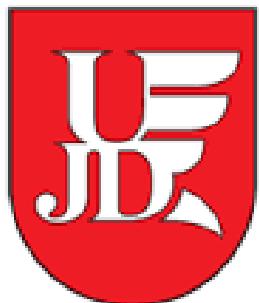


UNIWERSYTET JANA DŁUGOSZA W CZESTOCHOWIE



Wydział Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technicznych

Kierunek: **Informatyka**

Specjalność: **Programowanie gier komputerowych**

**Przemysław Kamiński**

Nr albumu: **88751**

**Sposoby optymalizacji aplikacji internetowych.  
Ways to optimize web applications**

Praca magisterska  
przygotowana pod kierunkiem  
dr hab. Bożeny Woźnej-Szcześniak, prof. UJD

Częstochowa, 2025



## Streszczenie

Celem niniejszej pracy jest porównanie wydajności protokołów komunikacyjnych stosowanych w aplikacjach webowych oraz analiza wpływu formatów wymiany danych na efektywność komunikacji w nowoczesnych systemach informatycznych. Badania obejmują protokoły HTTP/1.1, HTTP/2, GraphQL, gRPC, SOAP, WebSocket Secure oraz WebSocket, a także formaty danych takie jak JSON, XML, Protocol Buffers i MessagePack. Analiza koncentruje się na porównaniu rozmiaru przesyłanych danych, czasu przetwarzania oraz kompatybilności pomiędzy systemami.

Dodatkowo w pracy oceniono wpływ zastosowania technologii WebAssembly na wydajność przetwarzania danych po stronie klienta w porównaniu z tradycyjnym podejściem opartym na języku JavaScript. Eksperymenty zostały przeprowadzone z wykorzystaniem dedykowanej aplikacji testowej, umożliwiającej rzetelny pomiar parametrów wydajnościowych w kontrolowanym środowisku.

Uzyskane wyniki pozwalają określić zależności pomiędzy wyborem protokołów komunikacyjnych, formatów danych oraz technologii wykonawczych a osiąganą wydajnością systemu. Na ich podstawie sformułowano praktyczne wnioski i rekomendacje, które mogą wspierać proces projektowania i optymalizacji nowoczesnych aplikacji webowych oraz architektur rozproszonych.

## Abstract

The aim of this thesis is to compare the performance of communication protocols used in web applications and to analyze the impact of data exchange formats on communication efficiency in modern information systems. The study covers protocols such as HTTP/1.1, HTTP/2, GraphQL, gRPC, SOAP, and WebSocket, as well as data formats including JSON, XML, Protocol Buffers, and MessagePack. The analysis focuses on data size, processing time, and cross-system compatibility.

Additionally, the thesis evaluates the impact of using WebAssembly on client-side data processing performance compared to the traditional JavaScript-based approach. The experiments were conducted using a dedicated test application that enabled reliable performance measurements in a controlled environment.

The obtained results allow identifying relationships between the choice of communication protocols, data formats, and execution technologies and the resulting system performance. Based on these findings, practical conclusions and recommendations are formulated to support the design and optimization of modern web applications and distributed architectures.

**Słowa kluczowe:** Rust, WebAssembly, JavaScript, Sieci komputerowe, Protokoły komunikacyjne, Optymalizacja, Serializacja, Deserializacja, Klient–serwer

# Spis treści

<b>1 Wprowadzenie do problematyki doboru technologii</b>	<b>6</b>
1.1 Znaczenie doboru technologii w aplikacjach webowych . . . . .	6
1.2 Charakterystyka współczesnych systemów rozproszonych . . . . .	6
1.3 Protokoły komunikacyjne jako fundament wymiany danych . . . . .	7
1.4 Uzasadnienie podjęcia badań . . . . .	7
1.5 Słownik pojęć i skrótów . . . . .	7
<b>2 Technologie wykorzystane w projekcie</b>	<b>9</b>
2.1 Rust . . . . .	9
2.2 JavaScript . . . . .	10
2.3 Framework Actix-web . . . . .	10
2.4 Framework Tonic . . . . .	11
2.5 tungstenite-rs . . . . .	11
2.6 h2load . . . . .	11
2.7 Python . . . . .	11
2.8 GraphQL . . . . .	12
2.9 gRPC . . . . .	12
2.10 WebAssembly . . . . .	12
<b>3 Użyte narzędzia programistyczne</b>	<b>13</b>
3.1 Git . . . . .	13
3.2 Zed . . . . .	13
3.3 Visual Studio Code . . . . .	14
3.4 NPM . . . . .	14
3.5 Cargo . . . . .	14
<b>4 Budowa środowiska testowego</b>	<b>15</b>
4.1 Struktura plików aplikacji . . . . .	15
4.1.1 Katalog communication-mechanisms . . . . .	16
4.1.2 Katalog data-serialization-formats . . . . .	17
4.1.3 Katalog graphs . . . . .	18

4.1.4	Katalog target . . . . .	18
4.1.5	Katalog wasm . . . . .	18
4.1.6	Katalog wasm-showcase . . . . .	19
4.1.7	Plik .gitignore . . . . .	20
4.2	Testy wydajnościowe . . . . .	20
4.2.1	Aplikacje zawarte w katalogu communication-mechanisms . . . . .	20
4.2.2	Aplikacje zawarte w katalogu data-serialization-formats . . . . .	21

# Wstęp

Dynamiczny rozwój aplikacji webowych oraz rosnące wymagania dotyczące ich skalowalności, responsywności i niezawodności sprawiają, że wydajność komunikacji sieciowej staje się jednym z kluczowych aspektów projektowania nowoczesnych systemów informatycznych. Współczesne aplikacje coraz częściej opierają się na architekturach rozproszonych, w których wymiana danych pomiędzy klientem a serwerem, a także poszczególnymi usługami, odbywa się z wykorzystaniem różnych protokołów komunikacyjnych oraz formatów danych. Wybór odpowiednich technologii w tym zakresie ma bezpośredni wpływ na czas odpowiedzi systemu, obciążenie sieci oraz koszty przetwarzania po obu stronach komunikacji.

