

Sistem Informasi Antrian Nasabah Menggunakan Multilevel Queue Pada Bank Mandiri Taspen Kc Medan

Customer Queue Information System Using Multilevel Queue at Bank Mandiri Taspen KC Medan

Esti Kurnia Dara^{1,*}, Tengku Khairul Rifaldi², Triase³

^{1,2,3}Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan, Indonesia

¹hestydara38@gmail.com, ²tengkurifaldi3@gmail.com, ³triase@uinsu.ac.id

Received: September 14, 2026 | Revised: October 3, 2026 | Accepted: October 12, 2026 | Published: October 19, 2026



COSIE is licensed a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License

Abstrak

Pengelolaan antrian manual di Bank Mandiri Taspen KC Medan belum memberi prioritas otomatis bagi lansia, penyandang disabilitas, dan ibu hamil serta berpotensi memperpanjang waktu tunggu saat kunjungan meningkat. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem antrian nasabah berbasis web dengan Multilevel Queue (MLQ) empat level yang menggabungkan prioritas tetap antarlevel, First Come First Served (FCFS) dalam satu level, dan aturan anti-starvation berparameter K. Kontribusinya adalah integrasi aplikasi dan kebijakan antrian, bukan algoritma MLQ baru. Pengembangan memakai model Waterfall. Evaluasi sepenuhnya berbasis simulasi, bukan pengukuran lapangan: skenario deterministik terkonstruksi berisi 14 nasabah, simulasi stokastik berulang (2.000 replikasi), dan analisis sensitivitas terhadap intensitas kedatangan, variabilitas waktu layanan, konfigurasi konter, dan ambang K. Pada skenario 14 nasabah, rata-rata waktu tunggu kelompok prioritas turun dari 24,50 menjadi 11,00 menit, sedangkan kelompok reguler naik dari 37,13 menjadi 50,50 menit. Pada simulasi stokastik dua konter ($\lambda = 0,20$ nasabah/menit), persentil ke-95 waktu tunggu prioritas turun dari 25,71 menjadi 17,47 menit dengan $K = 3$, sedangkan persentil ke-95 kelompok reguler naik dari 22,99 menjadi 32,83 menit. Ambang $K = 2-4$ memenuhi kriteria keadilan yang diusulkan pada beban tersebut, tetapi tidak ada nilai K yang memenuhinya pada $\lambda = 0,25$. Hasil ini menggambarkan perilaku model simulasi dan perlu divalidasi dengan data lapangan.

Kata Kunci: Sistem antrian; Multilevel Queue; Anti-starvation; Simulasi; Bank Mandiri Taspen

Abstract

Manual queue management at Bank Mandiri Taspen Medan Branch Office gives no automatic priority to the elderly, persons with disabilities, and pregnant women and may lengthen waiting times when visits increase. This study designs and implements a web-based customer queue system using a four-level Multilevel Queue (MLQ) that combines fixed priority between levels, First Come First Served (FCFS) within a level, and an anti-starvation rule with parameter K. The contribution is an integration of application and queue policy, not a new MLQ algorithm. The Waterfall model was used for development. The evaluation is entirely simulation-based rather than field measurement: a constructed deterministic scenario of 14 customers, replicated stochastic simulation (2,000 replications), and sensitivity analysis of arrival intensity, service-time variability, counter configuration, and threshold K. In the 14-customer scenario, the average waiting time of the priority group fell from 24.50 to 11.00 minutes, while the regular group rose from 37.13 to 50.50 minutes. In the stochastic two-counter simulation ($\lambda = 0.20$ customers/minute), the 95th percentile of priority waiting time fell from 25.71 to 17.47 minutes with $K = 3$, while the regular group's 95th percentile rose from 22.99 to 32.83 minutes. Thresholds $K = 2-4$ met the proposed fairness criterion at this load, but no K met it at $\lambda = 0.25$. These results describe the behavior of the simulation model and require validation with field data.

Keywords: Queue system; Multilevel Queue; Anti-starvation; Simulation; Bank Mandiri Taspen

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi informasi telah mengubah layanan publik, termasuk perbankan. Transformasi digital dilakukan untuk meningkatkan efisiensi operasional, mempercepat proses layanan, dan meningkatkan pengalaman nasabah [1]–[3], dan hubungan antara layanan perbankan digital dan kepuasan nasabah telah dikaji pada bank-bank di Indonesia [4]. Dalam lanskap ini, manajemen antrian merupakan elemen inti kualitas layanan kantor cabang. Tinjauan pustaka sistematis terhadap 25 penelitian tentang antrian digital pada bank-bank di Indonesia mencatat bahwa waktu tunggu pada jam sibuk kerap mencapai 20–60 menit dan bahwa antrian daring, kios layanan mandiri, dan sistem reservasi dapat mengurangi waktu tunggu serta meningkatkan kepuasan nasabah, tetapi sebagian besar bukti berasal dari model teoretis atau studi kasus yang sempit [5]. Bank Mandiri Taspen melayani terutama pegawai negeri sipil yang telah pensiun, anggota Tentara Nasional Indonesia (TNI) dan Kepolisian Negara Republik Indonesia (Polri), serta usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM). Karena nasabahnya didominasi oleh pensiunan, layanan yang cepat dan tertib menjadi sangat penting. Selama menjalani magang (*Kerja Praktik*) di Kantor Cabang Medan (KC Medan), para penulis mengamati bahwa antrian masih dikelola secara manual: petugas keamanan memanggil nasabah dari ruang tunggu ke konter layanan, dan tidak ada mekanisme yang memberikan prioritas otomatis bagi lansia, penyandang disabilitas, atau ibu hamil. Akibatnya, layanan menjadi kurang efisien, terutama ketika jumlah kunjungan meningkat. Hal ini memunculkan dua pertanyaan: (i) bagaimana sistem antrian dapat memprioritaskan kelompok-kelompok ini secara otomatis tanpa membuat nasabah reguler terus-menerus tidak terlayani, dan (ii) seberapa besar dampaknya terhadap distribusi waktu tunggu pada berbagai kondisi beban dan konfigurasi konter.

