa 4-6 persen bagian dari PDB Eropa atau setara dengan 660-990 Miliar Euro per tahun dicapai karena alasan pengukuran yang relevan secara hukum. Oleh sebab itu, upaya koordinasi antar institusi metrologi di India seperti Biro Standar India (*Bureau of Indian Standards/ BIS*), *Quality Council of India (QCI)*, *National Accreditation Board of Testing and Calibration Laboratories (NABL)* untuk pembentukan infrastruktur metrologi digital berkualitas di India karena berkontribusi terhadap PDB India. Adapun strategi dimulai dengan pengembangan infrastruktur berkualitas pada metrologi digital, serupa dengan yang dilakukan di Institut Metrologi Nasional Jerman (PTB). Konsep *metrology cloud* diusulkan sebagai *platform* inti metrologi di setiap negara. *Metrology cloud* dirancang untuk mendukung dan merampingkan proses regulasi dengan menggabungkan infrastruktur yang ada serta

*database*, dan menyediakan satu titik kontak pada semua pemangku kepentingan.

Adapun tujuan utamanya ialah untuk memperkuat posisi Eropa dalam inovasi berbasis data, meningkatkan kohesi daya saing dan membantu menciptakan pasar tunggal berbasis digital di Eropa. Upaya ini juga harus dilakukan pada perspektif India untuk mendukung produsen, industri serta semua pemangku kepentingan. Transformasi semacam ini ialah kerangka digital berbasis IoT, *metrology cloud*, data berbasis digital sehingga dapat memberikan manfaat ekonomi dengan menerapkan layanan komputasi berbasis *cloud*. Pembentukan kerangka kerja infrastruktur digital berkualitas berbasis IT yang canggih akan berguna demi melindungi kepentingan bersama warga negara.

Peneliti (Eichstadt & Tesch, 2021) memaparkan bahwa konsep dan metodologi untuk transformasi digital dari pelayanan metrologi ialah membentuk infrastruktur kualitas yang dapat dioperasikan secara digital. Proses dan alur kerja di QI didasarkan pada dokumen yaitu sertifikat dan standar. Berarti alat ukur di bawah peraturan hukum (alat timbangan yang ada di pasar atau *supermarket*) harus memiliki kebenaran penilaian dan otoritas verifikasi yang sah sesuai persetujuan. Kelak, di masa depan badan standarisasi bekerja agar dapat dibaca oleh mesin serta kecerdasan buatan. Mesin akan membaca informasi tanpa campur tangan manusia dan tanpa mengetahui jumlah standar secara pasti. Pelayanan metrologi, laboratorium verifikasi, kalibrasi dan pengujian telah memulai pengembangan sertifikat digital yang dapat dibaca oleh mesin. Hal ini akan memberi dampak terciptanya transparansi dimana informasi dan data yang terdapat pada sertifikat akan terintegrasi langsung pada infrastruktur digital. Transformasi digital dengan proses QI membutuhkan keamanan dan infrastruktur yang handal, yaitu *Metrology Cloud*.

Di dalam penelitian yang dilakukan (Debruyne et al., 2018), alur kerja digital untuk layanan metrologi dimulai dengan adanya sistem yang disebut *e-files* dimana memuat semua informasi yang disimpan dan dikelola secara terpusat. Interoperabilitas ialah proses data yang telah

dikumpulkan, data tersebut harus masuk dan ditambahkan pada setiap langkah pemrosesan. Dengan sistem antarmuka berbasis web, pelanggan dapat mengirimkan permohonan kalibrasi langsung secara elektronik. Data administrasi yang dibutuhkan dapat dikelola secara mandiri oleh pelanggan dalam bentuk akun pengguna. Data metrologi yang dibutuhkan untuk memproses permohonan disimpan dalam dokumen yang dapat dibaca oleh mesin. Tahap selanjutnya, pesanan diperiksa dalam *e-files* dan masuk ke dalam tahap proses. Setelah itu proses kalibrasi dilakukan, data tersebut harus dikirim ke laboratorium kalibrasi dimana harus diolah secara digital. Data pengukuran yang dihasilkan laboratorium ditransfer langsung ke basis data secara *interface* (antar muka). Catatan data utama dapat ditambahkan pada ruang yang tersedia. Demikianlah hingga terjadi pembuatan sertifikat digital (DCC) yang disegel secara kriptografis dan ditransfer ke *e-files*. Pelayanan secara digital selesai begitu pula dengan pesanan selesai. Transmisi data harus terkoordinasi, dikenali dan dapat dibaca. Proses kerjanya harus diteliti dan disesuaikan dengan kebutuhan inovasi terkini.