Celem niniejszej pracy magisterskiej jest analiza i porównanie wydajności wybranych protokołów komunikacyjnych stosowanych w aplikacjach webowych, a także ocena wpływu formatów wymiany danych oraz technologii wykonywania kodu po stronie klienta na ogólną efektywność systemu. W pracy szczególną uwagę poświęcono porównaniu protokołów HTTP/1.1, HTTP/2, GraphQL, gRPC, SOAP oraz WebSocket, które reprezentują różne podejścia do komunikacji w środowiskach sieciowych. Analizie poddano również popularne formaty danych, takie jak JSON, XML, Protocol Buffers oraz MessagePack, uwzględniając ich rozmiar, czas serializacji i deserializacji oraz kompatybilność pomiędzy różnymi systemami.

Dodatkowym celem pracy jest zbadanie wpływu zastosowania technologii WebAssembly na wydajność przetwarzania danych po stronie klienta w porównaniu z tradycyjnym podejściem opartym na języku JavaScript. W tym kontekście przeprowadzono eksperymenty mające na celu ocenę różnic w czasie wykonywania operacji, zużyciu zasobów oraz potencjalnych korzyściach wynikających z wykorzystania WebAssembly w aplikacjach webowych.

Praca została podzielona na cztery rozdziały.

W pierwszym rozdziale przedstawiono wprowadzenie do tematyki pracy, obejmujące podstawowe pojęcia związane z komunikacją w aplikacjach webowych oraz uzasadnienie podjęcia badań nad wydajnością protokołów i technologii wykorzystywanych w nowoczesnych systemach informatycznych.

Rozdział drugi poświęcono porównaniu protokołów komunikacyjnych stosowanych w aplikacjach webowych. Opisano w nim charakterystykę wybranych protokołów, takich jak HTTP/1.1, HTTP/2, GraphQL, gRPC, SOAP, WebSocket Secure oraz WebSocket, a także przedstawiono środowisko badawcze, wykorzystane narzędzia, biblioteki oraz sposób przeprowadzania eksperymentów wydajnościowych.

W rozdziale trzecim zaprezentowano różnice pomiędzy formatami danych wykorzystywany- mi w komunikacji sieciowej. Omówiono takie aspekty jak rozmiar przesyłanych danych, czas przetwarzania oraz kompatybilność pomiędzy systemami na przykładzie formatów JSON, XML, Protocol Buffers oraz MessagePack.

Czwarty rozdział poświęcono analizie wydajności technologii WebAssembly w porównaniu z JavaScriptem. Przedstawiono w nim wyniki przeprowadzonych eksperymentów oraz ocenę wpływu obu podejść na wydajność aplikacji webowych.

Podsumowując, praca ma na celu dostarczenie praktycznych i eksperimentalnie potwier- dzonych wniosków, które mogą stanowić wsparcie przy wyborze protokołów komunikacyjnych, formatów danych oraz technologii wykonawczych w projektowaniu wydajnych i nowoczesnych aplikacji webowych.

# Rozdział 1

## Wprowadzenie do problematyki doboru technologii

### 1.1 Znaczenie doboru technologii w aplikacjach webowych

Współczesne aplikacje webowe stanowią podstawę funkcjonowania wielu systemów informatycznych wykorzystywanych w biznesie, administracji publicznej oraz życiu codziennym. Rosnąca liczba użytkowników, potrzeba obsługi dużych wolumenów danych oraz wymagania dotyczące niskich czasów odpowiedzi powodują, że zagadnienia związane z wydajnością i skalowalnością systemów stają się kluczowe już na etapie projektowania architektury. Jednym z najważniejszych czynników wpływających na te cechy jest dobór odpowiednich technologii komunikacyjnych oraz formatów wymiany danych.

W architekturach rozproszonych komunikacja pomiędzy komponentami systemu odbywa się za pośrednictwem sieci komputerowej, która wprowadza dodatkowe opóźnienia oraz ograniczenia przepustowości. Niewłaściwy wybór protokołu komunikacyjnego lub formatu danych może prowadzić do nadmiernego obciążenia sieci, zwiększonego zużycia zasobów obliczeniowych oraz pogorszenia doświadczeń użytkownika końcowego. Z tego względu świadomy dobór technologii powinien być oparty nie tylko na ich popularności, lecz przede wszystkim na analizie wymagań danego problemu.

### 1.2 Charakterystyka współczesnych systemów rozproszonych

Nowoczesne systemy informatyczne coraz częściej projektowane są w oparciu o architektury rozproszone, takie jak architektura klient–serwer, mikroserwisy czy systemy oparte na komunikacji zdarzeniowej. W tego typu rozwiązaniach poszczególne komponenty systemu działają niezależnie i komunikują się ze sobą za pomocą jasno zdefiniowanych interfejsów.

Taki model projektowy umożliwia łatwiejszą skalowalność oraz rozwój systemu, jednak jed-

nocześnie zwiększa znaczenie wydajnej i niezawodnej komunikacji. Każde wywołanie zdalne wiąże się z kosztami transmisji danych, serializacji i deserializacji komunikatów oraz przetwarzania po obu stronach połączenia. W praktyce oznacza to, że nawet niewielkie różnice w zastosowanych technologiach mogą prowadzić do zauważalnych różnic w wydajności całego systemu.