Sistem antrian berbasis web untuk bank telah dikembangkan dalam beberapa penelitian. Dinanti dkk. [6] membangun situs web antrian bank sisi klien dengan pendaftaran daring, tiket digital, pemantauan status secara real-time, dan dasbor admin untuk antrian teller dan customer service, dan Aisya dkk. [7] mengusulkan rancangan antrian berbasis web untuk sebuah kantor cabang bank di Medan. Penelitian lain mencakup prototipe antrian daring untuk layanan bank [8] dan sistem antrian dengan pengenalan sidik jari dan papan skor [9], dan sistem informasi antrian juga telah dibangun dengan model proses ringan seperti Scrum [10]. Pada penelitian yang menyebutkan disiplin antreannya, sistem-sistem ini menggunakan First In First Out (FIFO) atau First Come First Served (FCFS) [6], [11], [12], yang melayani setiap nasabah secara ketat berdasarkan urutan kedatangan tanpa memandang kategori. Tabel 1 merangkum perbandingan sistem-sistem tersebut menurut platform, disiplin antrian, prioritas otomatis per kategori nasabah, pencegahan starvation, dan evaluasi yang dilaporkan.

Tabel 1. Perbandingan sistem antrian bank dan layanan keuangan yang ditinjau dengan penelitian ini

Studi	Konteks	Platform	Disiplin antrian	Prioritas otomatis per kategori nasabah	Pencegahan starvation	Evaluasi yang dilaporkan
[6]	Bank (prototipe “Bank Jali”)	Web, sisi klien (localStorage)	FIFO	Tidak (FIFO)	Tidak berlaku	Pengujian keandalan dan kesesuaian FIFO; estimasi waktu tunggu sebagai fitur
[7]	Kantor cabang bank di Medan	Web (HTML, CSS, JavaScript)	n.d.	n.d.	n.d.	Rancangan awal; pengujian dan evaluasi kepuasan menyusul
[8]	Layanan bank	Web (prototipe)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
[9]	Bank	n.d. (sidik jari dan papan skor)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
[11]	Layanan Pegadaian	Web	FCFS	Tidak (FCFS)	Tidak berlaku	n.d.

Studi	Konteks	Platform	Disiplin antrean	Prioritas otomatis per kategori nasabah	Pencegahan starvation	Evaluasi yang dilaporkan
[12]	Bank	Pustaka deque Python	FIFO	Tidak berbasis kategori nasabah; abstrak menyebut pembagian menurut estimasi waktu layanan	Tidak berlaku	Pengujian sistem; hasil kuantitatif waktu tunggu per kategori n.d.
Penelitian ini	Bank Mandiri Taspen KC Medan	Web dengan basis data	MLQ 4 level: prioritas tetap + FCFS dalam level	Ya (level A dan B)	Ya (aturan anti-starvation, parameter K)	Simulasi deterministik, simulasi stokastik berulang, dan sensitivitas; belum ada data lapangan

Catatan Tabel 1: n.d. = tidak dinyatakan pada abstrak atau metadata yang ditelaah penulis; entri tersebut perlu diverifikasi dengan teks lengkap. Perbandingan hanya mencakup sistem antrean bank dan layanan keuangan yang ditemukan pada penelusuran literatur penulis dan bukan tinjauan sistematis yang lengkap. Metode Multilevel Queue (MLQ), yang semula merupakan algoritma penjadwalan proses, mengelompokkan pekerjaan ke dalam antrean terpisah berdasarkan prioritas atau karakteristiknya [13]–[15]. Metode ini telah diterapkan pada pendaftaran pasien daring di sebuah klinik [13] dan pendaftaran siswa baru [14], serta multilevel feedback queue yang dikombinasikan dengan FIFO telah digunakan pada sistem penjadwalan logistik berbasis web [15]. Antrean prioritas juga telah digunakan untuk memprioritaskan layanan publik di rumah sakit [16]. Kelemahan yang dikenal dari prioritas ketat adalah starvation pada pekerjaan berprioritas rendah, yang dikurangi oleh penjadwal multilevel feedback dengan menyesuaikan prioritas selama eksekusi [17].