Peneliti (Neyezhnikov et al., 2022) menyampaikan manfaat menggunakan format penyimpanan data tertentu di sertifikat digital kalibrasi dapat mengurangi pekerjaan manual secara signifikan, mengurangi waktu dan biaya yang diperlukan untuk mengelola data kalibrasi serta peningkatan integritas data yang signifikan. Melibatkan mesin dalam membaca data memungkinkan penilaian keterlusuran hasil pengukuran yang efektif hingga memenuhi standar pengukuran nasional. Penggunaan digitalisasi sertifikat kalibrasi akan memudahkan akses dan penggunaan secara serentak pada lokasi dengan waktu yang bersamaan. Instrumen dari sertifikat kalibrasi dapat diunduh oleh pengguna langsung tanpa campur tangan manusia. Selain itu, penerapan digitalisasi sertifikat kalibrasi dapat menghemat biaya transportasi saat pengiriman ke pemohon, dapat menghemat kertas dan bahan habis pakai. Data pada sertifikat kalibrasi

memungkinkan juga digunakan untuk analisis pembelajaran mesin secara buatan.

Penelitian (Barbosa et al., 2022) mengungkapkan konsep utama yang dapat mengikat metrologi legal dengan teknologi ialah aplikasi berbasis *blockchain*. Teknologi ini dapat meningkatkan jaminan instrumen pengukuran dengan memberlakukan pembatasan terhadap potensi kesalahan sekaligus mengurangi upaya teknis yang terkait dengan regulasi serta mengontrol kegiatan. Aplikasi yang disorot berbasis *blockchain* ialah untuk mengukur instrumen di bawah kendali hukum dan mengidentifikasi area yang menjanjikan. Namun, teknologi ini masih membutuhkan waktu dan upaya penelitian panjang untuk diterapkan dalam kegiatan metrologi legal.

Negara Eropa mendorong transformasi digital dalam metrologi legal dengan pengembangan DQI (*Digital Quality Infrastructure*) yang terkoordinasi pada produk dan layanan inovatif disebut *European Metrology Cloud* (EMC). Platform ini dirancang untuk mendukung dan merampingkan proses regulasi dengan menggabungkan infrastruktur dengan *database* untuk pelayanan metrologi legal. Penelitian (Thiel et al., 2017) juga menyampaikan bahwa dampak jangka pendek dari proyek ini ialah mengatasi hambatan akibat keterbatasan *platform* inti yang terpercaya. Platform EMC berguna memenuhi fungsi transfer informasi bersifat rahasia antara organisasi dan sistem mitra resmi. Layanan ini tak hanya mempermudah proses verifikasi melainkan membantu pemeliharaan alat ukur dari jarak jauh.

Pada penelitian (Thiel et al., 2017) menjelaskan bahwa pusat keunggulan teknologi informasi pada metrologi Eropa akan memberikan dukungan melalui analisis insiden pasar yang kompleks, membantu evaluasi risiko keamanan modern dalam metrologi legal, dan memberikan kesatuan kualitas di seluruh Eropa. Di pusat ini, kegiatan penelitian akan dikoordinasikan pada tingkat Eropa untuk mengatasi masalah teknologi IT kontemporer seperti komputasi *cloud*, jaringan perangkat lunak, virtualisasi fungsi jaringan, masalah keamanan, dan *Big Data* pada alat ukur.

Industri Eropa dapat menggunakan hasil penelitian ini sebagai pendukung saat merancang alat ukur baru dan sistem pengukuran.