### 1.3 Protokoły komunikacyjne jako fundament wymiany danych

Protokoły komunikacyjne definiują sposób, w jaki dane są przesyłane pomiędzy uczestnikami komunikacji. W aplikacjach webowych powszechnie wykorzystywane są protokoły oparte na rodzinie HTTP, jednak wraz z rozwojem technologii pojawiły się również alternatywne rozwiązania, takie jak gRPC czy WebSocket. Każdy z tych protokołów oferuje inne właściwości w zakresie wydajności, sposobu zestawiania połączeń, obsługi strumieniowania danych oraz kompatybilności z istniejącą infrastrukturą.

Dobór protokołu komunikacyjnego powinien uwzględniać charakter wymiany danych, częstotliwość komunikacji, wymagania dotyczące opóźnień oraz środowisko uruchomieniowe aplikacji. Przykładowo, protokoły oparte na długotrwałych połączeniach mogą być bardziej efektywne w aplikacjach czasu rzeczywistego, natomiast klasyczne podejście żądanie–odpowiedź sprawdza się w prostszych scenariuszach komunikacyjnych.

### 1.4 Uzasadnienie podjęcia badań

Różnorodność dostępnych protokołów komunikacyjnych, formatów danych oraz technologii wykonawczych sprawia, że projektanci systemów informatycznych stają przed trudnym zadaniem wyboru najbardziej odpowiednich rozwiązań. Brak jednoznacznych odpowiedzi oraz silne uzależnienie wyników od kontekstu zastosowania powodują, że decyzje te często podejmowane są intuicyjnie.

Celem niniejszej pracy jest dostarczenie empirycznych danych oraz praktycznych wniosków, które mogą wspierać proces podejmowania decyzji technologicznych. Przeprowadzone analizy i eksperymenty pozwalają lepiej zrozumieć zależności pomiędzy wyborem technologii a wydajnością aplikacji webowych.

### 1.5 Słownik pojęć i skrótów

**API (*Application Programming Interface*)** - Zbiór reguł i definicji umożliwiających komunikację pomiędzy różnymi komponentami oprogramowania [9].

**HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*)** - Protokół komunikacyjny wykorzystywany do przesyłania danych w sieci WWW [8].

**WebSocket** - Protokół umożliwiający dwukierunkową komunikację w czasie rzeczywistym pomiędzy klientem a serwerem [12].

**gRPC** - Wysokowydajny framework komunikacyjny oparty na protokole HTTP/2 i formacie *Protocol Buffers* [7].

**Serializacja** - Proces przekształcania struktury danych do postaci umożliwiającej jej zapis lub transmisję [11].

**Deserializacja** - Proces odtwarzania struktury danych na podstawie jej zserializowanej reprezentacji [6].

**WebAssembly (Wasm)** - Binarny format wykonywalnego kodu umożliwiający uruchamianie aplikacji o wysokiej wydajności w przeglądarkach internetowych [5].

**Architektura klient–serwer** - Model architektoniczny, w którym klient inicjuje żądania, a serwer je obsługuje i zwraca odpowiedzi [10].

## Rozdział 2

# Technologie wykorzystane w projekcie

### 2.1 Rust

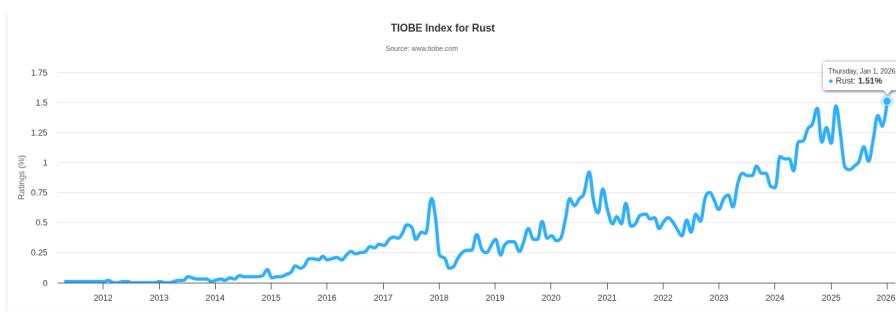
Rust jest nowoczesnym językiem programowania systemowego, który kładzie duży nacisk na bezpieczeństwo pamięci, wydajność oraz wielowątkowość. Dzięki mechanizmowi własności (ownership) oraz statycznej analizie błędów w czasie kompilacji, Rust minimalizuje ryzyko występowania błędów takich jak wycieki pamięci czy dereferencja pustych wskaźników. Rust zdobył popularność również dzięki nowoczesnemu systemowemu typom i możliwości pisania kodu niskopoziomowego bez rezygnacji z bezpieczeństwa.

W projekcie Rust został wykorzystany do implementacji backendu aplikacji, w tym:

- obsługi żądań sieciowych,
- komunikacji asynchronicznej,
- implementacji serwisów gRPC oraz GraphQL,
- testów wydajnościowych.

Wybór języka Rust był podyktowany potrzebą uzyskania niskich czasów odpowiedzi oraz stabilności działania aplikacji przy dużej liczbie równoległych zapytań. Dodatkowo paczki wykorzystane do badań nie posiadały zbędnych funkcjonalności, co umożliwiło skupienie się na analizie wyników i minimalnej implementacji rozwiązań.

Według Tiobe Index, Rust zyskał największą dotychczas popularność 1 stycznia 2026 roku.



Rysunek 2.1: Pozycja języka Rust w rankingu Tiobe Index.