Berdasarkan Tabel 1, sistem antrean bank berbasis web yang ditinjau sebagian besar mengandalkan FIFO/FCFS atau tidak menyebutkan disiplin antreannya, sehingga tidak ada yang, sejauh yang dapat dipastikan dari sumber yang ditelaah, memberikan prioritas otomatis berdasarkan kategori nasabah disertai aturan pencegahan starvation dan evaluasi waktu tunggu per kategori. Penerapan MLQ yang dilaporkan terpusat pada klinik, sekolah, dan logistik [13]–[15]. Penelitian ini tidak mengusulkan algoritma MLQ baru. Kontribusinya adalah integrasi aplikasi dan kebijakan: (1) konfigurasi MLQ empat level yang menggabungkan prioritas tetap antarlevel, FCFS dalam satu level, dan aturan anti-starvation berparameter K untuk kantor cabang bank yang berorientasi pensiunan; (2) sistem berbasis web yang berfungsi, mencakup penerbitan tiket, layar pemanggilan real-time dengan pengumuman text-to-speech, serta dasbor petugas dan admin; dan (3) evaluasi berbasis simulasi yang membandingkan FCFS, MLQ ketat, dan MLQ dengan anti-starvation menurut kategori nasabah, termasuk ukuran distribusi, analisis sensitivitas, dan kriteria keadilan eksplisit. Seluruh bukti kinerja dalam artikel ini berasal dari simulasi, bukan dari pengukuran di bank. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi melalui simulasi sistem antrean nasabah berbasis web dengan MLQ untuk Bank Mandiri Taspen KC Medan.

2. BAHAN DAN METODE

2.1. Desain penelitian

Penelitian ini menggabungkan model pengembangan perangkat lunak Waterfall, yang bersifat linear dan berurutan: setiap fase diselesaikan sebelum fase berikutnya dimulai [18], [19], dengan evaluasi kinerja berbasis simulasi. Kelima fase diterapkan sebagai berikut. (i) Analisis kebutuhan: kebutuhan fungsional (pengelompokan antrean otomatis dengan MLQ dan tampilan informasi real-time) dan kebutuhan nonfungsional (cepat, aman, stabil, dan mudah digunakan) diidentifikasi. (ii) Perancangan sistem: UML digunakan untuk memodelkan alur kerja, serta basis data dan antarmuka pengguna (halaman pengambilan tiket, monitor tampilan, dan dasbor petugas) dirancang. (iii) Implementasi: aplikasi web

dibangun, basis data diintegrasikan, algoritma MLQ diimplementasikan, dan pertukaran data real-time antara nasabah dan petugas dipastikan. (iv) Pengujian: pengujian black-box [20] ditetapkan untuk memverifikasi bahwa fungsi seperti pencetakan tiket berdasarkan kategori dan urutan pemanggilan prioritas berjalan sesuai rencana. (v) Pemeliharaan: direncanakan setelah penerapan dan tidak dievaluasi dalam penelitian ini. Karena belum ada data waktu tunggu yang tercatat di kantor cabang, kinerja antrean dievaluasi melalui tiga eksperimen simulasi (Bagian 2.5), pendekatan yang juga digunakan untuk antrean bank pada [21].

2.2. Skenario simulasi dan sumber data

Data kualitatif dikumpulkan melalui (a) observasi langsung terhadap proses antrean di Bank Mandiri Taspen KC Medan untuk memahami alur layanan dan kendalanya, (b) wawancara dengan staf operasional untuk mengidentifikasi hambatan, dan (c) studi literatur tentang MLQ dan sistem informasi berbasis web. Karena catatan antrean di kantor cabang masih berbasis kertas dan belum didigitalkan, tidak tersedia data kuantitatif empiris. Evaluasi kuantitatif karena itu memakai skenario simulasi terkonstruksi (bukan sampel empiris) berisi 14 nasabah (Tabel 2), yang dibuat dari pengamatan alur layanan dan perkiraan pola kedatangan. Pembentukan nilainya adalah sebagai berikut. Waktu kedatangan dibuat berjarak tetap satu menit (08:30–08:43) untuk meniru lonjakan kunjungan jam sibuk. Kategori dan jenis layanan nasabah dipilih agar keempat level terwakili dengan komposisi A:B:C:D = 3:3:5:3. Estimasi waktu layanan (3–11 menit) ditetapkan menurut jenis layanan: transaksi teller 3–7 menit dan urusan customer service 5–11 menit. Estimasi waktu layanan dan pola kedatangan tersebut merupakan perkiraan penulis yang mengacu pada pengamatan langsung alur layanan dan wawancara dengan staf operasional, bukan hasil pengukuran waktu layanan atau penghitungan kedatangan dengan pencatat waktu. Nilai-nilai ini karena itu diperlakukan sebagai asumsi pemodelan, dan pengaruhnya terhadap kesimpulan diuji melalui analisis sensitivitas pada Eksperimen C (Bagian 2.5). Karena skenario ini terkonstruksi dan hanya berisi satu realisasi, ia dipakai sebagai ilustrasi kebijakan (*proof of concept*) dan dilengkapi dengan simulasi stokastik berulang pada Bagian 2.5.