Metrologi 4.0 menjamin kecepatan, integritas data dan kecerdasan dalam proses kalibrasi terutama kualitas proses pengukuran. Prosedur kalibrasi dalam Metrologi 4.0 tentu berbeda dengan prosedur konvensional, dimana instrumen perlu dihilangkan (dibatalkan) dari lingkungannya, dikirim dan diuji di laboratorium kalibrasi (bersertifikat dan terakreditasi), kemudian dikembalikan ke pemilik untuk dilaksanakan kembali. Menurut penelitian (Silveira Cunha et al., 2020), data yang diperoleh melalui Metrologi 4.0 saat dikirim ke *metrology cloud* harus diimplementasikan dalam sistem keamanan virtual, dan memastikan bahwa data pengukuran tidak dapat diubah atau diakses oleh pihak yang tidak berwenang.

Sejalan dengan penelitian (Fanton, 2019) yang mengemukakan bahwa di masa depan, kebutuhan metrologi perlu ditingkatkan. Dalam hal ini menyoroti hal kinerjanya dan cakupan domain. Metrologi lunak merupakan bidang penelitian dan pengembangan yang sangat menjanjikan. Di luar tujuan metrologi secara tradisional untuk membantu spesifikasi, pengukuran dan realitas obyektif, metrologi saat ini dapat menyelidiki domain persepsi manusia, seperti: pengukuran psikometrik atau perasaan yang dirasakan (terkait warna, rasa, bau dan sentuhan), pengukuran kualitatif (mengukur kepuasan pelanggan), pengukuran pendapat (sosiometri) dan ekonometrika, dan bisa juga dimanfaatkan untuk pengukuran yang berkaitan dengan ilmu pengetahuan manusia: biometri, kecerdasan, perilaku, dan lain-lain. Penerapan metrologi lunak sudah aktif di Amerika Serikat (NIST) dan Inggris (NPL). Bahkan Komisi Eropa telah mendanai beberapa program penelitian di N.E.S.T "Mengukur Sesuatu Yang Tidak Mungkin". Jadi, merupakan hal yang mungkin terjadi di masa depan yang luas untuk hal-hal seperti itu, mengukur sesuatu yang sifatnya kualitatif dengan pemanfaatan metrologi lunak.

Pada penelitian (Yadav et al., 2021) dijelaskan bahwa metrologi harus memenuhi tantangan dalam pengembangan kemampuan teknis pengukuran di berbagai disiplin ilmu utama seperti pengukuran fisika, kimia, biologi yang berdampak besar pada berbagai sektor seperti kesehatan, energi, lingkungan hidup, dan pangan. Dalam konteks penelitian ini, menjelaskan tantangan yang saat ini dihadapi di India, Dr. D. K. Aswal memperkenalkan model Aswal, yang menekankan infrastruktur kualitas dengan berbasis metrologi untuk menyelaraskan standar lintas sektor seperti Pemerintah, Akademisi, dan Industri. Model Aswal memberikan kilasan analisis domain yang berbeda-beda seperti, pengembangan teknologi dan industrialisasi, sistem siber-fisik dan keamanan siber, layanan kesehatan yang terjangkau, lingkungan yang bersih lapangan pekerjaan di masyarakat untuk pertumbuhan negara yang inklusif.

Dalam model ini, metrologi didorong QI untuk mensinergikan Pemerintah, industri, akademisi dan masyarakat dengan cara yang jauh lebih baik mengikuti standar pengukuran yang sama dan sebagai hasilnya, mengarah pada kehidupan penduduknya menjadi berkualitas tinggi serta perekonomiannya yang tinggi. Model tersebut bertujuan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi dengan memastikan standar pengukuran yang seragam, yang mengarah pada transfer pengetahuan menuju kemakmuran ekonomi dan peningkatan kualitas hidup masyarakat.

Sanjay Yadav dianugerahi Penghargaan APMP untuk Negara Berkembang pada tahun 2020 atas kontribusinya yang signifikan terhadap metrologi, termasuk untuk Kemampuan Kalibrasi dan Pengukuran (*Calibration and Measurement Capabilities*) disingkat CMCs, berpartisipasi dalam perbandingan internasional, dan mengembangkan standar tekanan primer dan sekunder. CSIR-NPL (*Council of Scientific and Industrial Research - National Physical Laboratory*) sebagai Institut Metrologi Nasional (NMI) India menekankan kontribusi signifikannya terhadap pembangunan negara secara keseluruhan. CSIR-NPL dalam mendorong pertumbuhan inklusif melalui aktivitasnya di bidang metrologi, menekankan penting untuk memastikan

keakuratan dan keandalan pengukuran di berbagai sektor seperti industri, sains, dan teknologi.