Jak widać na Rysunku 2.1, Rust zyskuje coraz większą popularność wśród programistów, co potwierdza rosnące zainteresowanie nim w przemyśle i projektach open source.

## 2.2 JavaScript

JavaScript jest językiem skryptowym powszechnie wykorzystywany do tworzenia aplikacji webowych. W projekcie został użyty głównie jako punkt odniesienia dla tradycyjnych interfejsów użytkownika w porównaniu z technologią WebAssembly. Dzięki swojej uniwersalności i dużemu ekosystemowi bibliotek, JavaScript nadal pozostaje podstawowym językiem front-endowym.

## 2.3 Framework Actix-web

Actix-web jest asynchronicznym frameworkiem webowym dla języka Rust, opartym na modelu aktorów. Charakteryzuje się wysoką wydajnością oraz niskim narzutem czasowym, co sprawia, że jest jedną z najszybszych opcji w ekosystemie Rust.

W projekcie framework Actix-web został wykorzystany do:

- obsługi klasycznego API HTTP,
- implementacji endpointów GraphQL,
- obsługi żądań REST.

Framework Actix-web został wybrany ze względu na:

- wysoką wydajność potwierdzoną testami benchmarkowymi,
- dobrą integrację z ekosystemem Rust,
- wsparcie dla programowania asynchronicznego.



Rysunek 2.2: Framework Actix-web w porównaniu z innymi frameworkami.

Jak widać na Rysunku 2.2, Actix wypada bardzo korzystnie w kontekście wydajności i obsługi dużego ruchu, co jest istotne dla aplikacji wymagających niskich czasów odpowiedzi.

## 2.4 Framework Tonic

Tonic jest frameworkiem do implementacji gRPC w języku Rust, opartym na bibliotece **tokio** oraz protokole HTTP/2. W projekcie został wykorzystany do:

- implementacji serwera gRPC,
- definiowania kontraktów komunikacyjnych w postaci plików **.proto**,
- realizacji wydajnej komunikacji klient–serwer.

Framework Tonic umożliwił stworzenie stabilnej i szybkiej komunikacji typu RPC, co było kluczowe dla testów wydajnościowych i porównawczych z GraphQL.

## 2.5 tungstenite-rs

**tungstenite-rs** jest biblioteką w Rust umożliwiającą obsługę protokołu WebSocket. Została wykorzystana do:

- obsługi komunikacji w czasie rzeczywistym,
- przesyłania danych bez konieczności inicjowania nowych połączeń HTTP,
- testów alternatywnych modeli komunikacji.

## 2.6 h2load

**h2load** jest narzędziem służącym do testowania wydajności aplikacji korzystających z protokołu HTTP/2. W projekcie zostało wykorzystane do:

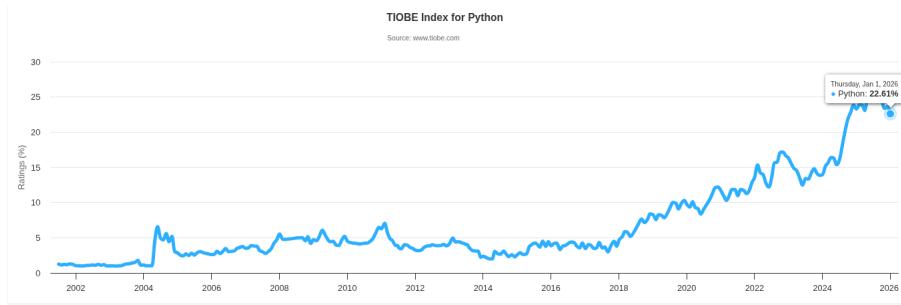
- generowania dużej liczby równoległych zapytań,
- pomiaru czasów odpowiedzi serwera,
- analizy zachowania systemu pod obciążeniem.

## 2.7 Python

Python jest językiem wysokiego poziomu, który w projekcie został użyty głównie pomocniczo, do:

- analizy wyników testów wydajnościowych,
- generowania wykresów porównawczych,
- przetwarzania danych pomiarowych.

Python pozostaje jednym z najpopularniejszych języków programowania, co obrazuje Rysunek 2.3.



Rysunek 2.3: Pozycja języka Python w rankingu Tiobe Index.

## 2.8 GraphQL

GraphQL jest językiem zapytań do API, pozwalającym klientowi precyzyjnie określić, jakie dane są potrzebne. W projekcie został wykorzystany do:

- porównania modelu komunikacji GraphQL z gRPC,
- realizacji zapytań o złożone struktury danych,
- testów wydajnościowych i porównawczych.

## 2.9 gRPC

gRPC jest mechanizmem komunikacji RPC opartym na protokole HTTP/2 oraz formacie binarnym Protocol Buffers. W projekcie zostało wykorzystane do:

- komunikacji między komponentami systemu,
- przeprowadzania testów wydajnościowych,
- porównania z innymi podejściami komunikacyjnymi (np. GraphQL).

## 2.10 WebAssembly

WebAssembly (Wasm) jest binarnym formatem wykonywalnym, pozwalającym uruchamiać kod napisany w Rust bezpośrednio w przeglądarce. W projekcie zostało wykorzystane do:

- uruchamiania części logiki aplikacji po stronie klienta,
- eksperymentalnego porównania wydajności z klasycznym JavaScriptem,
- zwiększenia bezpieczeństwa i wydajności aplikacji webowej.