Tabel 2. Skenario simulasi terkonstruksi (14 nasabah) berdasarkan urutan kedatangan, beserta kode tiket

No.	Tiba	Kebutuhan nasabah	Estimasi layanan (menit)	Tiket
1	08:30	Pensiunan lansia (penarikan tunai)	6	A001
2	08:31	Setoran tunai umum	4	C001
3	08:32	Penyandang disabilitas (cek saldo)	7	A002
4	08:33	Pembukaan rekening pensiun (lansia)	9	B001
5	08:34	Penarikan tunai reguler	3	C002
6	08:35	Ibu hamil (setoran tunai)	5	A003
7	08:36	Transfer antarbank	4	C003
8	08:37	Keluhan pemblokiran kartu ATM (umum)	11	D001
9	08:38	Setoran tunai umum	3	C004
10	08:39	Pensiunan lansia (cetak buku tabungan)	6	B002
11	08:40	Pengajuan kredit pensiun (umum)	8	D002
12	08:41	Penarikan tunai reguler	4	C005
13	08:42	Penyandang disabilitas (pembukaan rekening)	10	B003
14	08:43	Perbaikan PIN ATM (umum)	5	D003

2.3. Prapemrosesan data

Setiap catatan dimasukkan ke salah satu dari empat level menurut kategori nasabah dan jenis layanan (Tabel 3). Nasabah prioritas (lansia, penyandang disabilitas, dan ibu hamil) ditempatkan pada level A untuk transaksi teller atau level B untuk urusan customer service; semua nasabah lainnya ditempatkan pada level C (teller) atau level D (customer service). Kode tiket menggabungkan prefiks level dan nomor urut dalam level tersebut (mis., A001), dan waktu kedatangan dikonversi ke menit untuk menghitung waktu tunggu.

Tabel 3. Level antrian dan skor prioritas pada model MLQ yang diusulkan

Level	Prefiks	Nasabah dan layanan	Skor prioritas (P)
Prioritas Teller	A	Nasabah lansia, penyandang disabilitas, dan ibu hamil; transaksi teller (mis., penarikan, setoran)	4
Prioritas Customer Service	B	Nasabah lansia, penyandang disabilitas, dan ibu hamil; urusan customer service (mis., pembukaan rekening, cetak buku tabungan)	3
Teller Reguler	C	Nasabah umum; transaksi teller (mis., setoran, penarikan, transfer)	2
Customer Service Reguler	D	Nasabah umum; urusan customer service (mis., keluhan, pengajuan kredit, perbaikan PIN)	1

2.4. Model yang diusulkan

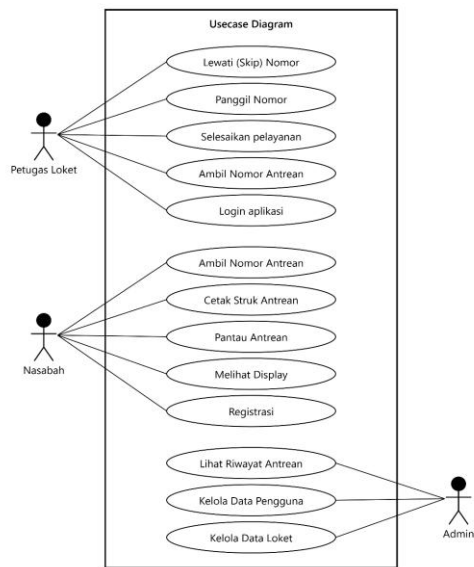
Model MLQ yang diusulkan terdiri dari tiga aturan. Aturan 1 (prioritas tetap antarlevel): setiap level memiliki skor prioritas statis, $P_A > P_B > P_C > P_D$ (Tabel 3). Ketika sebuah konter kosong, sistem memilih antrian Q dengan skor tertinggi di antara himpunan Ω antrian yang masih memiliki nasabah menunggu:

$$Q = \arg \max_{i \in \Omega} P_i \quad (1)$$

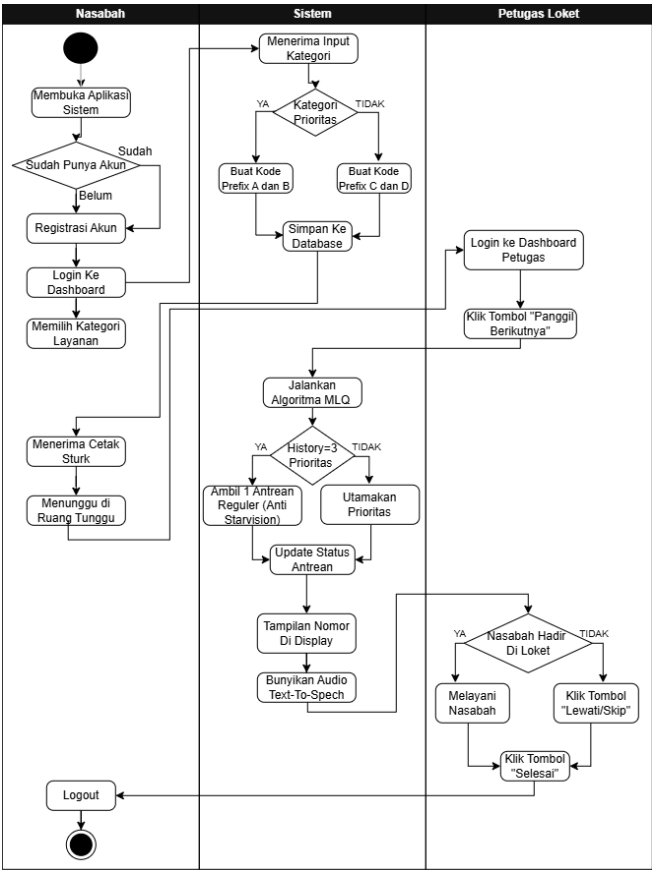
Aturan 2 (FCFS dalam satu level): dalam antrian terpilih Q_k , nasabah dengan stempel waktu kedatangan paling awal dipanggil:

$$N_{\text{call}} = \arg \min_{n \in Q_k} T_{\text{arr}}(n) \quad (2)$$

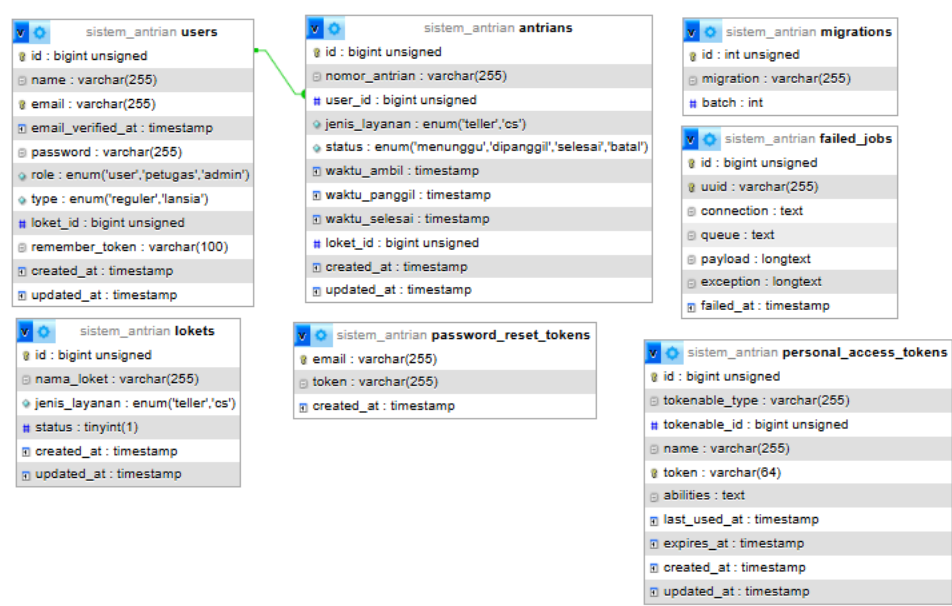
Aturan 3 (anti-starvation, parameter K): misalkan c adalah jumlah panggilan prioritas berturut-turut (level A dan B) pada suatu konter. Jika $c = K$ dan ada nasabah reguler yang dapat dilayani konter tersebut, sistem memanggil nasabah tertua pada antrian reguler tidak kosong dengan prioritas tertinggi (C sebelum D) dan mengatur ulang c menjadi 0; jika tidak, Aturan 1 dan 2 berlaku. Layanan bersifat non-preemptive, sehingga nasabah yang sedang dilayani tidak pernah diinterupsi. Secara operasional, selama kedua kelompok sama-sama menunggu, nasabah prioritas menerima paling banyak $K/(K+1)$ dari seluruh panggilan: 50% untuk $K=1$, 67% untuk $K=2$, 75% untuk $K=3$, dan 80% untuk $K=4$. Pada skenario simulasi, nasabah prioritas berjumlah 6 dari 14 (43%), sehingga $K=3$ memberi ruang bagi kelompok prioritas untuk mengejar antrian yang menumpuk tanpa membuat nasabah reguler menunggu tanpa batas. Nilai $K=3$ ditetapkan sebagai nilai awal, bukan nilai optimal; kelayakannya dievaluasi melalui analisis sensitivitas dan kriteria keadilan pada Bagian 2.6 dan 3. Sistem memiliki tiga aktor (Gbr. 1). Petugas konter memanggil, melewati, dan menyelesaikan layanan nasabah; nasabah mengambil, mencetak, dan memantau nomor antrian serta melihat layar tampilan; dan admin mengelola data pengguna dan konter serta meninjau riwayat antrian. Alur aktivitas ditunjukkan pada Gbr. 2: nasabah membuka aplikasi, mendaftar atau masuk, dan memilih kategori layanan; sistem membuat kode tiket menurut tipe prioritas (prefiks A/B) atau tipe reguler (prefiks C/D) dan menyimpannya di basis data; ketika petugas menekan “Call Next”, sistem menjalankan algoritma MLQ, memperbarui status antrian, dan menampilkan nomor pada layar disertai pengumuman text-to-speech; petugas kemudian melayani atau melewati nasabah dan menekan “Finish”. Basis data (Gbr. 3) berisi tabel *users* (peran: user, officer, atau admin; tipe nasabah: reguler atau lansia), *lokets* (nama konter, jenis layanan teller atau customer service, dan status), dan *antrians* (nomor antrian, jenis layanan, status menunggu, dipanggil, selesai, atau dibatalkan, serta stempel waktu pengambilan, pemanggilan, dan penyelesaian), beserta tabel pendukung bawaan kerangka kerja.



