

DETEKSI STRUKTUR JEMBATAN DENGAN PENDEKATAN MONITORING SISTEM SENSOR ANOMALI BERBASIS ESP32

Brigitha Raco^{1,*}, Verna Y. P. Bokau², Ryan L. Singgeta²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik De La Salle Manado

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Katolik De La Salle Manado

e-mail: braco@unikadelasalle.ac.id

Abstrak – Mengembangkan dan menerapkan sistem pemantauan kesehatan struktur menggunakan sensor ESP32 pada Jembatan Gantung Kairagi Weru. Penelitian ini fokus pada mendeteksi anomali struktur pada jembatan dengan mengidentifikasi parameter struktur kritis dan mendeteksi perubahan yang menunjukkan potensi kerusakan. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan sensor yang paling cocok untuk sistem pemantauan berbasis ESP32 dengan mempertimbangkan parameter seperti getaran, deformasi, temperatur, dan kelembaban. Selain itu, penelitian ini juga akan merancang sistem pemantauan berbasis ESP32 yang dapat diandalkan untuk pemantauan jembatan secara real-time. Hal ini melibatkan pemilihan sensor, desain jaringan komunikasi, dan integrasi perangkat keras dan perangkat lunak. Tujuan akhir dari penelitian ini adalah untuk memastikan keamanan dan integritas jembatan dengan mengatasi berbagai tantangan dalam pemeliharannya. Perangkat pemantau kecepatan sudut berbasis ESP32 berkinerja baik dalam pengujian model jembatan miniatur. Selama satu minggu dan 25 kali pengujian, perangkat ini secara konsisten mengukur kecepatan sudut dalam kisaran 0,12 hingga 0,18 %/s, menunjukkan stabilitas dan konsistensi yang baik. Performa perangkat tidak terpengaruh secara signifikan oleh kecepatan angin simulasi dan suhu tinggi. Penelitian ini menjelaskan konstruksi perangkat pemantauan menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor kecepatan sudut untuk pemantauan struktural jembatan. Langkah-langkah utama meliputi pemilihan komponen, desain sirkuit, dan pengembangan firmware untuk pemrosesan data waktu nyata dan deteksi anomali.

Kata Kunci – Anomali, Sensor, Struktur Jembatan

I. PENDAHULUAN

Jembatan sangat penting bagi sistem transportasi, namun banyak yang menghadapi risiko kerusakan yang dapat berdampak pada keselamatan publik dan stabilitas ekonomi. Metode pemantauan kesehatan struktural (SHM) telah muncul sebagai solusi yang membantu, memungkinkan deteksi dini potensi kerusakan atau kegagalan pada struktur. Sistem SHM dapat menggunakan berbagai sensor untuk memantau parameter seperti getaran, deformasi, suhu, dan kelembaban. Sistem sensor berbasis mikrokontroler, seperti ESP32, menawarkan keuntungan dalam hal efisiensi, akurasi,

dan integrasi dalam pemantauan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem SHM dengan menggunakan sistem sensor berbasis ESP32 pada Jembatan Gantung Kairagi Weru di Kota Manado, Sulawesi Utara. Dengan menggunakan pendekatan ini, para peneliti berharap dapat memastikan fungsi dan keamanan jembatan yang optimal.

Perumusan dan batasan masalah, serta tujuan proyek penelitian yang berfokus pada pendeteksian anomali struktural pada Jembatan Gantung Kairagi Weru. Rumusan masalah mencakup tiga pertanyaan kunci: bagaimana mendeteksi anomali struktural pada jembatan secara efektif, sensor apa yang paling cocok untuk sistem pemantauan berbasis ESP32, dan bagaimana merancang sistem pemantauan berbasis ESP32. Batasan masalah mendefinisikan ruang lingkup penelitian, yaitu terbatas pada Jembatan Gantung Kairagi Weru dan berfokus pada parameter pemantauan seperti getaran, deformasi, temperatur, dan kelembaban. Penelitian ini secara khusus akan menggunakan sensor yang kompatibel dengan mikrokontroler ESP32 dan akan beroperasi secara real-time. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kesehatan struktural berbasis ESP32 untuk mendeteksi anomali struktural pada jembatan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Structural Health Monitoring (SHM)