# Rozdział 3

## Użyte narzędzia programistyczne

### 3.1 Git

Git jest rozproszonym systemem kontroli wersji, którego głównym celem jest zarządzanie historią zmian w kodzie źródłowym projektu programistycznego [1]. Narzędzie to umożliwia rejestrowanie kolejnych wersji plików, analizę wprowadzonych modyfikacji oraz powrót do wcześniejszych stanów projektu. Dzięki rozproszonej architekturze każdy użytkownik posiada pełną kopię repozytorium wraz z całą historią zmian, co zwiększa niezawodność oraz elastyczność pracy zespołowej.

Git oferuje mechanizmy takie jak gałęzie (ang. *branches*) oraz scalanie zmian (ang. *merge*), które pozwalają na równoległą pracę nad różnymi funkcjonalnościami bez ingerencji w główną wersję projektu. System ten jest szeroko stosowany zarówno w małych projektach indywidualnych, jak i w dużych przedsięwzięciach komercyjnych oraz otwartoźródłowych.

### 3.2 Zed

Zed jest nowoczesnym edytorem kodu źródłowego zaprojektowanym z myślą o wysokiej wydajności, niskich opóźnieniach oraz współczesnych potrzebach programistów [13]. Narzędzie to zostało stworzone przy wykorzystaniu języka Rust, co przekłada się na bezpieczeństwo pamięci oraz wysoką responsywność interfejsu użytkownika.

Edytor oferuje wsparcie dla wielu języków programowania, inteligentne podpowiedzi kodu, integrację z systemami kontroli wersji oraz możliwość pracy zespołowej w czasie rzeczywistym. Zed kładzie duży nacisk na minimalizm interfejsu oraz płynność pracy, co czyni go atrakcyjną alternatywą dla bardziej rozbudowanych środowisk programistycznych.

### 3.3 Visual Studio Code

Visual Studio Code jest wieloplatformowym edytorem kodu źródłowego rozwijanym przez firmę Microsoft [2]. Narzędzie to łączy w sobie prostotę edytora tekstu z funkcjonalnością zintegrowanego środowiska programistycznego (IDE). Dzięki rozbudowanemu systemowi rozszerzeń możliwe jest dostosowanie edytora do pracy z niemal dowolnym językiem programowania oraz frameworkm.

Visual Studio Code oferuje funkcje takie jak podświetlanie składni, inteligentne uzupełnianie kodu, debugowanie aplikacji oraz integrację z systemem Git. Jego popularność wynika z dużej elastyczności, aktywnej społeczności oraz regularnych aktualizacji, co czyni go jednym z najczęściej wybieranych narzędzi programistycznych.

### 3.4 NPM

NPM (Node Package Manager) jest menedżerem pakietów przeznaczonym dla środowiska Node.js [3]. Jego głównym zadaniem jest zarządzanie zależnościami projektu, w tym instalowanie, aktualizowanie oraz usuwanie bibliotek zewnętrznych. NPM umożliwia również publikowanie własnych pakietów w publicznym repozytorium, co wspiera ponowne wykorzystanie kodu.

Centralnym elementem działania NPM jest plik **package.json**, w którym definiowane są informacje o projekcie, jego zależnościach oraz skryptach automatyzujących typowe zadania, takie jak budowanie aplikacji czy uruchamianie testów. Narzędzie to stanowi podstawowy element ekosystemu JavaScript i jest powszechnie wykorzystywane w projektach frontendowych oraz backendowych.

### 3.5 Cargo

Cargo jest oficjalnym narzędziem do zarządzania projektami w języku Rust [4]. Odpowiada ono za proces komplikacji kodu źródłowego, pobieranie i zarządzanie zależnościami oraz uruchamianie testów jednostkowych. Cargo integruje się bezpośrednio z kompilatorem Rust, zapewniając spójność i automatyzację procesu budowania aplikacji.

Konfiguracja projektu realizowana jest za pomocą pliku **Cargo.toml**, który zawiera informacje o projekcie, wersjach bibliotek oraz ustawieniach komplikacji. Dzięki Cargo proces tworzenia aplikacji w języku Rust jest uproszczony i ustandaryzowany, co sprzyja utrzymaniu wysokiej jakości kodu oraz jego skalowalności.