Kemajuan teknologi masa kini yang sering dikaitkan dengan Industri 4.0 telah menjadi tulang punggung pertumbuhan industri dan dapat meningkatkan perekonomian negara. Peran sensor pintar dan *Internet of Things* (IoT) berkemampuan untuk mendukung infrastruktur industri yang beradaptasi dengan teknologi canggih berdasarkan perpaduan sensor pintar. Keterlacakan metrologi digital dengan penggunaan sensor, instrumentasi dan pemrosesan cerdas di Industri 4.0 tidak hanya sangat penting melainkan akan adanya permintaan yang sangat besar dan meningkat berkali-kali lipat di tahun-tahun mendatang. Penjelasan di atas ada pada makalah yang dilakukan (Varshney et al., 2021), memberikan gambaran tinjauan dan perspektif terkait perkembangan teknologi maju di bidang metrologi serta tantangan yang akan dihadapi.

Fenomena abad ke-dua puluh satu ini menggambarkan perkembangan kondisi masyarakat yang sedang bergerak cepat menuju transformasi digital yang luas, dan hal itu telah terjadi serta menjadi konstituen utama dalam perkembangan infrastruktur kualitas berbasis digital (DQI). Proses pembangkitan, pengukuran dan transfer data yang akurat serta tepat dan dapat ditelusuri ke standar internasional meningkat di berbagai negara ekonomi digital. Transformasi digital saat ini sedang berlangsung ke tahap pengembangan meskipun Industri 4.0 telah diperkenalkan beberapa tahun yang lalu.

Penelitian (Varshney et al., 2021) ini menyoroti berbagai aspek yang berkaitan dengan sensor pintar dan IoT untuk membentuk infrastruktur Industri 4.0. Penggunaan sensor pintar sangat penting diadaptasikan dengan teknologi canggih yang berbasis tentang perpaduan sensor pintar dan dapat ditelusuri ke metrologi digital, ketertelusuran dan sertifikasi untuk mendukung Industri 4.0.

Penelitian (Mustapää et al., 2020) mengusulkan solusi konseptual untuk meningkatkan keterlacakan pengukuran dengan jaringan sensor IoT. Singkatnya, solusi tersebut

didasarkan pada penggunaan pengidentifikasi perangkat kriptografi, Sertifikat Kalibrasi Digital (DCC), dan model data SI Digital (D-SI) untuk menyempurnakan data sensor pengukuran IoT dengan informasi kalibrasi sehingga meningkatkan kepercayaan data dengan mengaktifkan validasi ketidakpastian, integritas, dan keaslian data sensor pengukuran. Karena banyaknya sensor murah yang tersedia, sistem IoT yang bergantung pada jaringan sensor kolaboratif semakin populer di berbagai industri di seluruh dunia. Mungkin kualitas data yang dihasilkan oleh sensor ini tidak diketahui. Untuk alasan ini, penelitian telah berfokus pada metode kalibrasi jaringan mandiri yang melibatkan pemrosesan data dan sensor tingkat lanjut. Metode kalibrasi mandiri dalam metrologi tidak dapat dilacak oleh rantai kalibrasi yang tidak terputus terhadap standar pengukuran nasional Institut Metrologi (NMI). Infrastruktur metrologi yang sedang didigitalisasi mungkin dapat menyelesaikan masalah ini. Untuk validasi kualitas dan kepercayaan data, peneliti menyarankan solusi konseptual berdasarkan Sertifikat Kalibrasi Digital (DCC), Sertifikat Sistem Kalibrasi Digital (D-SI), dan pengidentifikasi kriptografi digital.

Sejalan dengan penelitian (Eichstädt et al., 2021) tentang peran IoT yang merupakan bagian penting untuk dikembangkan karena konsep perangkatnya yang saling berhubungan dan baru-baru ini dapat dipertimbangkan di bidang metrologi. Hal yang sangat penting bagi metrologi adalah penilaian kualitas data yang dapat diukur jenis dan tugas pengukurannya. Bagi IoT, kualitas data itu penting dalam setiap langkah atau prosesnya pada tiap elemen penginderaan individu hingga langkah akhir pemrosesan data. Misalnya, dalam pemeliharaan prediktif, kualitas sensor pengukuran perlu diuji untuk mendapatkan hasil pernyataan kualitas sehingga ada rekomendasi operasi pemeliharaan alat pengukuran.