Structural Health Monitoring (SHM) adalah sistem yang dirancang untuk mengawasi kondisi kesehatan struktur secara berkelanjutan dengan tujuan mendeteksi perubahan yang dapat mempengaruhi integritas struktural. SHM mencakup pengumpulan data dari sensor yang dipasang pada struktur dan analisis data tersebut untuk mengidentifikasi kerusakan atau anomali [6]. Sistem SHM umumnya terdiri dari tiga komponen utama:

- Sensor digunakan untuk mengukur parameter struktural seperti getaran, deformasi, suhu, dan kelembaban.
- Pengolahan Data: Proses analisis data yang dikumpulkan dari sensor untuk mendeteksi perubahan struktural.
- Sistem Peringatan Dini: Mekanisme yang memberikan sinyal atau peringatan jika terdeteksi anomali yang signifikan.

Metodologi SHM

Metodologi SHM melibatkan beberapa pendekatan, seperti pendekatan berbasis model dan pendekatan berbasis data. Pendekatan berbasis model menggunakan model matematis untuk memprediksi perilaku struktur, sementara pendekatan berbasis data fokus pada analisis data sensor untuk mendeteksi perubahan [7].

Deteksi anomali pada jembatan memerlukan pemantauan parameter struktural yang kritis, seperti getaran dari beban dinamis dan deformasi akibat beban dan cuaca ekstrem. Sistem yang efektif harus mampu mengidentifikasi anomali secara real-time dan memberikan informasi yang cukup untuk melakukan tindakan pencegahan [9].

Teknologi Sensor dalam Monitoring Struktur Bangunan

Sensor adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur perubahan dalam lingkungan fisik atau kondisi dan mengubah informasi tersebut menjadi sinyal listrik atau data digital yang dapat dibaca dan dianalisis [10]. Sensor sering digunakan dalam berbagai aplikasi untuk memantau, mengukur, dan mengontrol kondisi di berbagai sistem.



Gambar 1. Alat Sensor

Jenis-jenis sensor yang akan digunakan dalam riset ini adalah sebagai berikut:

- **Sensor Getaran:** Digunakan untuk mengukur getaran yang dihasilkan oleh beban dinamis atau aktivitas struktural. Sensor ini sering berupa akselerometer atau sensor giroskop. Sensor getaran membantu dalam memantau respons struktur terhadap beban dan mendeteksi potensi kerusakan atau keausan.
- **Sensor Deformasi:** Mengukur perubahan bentuk atau deformasi struktur. Sensor ini biasanya berupa strain gauge atau sensor serat optik. Pengukuran deformasi penting untuk mendeteksi perubahan dalam integritas struktural yang dapat mengindikasikan kerusakan atau kelelahan material.
- **Sensor Suhu:** Mengukur suhu lingkungan atau suhu struktur itu sendiri. Sensor suhu yang umum digunakan termasuk termistor atau sensor RTD (resistance

temperature detector). Suhu dapat mempengaruhi kekuatan material dan performa struktur, sehingga pemantauan suhu penting untuk menilai kondisi struktur.

- **Sensor Kelembaban:** Mengukur tingkat kelembaban di sekitar struktur. Sensor kelembaban, seperti sensor kapasitive atau resistive, membantu dalam menilai dampak kelembaban terhadap material struktur.

Pemilihan sensor sendiri harus didasari oleh beberapa kriteria, diantaranya:

- **Akurasi:** Kemampuan sensor untuk memberikan pengukuran yang tepat dan konsisten.
- **Rentang Pengukuran:** Kemampuan sensor untuk mengukur nilai dalam rentang yang diinginkan tanpa kehilangan presisi.
- **Kestabilan dan Ketahanan:** Kemampuan sensor untuk beroperasi dalam kondisi lingkungan yang berbeda tanpa penurunan performa.

Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang dilengkapi dengan Wi-Fi dan Bluetooth, memungkinkan komunikasi nirkabel dengan perangkat lain. Mikrokontroler ini juga memiliki kemampuan pemrosesan yang cukup untuk aplikasi pemantauan real-time [11]. Sistem SHM pada Jembatan Golden Gate dilengkapi dengan sensor getaran, suhu, dan deformasi. Sensor getaran seperti akselerometer memantau efek beban dinamis dari lalu lintas dan angin, sementara sensor suhu memantau perubahan suhu yang dapat mempengaruhi material jembatan. Sensor-sensor ini dipasang di lokasi strategis seperti kabel, menara, dan lantai jembatan. Data dikumpulkan secara real-time dan dianalisis untuk mendeteksi potensi masalah struktural, seperti keausan material atau perubahan yang dapat mempengaruhi stabilitas jembatan [12]. Data yang diperoleh memungkinkan pihak berwenang untuk melakukan pemeliharaan preventif dan perbaikan, memastikan bahwa jembatan tetap aman dan operasional.



Gambar 2. Pemasangan Alat Sensor

Teknologi Sejenis untuk Aplikasi SHM

Dalam upaya untuk memantau kesehatan struktur secara efektif, berbagai teknologi telah dikembangkan dan digunakan dalam sistem Structural Health Monitoring (SHM). Setiap teknologi memiliki keunggulan dan keterbatasan yang mempengaruhi pemilihan sistem yang paling sesuai untuk aplikasi tertentu.

Teknologi	Kelemahan	Keunggulan ESP32
Arduino Uno	- Memori dan kecepatan terbatas. - Konektivitas terbatas (butuh modul tambahan).	- Prosesor dual-core cepat. - Wi-Fi dan Bluetooth built-in.
Raspberry Pi	- Konsumsi energi tinggi. - Ukuran dan biaya lebih besar.	- Konsumsi energi rendah. - Ukuran kecil dan biaya rendah.
BeagleBone Black	- Kompleks dan mahal. - Konsumsi daya tinggi.	- Mudah diprogram dan diintegrasikan. - Konsumsi daya rendah.
Microchip PIC	- Konektivitas terbatas (butuh modul tambahan). - Kemampuan pemrosesan lebih rendah.	- Wi-Fi dan Bluetooth built-in. - Kemampuan pemrosesan lebih baik.

Peran Mikrokontroler dalam Sistem Structural Health Monitoring (SHM). Dalam penerapan Structural Health Monitoring (SHM), teknologi mikrokontroler memiliki peran yang sangat penting. Mikrokontroler tidak hanya bertindak sebagai pusat integrasi berbagai komponen dalam sistem, tetapi juga memastikan data yang dikumpulkan dari sensor dapat dianalisis dan ditindaklanjuti secara tepat waktu. Di bawah ini adalah beberapa peran utama mikrokontroler dalam sistem SHM yang berkaitan dengan pengumpulan data, pengolahan data, serta komunikasi dan kontrol.

III. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, sistem Structural Health Monitoring (SHM) harus mampu mendeteksi anomali struktural dengan akurat. Fokus pengujian adalah pengukuran perubahan kecepatan sudut, yang mencerminkan dinamika dan perubahan struktural akibat beban dan deformasi. Perangkat SHM yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 dan dilengkapi sensor untuk mendeteksi perubahan kecepatan sudut pada jembatan. Sensor terhubung melalui sistem komunikasi terintegrasi, memungkinkan pemrosesan data real-time dan penerapan algoritma deteksi anomali. Dengan fokus pada kecepatan sudut, perangkat diharapkan memberikan informasi penting tentang kondisi jembatan dan membantu mengidentifikasi kerusakan lebih dini. Pengujian eksperimen akan memverifikasi ketepatan pengukuran dan keandalan perangkat dalam aplikasi lapangan. Perubahan kecepatan sudut berkaitan dengan rotasi atau pergeseran elemen jembatan, yang dapat menunjukkan adanya pergerakan struktural akibat beban, getaran, atau perubahan lingkungan. Penelitian ini menjelaskan desain sistem Pemantauan Kesehatan Struktural (SHM) untuk jembatan. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk memproses dan menganalisis parameter seperti kecepatan sudut dan getaran. Proses desain melibatkan identifikasi kebutuhan perangkat keras, pemilihan sensor yang sesuai, dan penentuan penempatan sensor. Mikrokontroler ESP32 bertanggung jawab untuk mengumpulkan data sensor, memprosesnya, dan mengirimkannya secara nirkabel ke server atau antarmuka pengguna. Berbagai sensor, termasuk Sensor Inersia (IMU) untuk mengukur getaran dan rotasi, digunakan dalam sistem. Sensor suhu dan kelembapan juga digunakan untuk memantau kondisi lingkungan. Data yang terkumpul ditransmisikan melalui modul Wi-Fi internal ESP32 untuk memungkinkan analisis lebih lanjut dan ditampilkan dalam antarmuka pemantauan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis & Pengumpulan Data