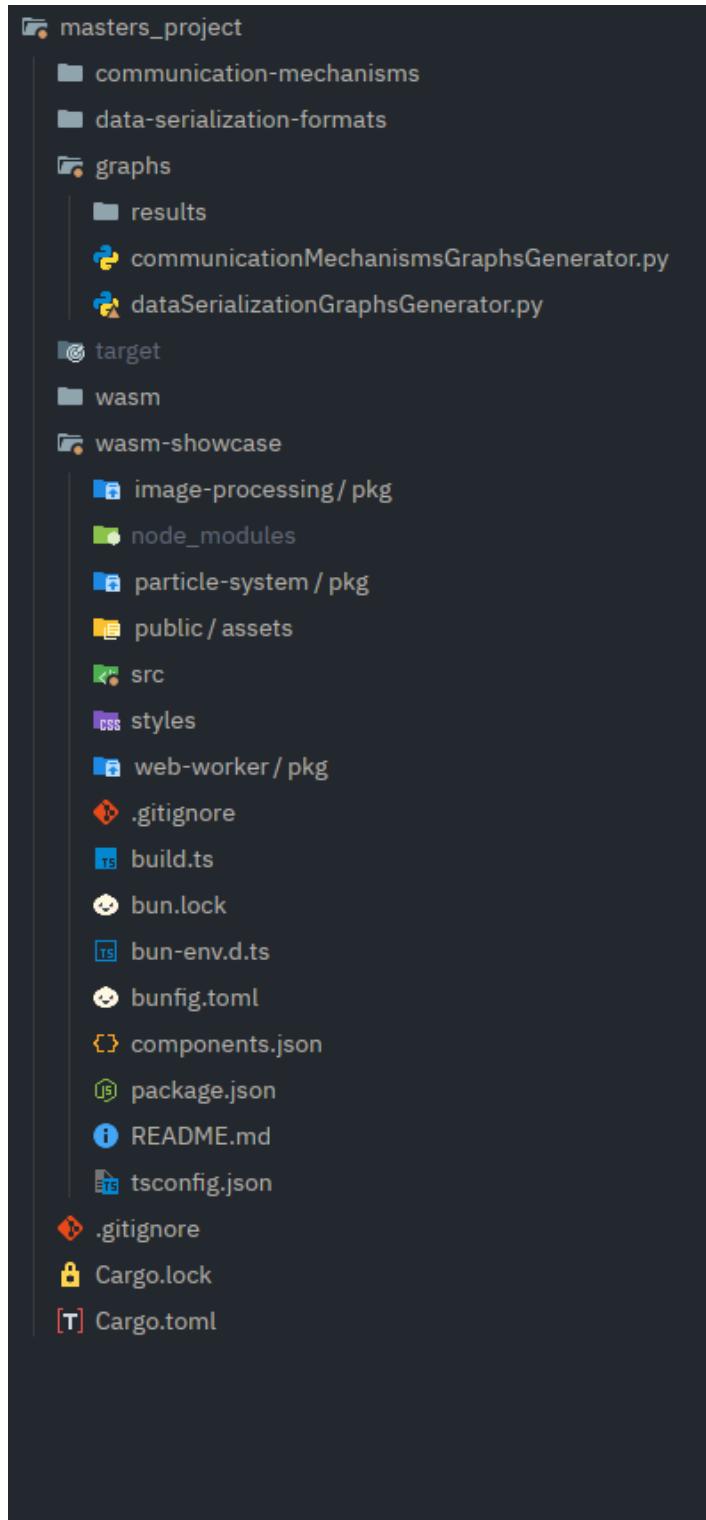
## Rozdział 4

# Budowa środowiska testowego

W niniejszym rozdziale przedstawiono kluczowe elementy środowiska testowego. W pierwszej kolejności zaprezentowano szczegółową strukturę katalogów projektu wraz z opisem zawartości poszczególnych folderów i plików. Następnie omówiono działanie wybranych aplikacji testowych, których implementację oraz wyniki pomiarów przedstawiono w kolejnym rozdziale.

### 4.1 Struktura plików aplikacji

Rysunek 4.1 przedstawia architekturę przygotowanego środowiska testowego. Projekt składa się z pięciu głównych katalogów, z których każdy odpowiada za odrębny aspekt przeprowadzanych badań.



Rysunek 4.1: Struktura plików i katalogów w aplikacji.

#### 4.1.1 Katalog communication-mechanisms

Katalog ten zawiera implementacje aplikacji testujących wydajność różnych protokołów komunikacji. Każda aplikacja mierzy czasy odpowiedzi oraz przepustowość dla konkretnego mechanizmu wymiany danych. Wspólna struktura podkatalogów dla wszystkich implementacji

obejmuje:

- **src** – katalog zawierający kod źródłowy aplikacji serwerowej i klienckiej dla danego protokołu,
- **cert.pem** – lokalny certyfikat SSL/TLS niezbędny do nawiązania bezpiecznego połączenia z wykorzystaniem protokołu HTTP/2,
- **key.pem** – prywatny klucz kryptograficzny odpowiadający certyfikatowi, wymagany do obsługi szyfrowanej komunikacji,
- **Cargo.toml** – manifest pakietu w formacie TOML, zawierający metadane projektu, listę zależności oraz parametry komplikacji niezbędne do zbudowania aplikacji w języku Rust.

W katalogu communication-mechanisms znajdują się następujące implementacje protokołów:

- **graphql** – implementacja serwera GraphQL umożliwiającego elastyczne zapytania o dane ze zdefiniowanego schematu,
- **grpc** – implementacja serwera gRPC opartego na Protocol Buffers, wykorzystującego HTTP/2 do efektywnej komunikacji,
- **REST** – standardowa implementacja architektury REST API z wykorzystaniem metod HTTP (GET, POST, PUT, DELETE),
- **soap** – implementacja protokołu SOAP (Simple Object Access Protocol) opartego na wymianie komunikatów XML,
- **websocket** – implementacja serwera WebSocket umożliwiającego dwukierunkową komunikację w czasie rzeczywistym,
- **websocket\_secure** – implementacja protokołu WebSocket Secure (WSS) z szyfrowaniem SSL/TLS.

#### 4.1.2 Katalog data-serialization-formats

Katalog zawiera aplikacje służące do porównania wydajności procesów serializacji i deserializacji danych w różnych formatach. Każda implementacja mierzy czas potrzebny na przekształcenie struktur danych oraz rozmiar wynikowych reprezentacji. W katalogu znajdują się następujące moduły testowe:

- **avro** – implementacja testów dla formatu Apache Avro, binarnego systemu serializacji z wbudowanym wsparciem dla schematów danych,

- **bson\_benchmark** – testy wydajności formatu BSON (Binary JSON), wykorzystywanego między innymi w bazach danych MongoDB,
- **json** – implementacja testów dla formatu JSON (JavaScript Object Notation), popularnego tekstowego formatu wymiany danych,
- **message-pack** – testy formatu MessagePack, będącego binarną alternatywą dla JSON o mniejszym rozmiarze danych,
- **protobuf** – implementacja testów dla Protocol Buffers (Protobuf), binarnego formatu serializacji opracowanego przez Google,
- **xml** – testy wydajności formatu XML (eXtensible Markup Language), rozszerzalnego języka znaczników.