Penelitian (Eichstädt et al., 2021) juga menjelaskan bahwa meskipun popularitas metrologi dengan IoT dan ide serupa tentang sensor heterogen jaringan terus meningkat, masih ada banyak masalah yang perlu ditangani. Hal ini mencakup kebutuhan untuk

metode kalibrasi baru dengan sensor digital pintar, serta persyaratan untuk pemodelan matematis jaringan sensor yang kompleks untuk propagasi ketidakpastian dan kesadaran ketidakpastian dalam metode pembelajaran mesin. Bahkan karena analisis data menjadi otomatis dan cerdas kemudian topologi serta tata letak jaringan dapat berubah dengan cepat, ketertelusuran pengukuran ke satuan SI sangat penting dalam IoT. Sebuah representasi yang dapat ditafsirkan oleh mesin pengetahuan yang tersedia tentang masing-masing alat ukur memiliki hubungannya antar satu sama lain diperlukan untuk menerapkan metode kecerdasan buatan (AI) yang efisien ke jaringan sensor. Hal ini dapat dicapai dengan melakukan penelusuran yang cermat tentang definisi yang dijelaskan pada penelitian (Eichstädt et al., 2021) ini. Kemudian, penggantian atau kegagalan satu sensor tidak harus membuat sebagian besar metode AI perlu dilatih kembali.

Pada 2018, Bruno, dkk di dalam penelitian (Sirshar et al., 2019) melakukan penelitian tentang pembelajaran status IoT dari perspektif metrologi. Teknologi IoT adalah termasuk *Radio Frequency Identification* (RFID), *Wireless Sensor Network* (WSN), *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), dan jaringan IoT 5G yang akan datang. Bug Mikrotik Router dan malware IoT meningkatkan keamanan IoT. Solusi mereka adalah kalibrasi instrumen secara mandiri yang sepenuhnya bergantung pada perangkat keras dengan pemanfaatan sensor dan aktuator di masa depan. Kalibrasi ulang jarak jauh seharusnya paling mudah dan menjadi metode terbaik untuk menyelesaikan masalah kualitas data. Ada juga metode algoritmik untuk kualitas data. Metode kalibrasi ulang kontemporer menggunakan algoritma untuk menyelesaikan masalah ini. Pemanfaatan algoritma memberikan solusi penting untuk estimasi ketidakakuratan data yang diperoleh dan saran untuk mengatasi penyimpangan tersebut, tetapi tidak mengatasi masalah sebenarnya seperti detektor ketika memberikan pembacaan yang salah dan tidak stabil. Seperti yang disebutkan di atas, diharapkan bahwa metode algoritma dapat membantu dalam memberikan hasil yang akurat jika digunakan bersama dengan jenis perangkat keras tertentu. Ini menjadi

tantangan penelitian, tetapi kolaborasi dapat meningkatkan hasil dengan melibatkan teknologi seperti alat kalibrasi jarak jauh.

Pada penelitian (Sensors & Goldstein, 2020) dengan pemanfaatan sebuah *chip*. Berbicara tentang program NIST *on a Chip* (NOAC), yang mengubah presisi pengukuran melalui sekumpulan sensor berbasis kuantum yang dapat dilacak dan sesuai untuk tujuan. Sebuah sejarah program akan diberikan, dan contoh-contohnya akan digunakan untuk menunjukkan bagaimana redefinisi SI, fabrikasi nano dan fotonik terintegrasi, dan revolusi kuantum telah memungkinkan pendekatan metrologi yang benar-benar baru, yang pada gilirannya mendukung Revolusi Industri 4.0. Salah satu topik yang akan dibahas dalam diskusi tersebut adalah sensor dibandingkan dengan standar, serta pentingnya kerja sama publik-swasta.