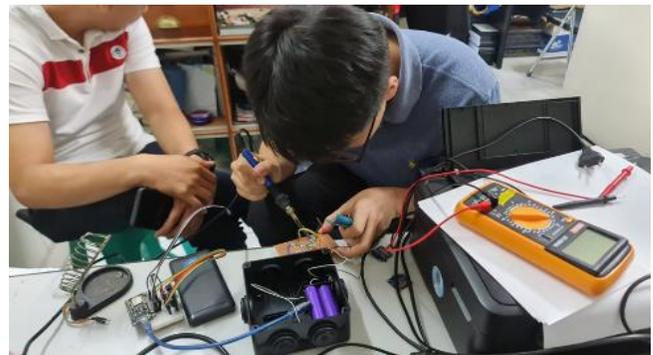
Konstruksi perangkat penelitian ini berfokus pada pengembangan perangkat monitoring berbasis mikrokontroler ESP32 yang dirancang untuk mengukur kecepatan sudut sebagai indikator perubahan struktural pada jembatan. Perangkat ini dibangun untuk berfungsi dalam skenario pemantauan struktural dengan menggunakan sensor yang terhubung ke mikrokontroler ESP32.

Konstruksi perangkat melibatkan beberapa langkah kunci:

Pemilihan Komponen: Komponen utama perangkat terdiri dari ESP32 sebagai mikrokontroler dan sensor kecepatan sudut. Pemilihan komponen dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan daya dan kemampuan pengolahan data real-time.

Desain Sirkuit: Desain sirkuit melibatkan integrasi sensor ke dalam sistem ESP32 dan pengaturan komunikasi data antara sensor dan mikrokontroler. Penekanan diberikan pada efisiensi energi dan stabilitas sinyal.

Pengembangan Firmware: Firmware dikembangkan untuk mengatur pembacaan data dari sensor, pengolahan awal di mikrokontroler, serta pengiriman data ke sistem pusat. Algoritma deteksi anomali berbasis threshold diterapkan untuk memonitor perubahan kecepatan sudut secara real-time



Gambar 3. Perakitan Alat Sensor

Proses Pengujian

Pengujian perangkat dilakukan dalam konteks simulasi untuk mensimulasikan kondisi jembatan sesungguhnya. Karena keterbatasan akses ke jembatan nyata, pengujian dilakukan pada model miniatur jembatan dengan mempertimbangkan dua faktor lingkungan utama: kecepatan angin dan temperatur tinggi. Proses pengujian melibatkan langkah-langkah berikut:

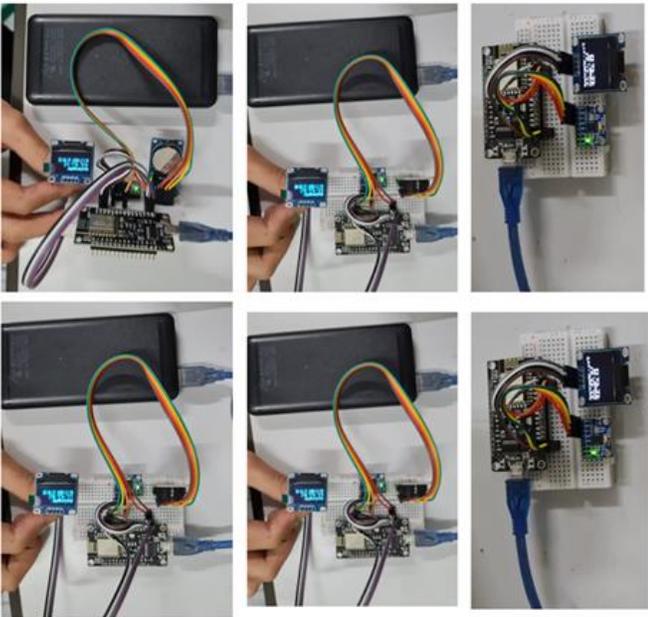
Simulasi Miniatur Jembatan: Perangkat dipasang pada model miniatur jembatan untuk mensimulasikan kondisi struktural nyata. Model ini memungkinkan evaluasi perangkat dalam skala kecil, namun dengan karakteristik yang representatif terhadap struktur jembatan yang lebih besar.



Gambar 4. Alat Sensor

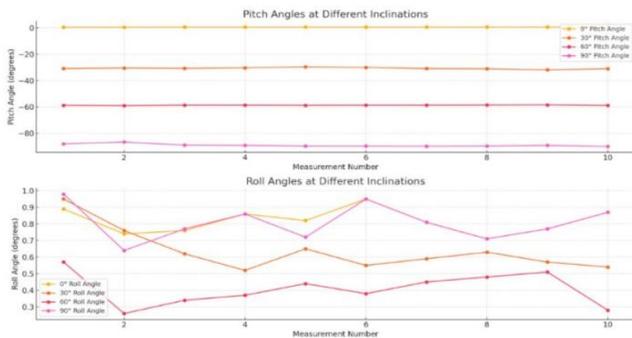
Pengaturan Kondisi Lingkungan: Untuk mensimulasikan kecepatan angin, kipas angin digunakan untuk menciptakan aliran udara yang variatif. Temperatur tinggi disimulasikan dengan pemanas (burner) untuk menilai kinerja perangkat dalam kondisi suhu ekstrem.

Pengumpulan Data: Pengujian dilakukan sebanyak 25 kali selama satu minggu, dengan pengukuran kecepatan sudut dilakukan di bawah berbagai kondisi kecepatan angin dan temperatur. Data yang diperoleh mencakup nilai kecepatan sudut dalam berbagai skenario dan dicatat untuk analisis lebih lanjut.



Gambar 5. Pengujian Alat Sensor

Hasil Pengujian Perangkat



Gambar 6. Hasil Pengujian Alat Sensor

Evaluasi

Dalam laporan riset ini, meskipun pengujian perangkat monitoring kecepatan sudut berbasis ESP32 pada model miniatur jembatan menunjukkan hasil yang positif, beberapa evaluasi penting tetap perlu ditambahkan untuk memberikan gambaran yang lebih menyeluruh tentang performa perangkat:

- **Evaluasi Sensitivitas Sensor:** Meskipun perangkat berhasil mengukur kecepatan sudut dengan baik dalam kondisi simulasi, penting untuk mengevaluasi sensitivitas sensor terhadap perubahan kecil dalam kecepatan sudut. Hal ini untuk memastikan bahwa perangkat dapat mendeteksi perubahan struktural minor yang relevan, meskipun pengujian tidak dilakukan secara real-time di jembatan sesungguhnya.
- **Analisis Ketahanan Lingkungan:** Evaluasi ketahanan perangkat terhadap kondisi lingkungan ekstrem yang lebih bervariasi, seperti kelembaban tinggi atau suhu sangat rendah, harus dilakukan. Ini penting untuk memastikan bahwa perangkat tetap berfungsi dengan baik dalam berbagai kondisi lingkungan jembatan nyata, meskipun pengujian hanya dilakukan dalam simulasi terbatas.
- **Uji Jangka Panjang:** Mengingat waktu uji yang terbatas, pengujian jangka panjang diperlukan untuk menilai stabilitas dan keandalan perangkat seiring waktu. Hal ini akan memberikan wawasan tentang ketahanan perangkat terhadap keausan dan degradasi, serta memastikan bahwa perangkat dapat berfungsi dengan baik dalam penggunaan yang lebih lama.
- **Kompatibilitas Sistem:** Evaluasi bagaimana perangkat dapat terintegrasi dengan sistem monitoring dan infrastruktur yang ada di jembatan nyata. Meskipun perangkat menunjukkan performa yang baik dalam simulasi, uji kompatibilitas dengan sistem yang ada akan memastikan integrasi yang lancar dan efektif.
- **Analisis Biaya-Efektivitas:** Mengkaji biaya implementasi perangkat dibandingkan dengan manfaat yang diperoleh, termasuk penghematan biaya dalam pemeliharaan dan pencegahan kerusakan struktural. Ini penting untuk menilai apakah perangkat memberikan nilai tambah yang signifikan dalam konteks aplikasi nyata.

Dengan mempertimbangkan hasil positif yang telah dicapai seperti konsistensi dan stabilitas perangkat dalam simulasi evaluasi tambahan ini akan membantu memastikan bahwa perangkat tidak hanya efektif dalam kondisi uji terbatas tetapi juga siap untuk diterapkan dalam lingkungan jembatan nyata yang lebih kompleks dan variatif.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian di atas dapat disimpulkan untuk perangkat pemantau kecepatan sudut berbasis ESP32 berkinerja baik dalam pengujian model jembatan miniatur. Selama satu minggu dan 25 kali pengujian, perangkat ini secara konsisten mengukur kecepatan sudut dalam kisaran 0,12 hingga 0,18 °/s, menunjukkan stabilitas dan konsistensi yang baik. Performa perangkat tidak terpengaruh secara

signifikan oleh kecepatan angin simulasi dan suhu tinggi. Namun, evaluasi lebih lanjut di lingkungan jembatan yang sebenarnya diperlukan untuk memastikan keandalannya dalam kondisi yang lebih kompleks dan bervariasi. Pengujian lapangan akan memberikan penilaian yang lebih akurat tentang kemampuan perangkat untuk mendeteksi perubahan struktural dalam aplikasi dunia nyata.

Adapun saran pada penelitian selanjutnya adalah dengan menyediakan gambaran awal tentang efektivitas perangkat dan memberikan dasar untuk evaluasi lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. G. P. G. C. M. Jessica Boakye, "The role of transportation infrastructure on the impact of natural hazards on communities," Elsevier, 2022.
- [2] Y. L. J. L. L. L. J. Y. Guojing Zhang, "Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 9, no. 3, pp. 319-506, 2022.
- [3] . B. L. G. V. R. Mayank Mishra, "Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 48, 2022.
- [4] M. F. Bado and J. R. Casas, "A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring," 2021.
- [5] R. Paolucci, M. Muttillio, M. Di Luzio, R. Alaggio, and G. Ferri, "Electronic Sensory System for Structural Health Monitoring Applications," in *International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, 2020.
- [6] V. Giurgiutiu, *Structural Health Monitoring - with Piezoelectric wafer active sensors*, Elsevier, 2008.
- [7] Y. Tan and L. Zhang, "Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review," *Sage Journals*, vol. 19, no. 4, [8] 2019.
- Anomaly Detection for Monitoring: A Statistical Approach to Time Series Anomaly Detection, O'Reilly Media, 2015.
- [9] A. Moallemi, A. Burrello, D. Brunelli and L. Benini, "Exploring Scalable, Distributed Real-Time Anomaly Detection for Bridge Health Monitoring," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 18, pp. 17660-17674, 2022.
- [10] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications*, 4 ed., New York: Springer, 2010.
- [11] D. Babic, T. Popovic, N. Kovac, and S. Cacic, "An Internet of Things System for Environmental Monitoring Based on ESP32 and Blynk," in *International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT)*, 2022.