#### 4.1.3 Katalog graphs

Katalog zawiera narzędzia do wizualizacji wyników przeprowadzonych eksperymentów oraz wygenerowane wykresy. Struktura obejmuje:

- **communicationMechanismsGraphsGenerator.py** – skrypt w języku Python generujący wykresy porównawcze dla testów mechanizmów komunikacji, wizualizujący czasy odpowiedzi oraz przepustowość poszczególnych protokołów,
- **dataSerializationGraphsGenerator.py** – skrypt w języku Python tworzący wykresy przedstawiające wyniki testów serializacji danych, w tym czasy operacji oraz rozmiary zserializowanych struktur,
- **results** – katalog przechowujący wygenerowane wykresy w formatach graficznych (PNG, SVG) gotowe do wykorzystania w dokumentacji.

#### 4.1.4 Katalog target

Katalog target stanowi standardowy folder roboczy kompilatora Rust, zawierający pliki binarne, biblioteki oraz artefakty pośrednie powstałe w procesie budowania projektu. Zawartość tego katalogu jest automatycznie zarządzana przez narzędzie Cargo i nie wymaga ręcznej modyfikacji.

#### 4.1.5 Katalog wasm

Katalog zawiera programy napisane w języku Rust, które są komplikowane do formatu WebAssembly (WASM). Powstałe moduły binarne są następnie wykorzystywane w środowisku przeglądarki internetowej, umożliwiając uruchomienie kodu o wysokiej wydajności po stronie klienta.

#### 4.1.6 Katalog wasm-showcase

Katalog wasm-showcase zawiera kompletną aplikację webową demonstrującą możliwości technologii WebAssembly. Struktura projektu obejmuje następujące elementy:

- **image-processing** – katalog zawierający skompilowane do WebAssembly moduły służące do przetwarzania obrazów. Pliki WASM oraz pomocnicze skrypty JavaScript pozwalają na wykonywanie operacji graficznych bezpośrednio w przeglądarce,
- **particle-system** – katalog z modułami WASM implementującymi system cząsteczek, wykorzystywany do demonstracji wydajności obliczeń graficznych w środowisku webowym,
- **web-worker** – katalog zawierający skompilowane moduły WASM przeznaczone do uruchomienia w Web Workers, umożliwiające wielowątkowe przetwarzanie danych bez blokowania głównego wątku interfejsu użytkownika,
- **styles** – katalog ze stylami CSS definiującymi wygląd aplikacji webowej,
- **build.ts** – natywny skrypt TypeScript odpowiedzialny za proces budowania aplikacji, zawierający logikę komplikacji i optymalizacji zasobów,
- **bun.lock** – plik blokady rejestrujący dokładne wersje wszystkich zależności projektu oraz ich podzależności, zapewniający powtarzalność budowania aplikacji,
- **bunfig.toml** – plik konfiguracyjny środowiska uruchomieniowego Bun, zawierający ustawienia dotyczące komplikacji i wykonania projektu,
- **components.json** – plik konfiguracyjny definiujący strukturę importów komponentów oraz integrację z biblioteką Tailwind CSS,
- **package.json** – manifest projektu Node.js zawierający listę zależności npm wraz z określonymi wersjami, skrypty budowania oraz metadane aplikacji,
- **README.md** – plik dokumentacji zawierający szczegółowy opis procesu instalacji, konfiguracji oraz uruchomienia aplikacji,
- **tsconfig.json** – plik konfiguracyjny kompilatora TypeScript, definiujący opcje transpilacji, ścieżki modułów oraz poziom zgodności ze standardem ECMAScript,
- **bun-env.d.ts** – plik deklaracji typów TypeScript dla środowiska Bun, zapewniający wsparcie IntelliSense i kontrolę typów,
- **src** – katalog zawierający pliki źródłowe aplikacji, w tym komponenty React, logikę biznesową oraz pomocnicze moduły,

- **public** – katalog z zasobami statycznymi (obrazy, ikony, manifesty) udostępnianymi bezpośrednio przez serwer webowy,
- **node\_modules** – katalog zawierający zainstalowane biblioteki i moduły npm, automatycznie zarządzany przez menedżer pakietów.

#### 4.1.7 Plik .gitignore

Plik konfiguracyjny systemu kontroli wersji Git, zawierający listę plików i katalogów wykluczonych z repozytorium. Typowo obejmuje katalogi tymczasowe (target, node\_modules), pliki konfiguracyjne środowiska oraz artefakty komplikacji, które nie powinny być śledzone w historii zmian projektu.

## 4.2 Testy wydajnościowe

W ramach przygotowanego środowiska testowego przeprowadzono szereg eksperymentów mających na celu obiektywną ocenę wydajności różnych mechanizmów komunikacji oraz formatów serializacji danych. Poniżej przedstawiono szczegółowy opis metodologii testowania poszczególnych grup aplikacji.

### 4.2.1 Aplikacje zawarte w katalogu communication-mechanisms

Dla każdego zaimplementowanego protokołu komunikacji przeprowadzono cztery kategorie testów wydajnościowych, pozwalających na kompleksową ocenę charakterystyk przesyłania danych:

1. **Transmisja małych pakietów danych** – test polegający na cyklicznym odpytywaniu serwera o dane o rozmiarze 1 KB. Pomiar ten pozwala ocenić narzut protokołu oraz czas odpowiedzi dla typowych żądań zawierających niewielką ilość informacji.
2. **Transmisja dużych pakietów danych** – test analogiczny do poprzedniego, z tą różnicą, że rozmiar przesyłanych danych wynosi 1 MB. Eksperyment ten umożliwia ocenę wydajności protokołów w scenariuszu transferu większych zasobów.
3. **Head-of-Line Blocking** – test weryfikujący występowanie zjawiska blokowania głowy kolejki, w którym opóźnienie w przetwarzaniu jednego żądania wpływa na obsługę kolejnych żądań w ramach tego samego połączenia. Pomiar ten jest szczególnie istotny dla protokołów wykorzystujących multipleksowanie strumieni.
4. **Strumieniowanie danych** – test przeprowadzany wyłącznie dla protokołów wspierających tryb strumieniowy (streaming). Ocenie podlega efektywność przesyłania danych w sposób ciągły, bez konieczności oczekiwania na kompletną odpowiedź serwera.