Program NOAC terintegrasi akan dikembangkan dengan menerapkan standar praktis berbasis kuantum dan sensor, yang dapat dilacak ke unit Sistem Internasional. Program ini dapat diterapkan ke tempat yang dibutuhkan pelanggan, seperti di lantai pabrik, tertanam di dalam produk, di lingkungan laboratorium, di luar angkasa bahkan di rumah. Inovasi NOAC akan semakin bernilai untuk industri, kedokteran, pertahanan, dan ilmu pengetahuan karena konvergensi jurusan saat ini sesuai dengan tren kemajuan teknologi.

Penelitian (Catalucci et al., 2022) menambahkan inovasi seperti sistem multisensor pintar, metrologi virtual (VM) dan operasi metrologi berbasis teori fungsi dalam kegiatan manufaktur telah mengalami perubahan yang signifikan. Sebelumnya, solusi pengukuran biasanya digunakan untuk memeriksa kualitas dari proses verifikasi kesesuaian produk. Karena adanya "Revolusi Industri" terbaru, diperlukan variasi yang signifikan untuk data pengukuran.

Solusi metrologi optik dengan mudah masuk ke dalam proses Industri 4.0 dan metrologi dapat mendorong produksi berbasis data yang sebenarnya. Pemrosesan gambar dan sistem penglihatan, beroperasi di samping kegiatan perakitan dan produksi. Kemudian sistem ini

dapat memperoleh data inspeksi selama/bersamaan dengan proses perakitan/verifikasi, dan secara otomatis menyimpan informasi yang terkait dengan setiap produk yang diproduksi.

Penerapan metrologi optik mengalami peningkatan signifikan sebagai akibat dari meningkatnya adopsi Industri 4.0, karena semakin banyak proses manufaktur yang dirombak untuk pengukuran dan pengawasan dalam proses. Oleh karena itu, metrologi optik untuk manufaktur digital saat ini menjadi subjek penelitian manufaktur yang sangat diminati. Sementara solusi pengukuran koordinat kontak telah digunakan selama bertahun-tahun, tren saat ini adalah untuk semakin memanfaatkan keunggulan teknologi pengukuran optik. Perangkat inspeksi non-kontak otomatis yang cerdas memungkinkan waktu siklus yang lebih cepat, waktu inspeksi yang lebih singkat, dan pemantauan kualitas proses secara konsisten. Penelitian ini menyajikan analisis terbaru tentang metrologi optik dengan menunjukkan manfaat dan efek penggabungan teknologi pengukuran koordinat optik dan tekstur permukaan dalam proses manufaktur digital. Sekarang, sistem ini dapat diakses secara *real-time* dan digunakan untuk memudahkan pengelolaan, pemantauan, diagnostik kegiatan yang diperlukan, inspeksi dan analisis.

Didukung oleh penelitian (Dreyfus et al., 2022), menurut penjelasannya VM adalah alat manufaktur tanpa cacat/*zero-defect manufacturing* (ZDM) generik yang secara teoritis bisa diterapkan ke setiap aplikasi manufaktur. Awalnya dirancang untuk manufaktur semikonduktor, VM baru-baru ini telah diterapkan di banyak bidang industri untuk berbagai proses dengan dinamika berbeda. VM termasuk dalam kelompok yang lebih besar pendekatannya digambarkan sebagai metrologi lunak yang menyatukan konsep-konsep seperti sensor lunak (Vallejo et al., 2019), yang fokus pada aplikasi kimia dan manufaktur berkelanjutan. Metrologi virtual (VM) menggunakan data proses produksi untuk mengestimasi kualitas produk langsung tanpa mengukurnya secara fisik. Ini memungkinkan kualitas produk setiap unit produksi dipantau secara *real time* sambil menjaga proses efisiensi. Proses ini pertama kali dikembangkan

untuk manufaktur semikonduktor. VM baru-baru ini telah diperiksa untuk digunakan di bidang industri lainnya. VM dapat juga dimanfaatkan sebagai penaksir kualitas dan detektor penyimpangan, yang meningkatkan berbagai aplikasi industri seperti sistem pengambilan sampel dan kontrol mesin.