Gambar 1. Diagram use case sistem antrean



Gambar 2. Diagram aktivitas sistem yang diusulkan



Gambar 3. Entity relationship diagram (ERD) sistem antrian

2.5. Pengaturan eksperimen

Tiga kebijakan dibandingkan pada seluruh eksperimen: (a) FCFS, garis dasar konvensional yang mengabaikan kategori nasabah; (b) MLQ ketat (Aturan 1 dan 2); dan (c) MLQ dengan anti-starvation (Aturan 1–3; $K = 3$ kecuali disebutkan lain). Tiga eksperimen dijalankan. Eksperimen A (skenario deterministik): 14 nasabah pada Tabel 2 dilayani oleh satu titik layanan gabungan, mulai pukul 08:30, non-preemptive, dengan waktu layanan sama dengan estimasi; jadwal MLQ ketat diperiksa silang secara manual (Bagian 3). Eksperimen A hanya satu realisasi dan dipakai sebagai ilustrasi kebijakan. Eksperimen B (simulasi stokastik berulang): model pembangkit acak yang dikalibrasi pada skenario Tabel 2 (Tabel 4), dijalankan 2.000 replikasi per pengaturan dengan bilangan acak yang sama untuk ketiga kebijakan. Eksperimen B1 mengulang lonjakan 14 kedatangan (satu per menit) dengan level dan waktu layanan diacak; Eksperimen B2 memakai kedatangan Poisson selama 180 menit pada konfigurasi dasar (dua konter terpisah, $\lambda = 0,20$ nasabah/menit, CV waktu layanan = 0,5). Eksperimen C (analisis sensitivitas): satu faktor diubah pada satu waktu terhadap B2, yaitu intensitas kedatangan ($\lambda = 0,10; 0,15; 0,20; 0,25$), variabilitas waktu layanan (CV = 0; 0,5; 1,0), konfigurasi konter (satu konter gabungan, dua konter gabungan, dan dua konter terpisah yaitu teller untuk level A dan C serta customer service untuk level B dan D, sesuai struktur kantor cabang), dan ambang K (1 sampai 5 serta tak hingga, yaitu MLQ ketat). Pada dua konter terpisah, Aturan 1–3 berlaku pada masing-masing konter: A didahulukan atas C di konter teller, dan B atas D di konter customer service. Eksperimen A dengan satu konter gabungan merupakan penyederhanaan struktur cabang, sehingga klaim dari Eksperimen A dibatasi pada ilustrasi satu konter; struktur cabang yang sebenarnya dimodelkan pada Eksperimen B dan C. Jadwal dihitung dengan skrip berbasis peristiwa (*event-driven*). Kasus uji black-box didefinisikan untuk penerbitan tiket menurut kategori, urutan pemanggilan prioritas, aksi lewati dan selesai, serta pembaruan tampilan.

Tabel 4. Parameter model simulasi stokastik

Parameter	Nilai	Dasar penetapan
Proses kedatangan	Poisson dengan $\lambda = 0,10\text{--}0,25$ nasabah/menit selama 180 menit (dasar 0,20); lonjakan: 14 kedatangan, satu per menit	Asumsi pemodelan untuk sensitivitas; bukan hasil pengukuran lapangan
Komposisi level (A:B:C:D)	3:3:5:3 (dipilih acak per nasabah)	Proporsi pada skenario Tabel 2
Rata-rata waktu layanan (menit)	A 6,0; B 8,3; C 3,6; D 8,0	Rata-rata estimasi per level pada Tabel 2

Parameter	Nilai	Dasar penetapan
Distribusi waktu layanan	Gamma dengan koefisien variasi (CV) 0 (deterministik), 0,5 (dasar), dan 1,0	Asumsi pemodelan; CV = 1,0 setara distribusi eksponensial
Konfigurasi konter	Satu gabungan; dua gabungan; dua terpisah (teller: A, C; customer service: B, D)	Dua terpisah mencerminkan struktur cabang
Ambang anti-starvation K	1, 2, 3, 4, 5, dan tak hingga (MLQ ketat); dasar 3	Lihat Bagian 2.4 dan 3
Replikasi	2.000 per pengaturan; bilangan acak sama untuk semua kebijakan	Mengurangi variansi perbandingan antarkebijakan

2.6. Metrik evaluasi

Waktu tunggu nasabah n adalah selisih antara waktu layanan dimulai dan waktu kedatangan:

$$W_n = T_{\text{start}}(n) - T_{\text{arr}}(n) \quad (3)$$

Rata-rata waktu tunggu (AWT) suatu kelompok G nasabah (satu level, kelompok prioritas A+B, kelompok reguler C+D, atau semua nasabah) adalah:

$$AWT_G = \frac{1}{|G|} \sum_{n \in G} W_n \quad (4)$$

Pada Eksperimen B dan C, rata-rata dilaporkan sebagai rata-rata dari rata-rata per replikasi dengan selang kepercayaan 95% (CI95) antarreplikasi, sedangkan median, persentil ke-90 (P90), dan persentil ke-95 (P95) dihitung dari seluruh nasabah gabungan antarreplikasi. Karena rata-rata dapat menyembunyikan ekor distribusi, P90 dan P95 digunakan untuk menilai kasus terburuk yang lazim; waktu tunggu maksimum hanya dilaporkan pada Eksperimen A. Kriteria keadilan tingkat kategori didefinisikan secara eksplisit dengan dua syarat. F1 (layanan prioritas): paling sedikit 90% nasabah prioritas menunggu tidak lebih dari 15 menit; ambang 15 menit mengacu pada batas toleransi yang dilaporkan dalam [5]. F2 (perlindungan nasabah reguler): P95 waktu tunggu kelompok reguler tidak melebihi 1,5 kali P95 kelompok reguler pada FCFS, yaitu penurunan layanan reguler dibatasi sampai 50%. Nilai 90% dan 1,5 kali adalah parameter kebijakan yang ditetapkan penulis sebagai ilustrasi dan harus ditetapkan oleh manajemen bank. Rasio disparitas (rata-rata reguler dibagi rata-rata prioritas) dilaporkan sebagai pelengkap. Perubahan relatif terhadap FCFS dihitung sebagai $(AWT_{\text{FCFS}} - AWT_{\text{kebijakan}})/AWT_{\text{FCFS}} \times 100\%$, dengan nilai negatif menunjukkan waktu tunggu yang lebih lama.