#### 4.2.2 Aplikacje zawarte w katalogu data-serialization-formats

Dla każdej z zaimplementowanych bibliotek serializacji danych przeprowadzono pomiary wydajności na podstawie ustandaryzowanej struktury danych. W celu zapewnienia porównywalności wyników, wszystkie testy wykorzystują identyczny zestaw danych testowych składający się z kolekcji 1000 obiektów użytkowników wraz z metadanymi.

Struktura danych testowych jest generowana w następujący sposób:

```
1  let count = 1000;
2  let users: Vec<User> = (0..count)
3  .map(|i| User {
4      id: i as i64,
5      name: format!("User {}", i),
6      email: format!("user{}@example.com", i),
7      age: 20 + (i % 50) as i32,
8      is_active: i % 2 == 0,
9      tags: vec![
10         "tag1".to_string(),
11         "tag2".to_string(),
12         "tag3".to_string(),
13     ],
14 })
15 .collect();
16
17 UserCollection {
18     users,
19     metadata: Metadata {
20         version: "1.0.0".to_string(),
21         created_at: "2025-01-23T00:00:00Z".to_string(),
22         total_count: count,
23     },
24 }
```

Listing 4.1: Struktura danych wykorzystana w testach serializacji.

Każdy obiekt użytkownika zawiera kompletny zestaw atrybutów: identyfikator liczbowy, nazwę, adres email, wiek, status aktywności oraz listę trzech tagów. Dodatkowo, kolekcja jest wzbogacona o metadane zawierające wersję struktury danych, znacznik czasu utworzenia oraz łączną liczbę elementów. Taka konstrukcja zapewnia reprezentatywny zestaw różnorodnych typów danych (liczby całkowite, ciągi znaków, wartości logiczne, kolekcje) występujących w rzeczywistych zastosowaniach.

Dla każdego formatu serializacji mierzono następujące parametry wydajnościowe:

1. **Czas serializacji** – czas potrzebny na przekształcenie struktury danych z reprezentacji

obiektowej języka Rust do formatu serializowanego. Pomiar wyrażony w milisekundach (ms) i uśredniony na podstawie wielokrotnych iteracji.

2. **Czas deserializacji** – czas wymagany do odtworzenia struktury obiektowej z danych w formacie serializowanym. Pomiar wyrażony w milisekundach (ms) i uśredniony na podstawie wielokrotnych iteracji.
3. **Rozmiar zserializowanych danych** – całkowita wielkość danych po procesie serializacji, wyrażona w bajtach (B). Parametr ten pozwala ocenić efektywność kompresji oraz narzut protokołu dla różnych formatów wymiany danych.

Wykorzystanie identycznego zestawu danych testowych dla wszystkich formatów serializacji umożliwia obiektywne porównanie ich wydajności oraz charakterystyk w zakresie rozmiaru wynikowych struktur danych.

# Zakończenie

# Bibliografia

- [1] Git Project. Git. <https://git-scm.com/>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [2] Microsoft. Visual studio code. <https://code.visualstudio.com/>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [3] npm, Inc. npm documentation. <https://www.npmjs.com/>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [4] Rust Project. Cargo – the rust package manager. <https://doc.rust-lang.org/cargo/>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [5] Webassembly.org. Webassembly. <https://webassembly.org/>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [6] Wikipedia. Deserializacja. [https://en.wikipedia.org/wiki/Marshalling\\_\(computer\\_science\)#Unmarshalling](https://en.wikipedia.org/wiki/Marshalling_(computer_science)#Unmarshalling). [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [7] Wikipedia. google remote procedure call. <https://en.wikipedia.org/wiki/GRPC>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [8] Wikipedia. Hypertext transfer protocol. <https://pl.wikipedia.org/wiki/HTTP>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [9] Wikipedia. Interfejs programowania aplikacji. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Interfejs\\_programowania\\_aplikacji](https://pl.wikipedia.org/wiki/Interfejs_programowania_aplikacji). [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [10] Wikipedia. Model klient serwer. [https://en.wikipedia.org/wiki/Client%E2%80%93server\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Client%E2%80%93server_model). [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [11] Wikipedia. Serializacja. <https://en.wikipedia.org/wiki/Serialization>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [12] Wikipedia. Websocket. <https://en.wikipedia.org/wiki/WebSocket>. [dostęp: 21 stycznia 2026].
- [13] Zed Industries. Zed editor. <https://zed.dev/>. [dostęp: 21 stycznia 2026].

# Spis rysunków

2.1	Pozycja języka Rust w rankingu Tiobe Index. . . . .	9
2.2	Framework Actix-web w porównaniu z innymi frameworkami. . . . .	10
2.3	Pozycja języka Python w rankingu Tiobe Index. . . . .	12
4.1	Struktura plików i katalogów w aplikacji. . . . .	16

# Spis listingów

4.1 Struktura danych wykorzystana w testach serializacji. . . . .	21
---	----