Metrologi virtual dalam pengendalian kualitas berkaitan dengan penyimpangan kualitas produk yang terjadi selama proses non-sampling. Pendekatan ini memungkinkan pengendalian seratus persen dan meningkatkan ketepatan pengendalian statistik, khususnya ketika tidak ada aktivitas pengambilan sampel dalam proses manufaktur. Dalam metrologi virtual, masalah utamanya adalah prediksi yang tidak akurat. Akibatnya, memilih algoritma prediksi yang tepat sangatlah penting. Peneliti membandingkan berbagai algoritma prediksi dalam metrologi virtual. Perbandingan ini dibuat pada data simulasi yang terinspirasi dari aplikasi metrologi virtual.

Metrologi pada mulanya dimanfaatkan untuk menunjang kebutuhan kehidupan manusia dalam kegiatan ekonomi yaitu pertukaran dan perdagangan. Namun, tingkat kinerja metrologi saat ini sebagian besar melebihi kebutuhan aktual di bidang perdagangan. Adanya kemajuan lebih lanjut dapat memfasilitasi kebutuhan ilmu pengetahuan seperti spasial, medis dan bidang-bidang lain yang dapat berkontribusi pada kesejahteraan manusia.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan cara para pembuat kebijakan, peneliti, dan praktisi dalam menangani transformasi digital di bidang metrologi menjadi lebih cerdas. Pada tinjauan sistematis ini menyoroti aspek-aspek yang harus diperhatikan dalam mempersiapkan digitalisasi metrologi. Uraian aspek tersebut yang mungkin dapat diperbaharui dengan membuat sketsa baru, kompetensi, transformasi layanan metrologi dengan melibatkan peran digital, dan pendekatan metrologi kepada masyarakat. Poin utamanya berupa strategi

digitalisasi metrologi yang berpusat pada data (*metrology cloud*) dan berpusat pada layanan.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, peneliti mengajukan saran agar dilakukan perbaikan infrastruktur metrologi menjadi berkualitas hingga bisa difokuskan kepada sistem pelayanan metrologi sehingga pekerjaan pengukuran dapat memberikan hasil yang maksimal dan menyeluruh. Laboratorium dapat memulainya dengan pengembangan sertifikat digital yang dapat dibaca mesin untuk verifikasi, kalibrasi, dan pengujian. Ini akan memungkinkan data dan informasi yang terkandung dalam sertifikat dapat diintegrasikan secara langsung ke dalam infrastruktur digital. Penggunaan teknologi modern seperti sistem tertanam, *Internet of Things*, dan komputasi *cloud*, serta penyimpanan dan keamanan data, diperlukan untuk mencapai transformasi metrologi digital dengan sukses.

Dalam sepuluh tahun terakhir, teknologi seperti sistem tertanam, *Internet of Things*, sistem cyber-fisik, komputasi *cloud*, dan gagasan *big data* telah berkembang sangat pesat. Industri internet dan layanan pintar adalah contoh industri baru yang dibentuk oleh kombinasi teknologi ini. Jika digunakan dengan benar, teknologi dan peluang berbasis data dapat membantu semua pemangku kepentingan metrologi bahkan sampai pada layanan metrologi legal. Misalnya, dapat mengurangi biaya, menghilangkan hambatan inovasi, dan mempercepat waktu pemasaran produk baru.

Oleh karena itu, transformasi dalam metrologi sangat penting untuk mewujudkan infrastruktur kualitas berbasis digital yang diperlukan untuk pertumbuhan industri, penilaian kesesuaian, standardisasi produk, inovasi, dan pengawasan pasar. Digitalisasi akan berdampak pada infrastruktur kualitas (metrologi, standardisasi, dan akreditasi) dan bahkan mendukung aktivitas pasar digital tunggal.

## REFERENSI

Barbosa, C. R. H., Sousa, M. C., Almeida, M. F. L., & Calili, R. F. (2022). Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review