3. HASIL

3.1 Eksperimen A: skenario simulasi deterministik (14 nasabah)

Contoh perhitungan. Pada pukul 08:36 konter selesai melayani A001 (mulai 08:30, 6 menit). Enam nasabah kemudian menunggu: C001 (tiba 08:31), A002 (08:32), B001 (08:33), C002 (08:34), A003 (08:35), dan C003 (08:36). Aturan 1 memilih antrean dengan skor tertinggi, dan karena $P_A > P_C$ sistem memanggil A002 pada pukul 08:36 meskipun C001 tiba lebih awal. Waktu tunggu A002 adalah $W = 08:36 - 08:32 = 4$ menit, sedangkan C001 baru dipanggil pukul 09:13 setelah level A dan B kosong, sehingga $W = 42$ menit. Untuk level A, $AWT = (0 + 4 + 8)/3 = 4,00$ menit. Dalam level A, Aturan 2 memanggil No. 1 (08:30), lalu No. 3 (08:32), lalu No. 6 (08:35), yaitu A001, A002, dan A003 sesuai urutan kedatangan.

Tabel 5. Urutan layanan dan waktu tunggu pada MLQ ketat (skenario deterministik)

Urutan	Tiket	Tiba	Mulai	Selesai	W_n (menit)
1	A001	08:30	08:30	08:36	0
2	A002	08:32	08:36	08:43	4
3	A003	08:35	08:43	08:48	8
4	B001	08:33	08:48	08:57	15
5	B002	08:39	08:57	09:03	18
6	B003	08:42	09:03	09:13	21
7	C001	08:31	09:13	09:17	42

Urutan	Tiket	Tiba	Mulai	Selesai	W_n (menit)
8	C002	08:34	09:17	09:20	43
9	C003	08:36	09:20	09:24	44
10	C004	08:38	09:24	09:27	46
11	C005	08:41	09:27	09:31	46
12	D001	08:37	09:31	09:42	54
13	D002	08:40	09:42	09:50	62
14	D003	08:43	09:50	09:55	67

Tabel 6 membandingkan ketiga kebijakan pada skenario ini. Pada MLQ, rata-rata waktu tunggu kelompok prioritas turun dari 24,50 menjadi 11,00 menit (13,50 menit lebih singkat, atau 55,1% lebih singkat), dengan level A berkurang 62,5% dan level B 53,0%. Kelompok reguler menunggu lebih lama, dari 37,13 menjadi 50,50 menit (+36,0%). Rata-rata keseluruhan naik sedikit dari 31,71 menjadi 33,57 menit (+5,9%), dan ketiga kebijakan menyelesaikan nasabah terakhir pada pukul 09:55 karena beban kerja yang dikerjakan sama. Dengan aturan anti-starvation, rata-rata kelompok reguler turun menjadi 47,38 menit dan nasabah reguler pertama (C001) dilayani setelah 17 menit, bukan 42, sementara rata-rata kelompok prioritas naik menjadi 13,00 menit. Karena hanya satu realisasi, hasil ini tidak menunjukkan ketahanan; ketahanan dinilai pada Eksperimen B dan C.

Tabel 6. Rata-rata waktu tunggu (menit) skenario deterministik menurut kebijakan; persentase menunjukkan perubahan terhadap FCFS (+ = lebih singkat, - = lebih lama)

Kelompok	FCFS	MLQ	Perubahan	MLQ + AS (K = 3)	Perubahan
Level A	10,67	4,00	-62,5%	4,00	-62,5%
Level B	38,33	18,00	-53,0%	22,00	-42,6%
Level C	30,20	44,20	+46,4%	39,20	+29,8%
Level D	48,67	61,00	+25,3%	61,00	+25,3%
Kelompok prioritas (A+B)	24,50	11,00	-55,1%	13,00	-46,9%
Kelompok reguler (C+D)	37,13	50,50	+36,0%	47,38	+27,6%
Semua nasabah	31,71	33,57	+5,9%	32,64	+2,9%
Waktu tunggu maksimum (menit)	67	67	0,0%	67	0,0%
Nasabah terakhir selesai	09:55	09:55	-	09:55	-

3.2 Eksperimen B: simulasi stokastik berulang

B1: replikasi skenario lonjakan. Pada 2.000 replikasi lonjakan 14 nasabah dengan satu konter gabungan (Tabel 7), rata-rata waktu tunggu prioritas turun dari 32,22 menjadi 13,94 menit pada MLQ ketat (56,7% lebih singkat) dan 15,88 menit pada MLQ + AS, sejalan dengan arah hasil deterministik; rata-rata reguler naik dari 32,94 menjadi 47,43 menit (MLQ) dan 42,99 menit (MLQ + AS). Pada konfigurasi dua konter terpisah, tunggu prioritas turun dari 13,84 menjadi 7,62 menit dan reguler naik dari 13,42 menjadi 19,90 menit. Pada lonjakan satu konter, hanya 57,4% nasabah prioritas menunggu paling lama 15 menit pada MLQ ketat (FCFS: 27,3%), sehingga F1 tidak terpenuhi pada kebijakan mana pun; lonjakan seperti pada skenario deterministik melampaui kapasitas satu konter, dan kebijakan prioritas hanya mengatur siapa yang menunggu, bukan menghilangkan penantian.