- and a Research Agenda. *Sensors*, 22(16). <https://doi.org/10.3390/s22166114>
- Buku\_Panduan Manajemen Penelitian Kuantitatif. (n.d.).
- Catalucci, S., Thompson, A., Piano, S., Branson, D. T., & Leach, R. (2022). Optical metrology for digital manufacturing: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(7–8), 4271–4290. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09084-5>
- Debruyne, C., Panetto, H., Weichhart, G., Bollen, P., Ciuciu, I., Vidal, M.-E., & Meersman, R. (2018). On the Move to Meaningful Internet Systems. OTM 2017 Workshops. *Lecture Notes in Computer Science*, January. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73805-5>
- Dreyfus, P. A., Psarommatas, F., May, G., & Kiritsis, D. (2022). Virtual metrology as an approach for product quality estimation in Industry 4.0: a systematic review and integrative conceptual framework. *International Journal of Production Research*, 60(2), 742–765. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1976433>
- Eichstadt, K., & Tesch. (2021). *Metrology for Digital Age*.
- Eichstädt, S., Gruber, M., Vedurmudi, A. P., Seeger, B., Bruns, T., & Kok, G. (2021). Toward smart traceability for digital sensors and the industrial internet of things. *Sensors*, 21(6), 1–15. <https://doi.org/10.3390/s21062019>
- F. G., Toro & H., L. (2021). *Brief overview of the future of metrology*. *Journal of Measurement*. 22(September).
- Fanton, J. P. (2019). A brief history of metrology: Past, present, and future. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 10, 1–8. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2019005>
- Mengist, W., Soromessa, T., & Al, E. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7, 100777. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>
- Mustapää, T., Nikander, P., Hutzschenreuter, D., & Viitala, R. (2020). Metrological challenges in collaborative sensing:

- Applicability of digital calibration certificates. *Sensors (Switzerland)*, 20(17), 1–19. <https://doi.org/10.3390/s20174730>
- N., G., S., R., et al. (2021). Significance and implications of digital transformation in metrology in India. *Journal of International Measurement Confederation (IMEKO)*. 18.
- Neyezhmakov, P., Zub, S., & Al, E. (2022). Preliminary e-infrastructure for digital metrology. *Journal of International Measurement Confederation (IMEKO)*. 23.
- R. S, W. (2015). A Systematic Literature Review of Software Defect Prediction: Research Trends, Datasets, Methods and Frameworks. 1 (April).
- Sensors, Q., & Goldstein, B. (2020). NIST on a Chip : Revolutionizing Metrology through. 30–31. <https://doi.org/10.5162/SMSI2020/2>
- Silveira Cunha, K. C., dos Santos, R. O. B., D'Avila, L. S., Santos Cabette, R. E., de Freitas Muniz, W., Colman Prado, P. H., Freire Honorato, L. F., Benessiuti Motta, M. F., Jaeger, C. D., Moreira Chagas, J., Sodero Boaventura, G. A., Pereira Gama, R., & Moraes Rosa, A. C. (2020). The Reliability of Metrologia 4.0 Data in the Industrial Technological Scenario: How This can Impact the Forms of Dimensional Control in the Industry. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 7(4), 34–38. <https://doi.org/10.31873/ijeas.7.04.05>
- Sirshar, M., Khan, M., Naeem, K., & Akbar, T. (2019). *Software Quality Assurance testing methodologies in IoT*. December 2019. [www.preprints.org](http://www.preprints.org)
- Thiel, F., Esche, M., Grasso Toro, F., Oppermann, A., Wetzlich, J., & Peters, D. (2017). *The European Metrology Cloud*. November, 09001. <https://doi.org/10.1051/metrology/201709001>
- Vallejo, M., De La Espriella, C., Gómez-Santamaría, J., Ramírez-Barrera, A. F., & Delgado-Trejos, E. (2019). Soft metrology based on machine learning: A review. *Measurement Science and Technology*, 31(3). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab4b39>
- Varshney, A., Garg, N., Nagla, K. S., Nair, T. S., Jaiswal, S. K., Yadav, S., & Aswal, D. K. (2021). Challenges in Sensors Technology for Industry 4.0 for Futuristic Metrological Applications. *Mapan - Journal of Metrology Society of India*, 36(2), 215–226. <https://doi.org/10.1007/s12647-021-00453-1>
- Xiong, X. C., Zhu, Y., Li, J., Duan, Y., & Fang, X. (2021). A digital framework for metrological information. *Measurement: Sensors*, 18, 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100122>
- Yadav, S., Mandal, G., Jaiswal, V. K., Shivagan, D. D., & Aswal, D. K. (2021). 75th Foundation Day of CSIR-National Physical Laboratory: Celebration of Achievements in Metrology for National Growth. *Mapan - Journal of Metrology Society of India*, 36(1), 1–32. <https://doi.org/10.1007/s12647-021-00442-4>