Tabel 7. Replikasi skenario lonjakan (14 kedatangan, 2.000 replikasi): waktu tunggu (menit)

Konfigurasi	Kebijakan	Kelompok	Rata-rata $\pm$ CI95	Median	P90	P95
Satu konter gabungan	FCFS	Prioritas	32,22 $\pm$ 0,44	31,44	63,30	70,57
		Reguler	32,94 $\pm$ 0,43	30,88	63,62	71,08
	MLQ ketat	Prioritas	13,94 $\pm$ 0,30	11,88	34,72	41,25

Konfigurasi	Kebijakan	Kelompok	Rata-rata $\pm$ CI95	Median	P90	P95
Dua konter terpisah	MLQ + AS (K = 3)	Reguler	47,43 $\pm$ 0,55	47,73	70,74	77,22
		Prioritas	15,88 $\pm$ 0,34	13,48	40,19	47,71
	FCFS	Reguler	42,99 $\pm$ 0,44	44,19	69,85	76,40
		Prioritas	13,84 $\pm$ 0,27	10,93	32,35	40,61
	MLQ ketat	Reguler	13,42 $\pm$ 0,23	10,49	30,08	37,95
		Prioritas	7,62 $\pm$ 0,20	5,63	20,33	25,91
	MLQ + AS (K = 3)	Reguler	19,90 $\pm$ 0,33	18,20	39,89	47,07
		Prioritas	8,47 $\pm$ 0,23	5,77	23,82	31,44
		Reguler	18,62 $\pm$ 0,30	17,17	37,64	44,95

B2: konfigurasi dasar (dua konter terpisah, $\lambda = 0,20$, CV = 0,5). Median waktu tunggu hanya sekitar satu menit pada semua kebijakan (Tabel 8), sehingga sebagian besar nasabah menunggu singkat dan perbedaan kebijakan terutama terlihat pada ekor distribusi. P95 waktu tunggu prioritas turun dari 25,71 menjadi 14,50 menit pada MLQ ketat (43,6% lebih singkat) dan 17,47 menit pada MLQ + AS (32,1%), dan persentase nasabah prioritas yang menunggu paling lama 15 menit naik dari 86,8% menjadi 95,4% dan 93,2%. Sebaliknya, P95 kelompok reguler naik dari 22,99 menjadi 35,51 menit (MLQ ketat; +54,4%) dan 32,83 menit (MLQ + AS; +42,8%). Rasio disparitas naik dari 0,87 pada FCFS menjadi 2,10 (MLQ ketat) dan 1,68 (MLQ + AS); nilai FCFS di bawah 1 muncul karena nasabah level B dilayani di konter customer service yang lebih padat, bukan karena kategori.

Tabel 8. Konfigurasi dasar (dua konter terpisah, $\lambda = 0,20$, CV = 0,5, 2.000 replikasi): waktu tunggu (menit)

Kebijakan	Kelompok	Rata-rata $\pm$ CI95	Median	P90	P95	% $\leq$ 15 menit
FCFS	Prioritas	5,58 $\pm$ 0,19	1,63	17,99	25,71	86,8
	Reguler	4,98 $\pm$ 0,16	1,07	15,65	22,99	–
MLQ ketat	Prioritas	3,30 $\pm$ 0,09	1,00	10,47	14,50	95,4
	Reguler	7,09 $\pm$ 0,27	1,10	22,67	35,51	–
MLQ + AS (K = 3)	Prioritas	3,79 $\pm$ 0,13	1,05	12,05	17,47	93,2
	Reguler	6,57 $\pm$ 0,24	1,08	21,25	32,83	–

3.3 Eksperimen C: analisis sensitivitas

Intensitas kedatangan. Pada $\lambda = 0,10$ (beban rendah) perbedaan antarkebijakan kecil: P90 prioritas 6,73 (FCFS) dan 5,74 menit (MLQ + AS). Pada $\lambda = 0,25$ manfaat bagi prioritas meningkat (P90 28,14 menjadi 16,17 menit), tetapi P95 reguler juga memburuk dari 35,13 menjadi 53,88 menit (Tabel 9). Variabilitas waktu layanan. Kenaikan CV memperpanjang waktu tunggu pada semua kebijakan, tetapi urutan kebijakan tidak berubah: pada CV = 1,0, P90 prioritas 26,79 (FCFS) dan 18,94 menit (MLQ + AS), sedangkan P95 reguler 35,01 dan 48,22 menit. Konfigurasi konter ($\lambda = 0,15$): pada satu konter gabungan beban sangat tinggi (P95 reguler 50,04 menjadi 78,15 menit), pada dua konter gabungan semua waktu tunggu kecil (P95 di bawah 8 menit) dan kebijakan prioritas nyaris tidak berpengaruh, dan pada dua konter terpisah hasilnya berada di antara keduanya. Dengan demikian, manfaat kebijakan prioritas paling besar ketika kapasitas ketat, dan biayanya bagi nasabah reguler mengikuti besarnya manfaat tersebut.

Tabel 9. Sensitivitas terhadap intensitas kedatangan, variabilitas waktu layanan, dan konfigurasi konter: P90 prioritas dan P95 reguler (menit)

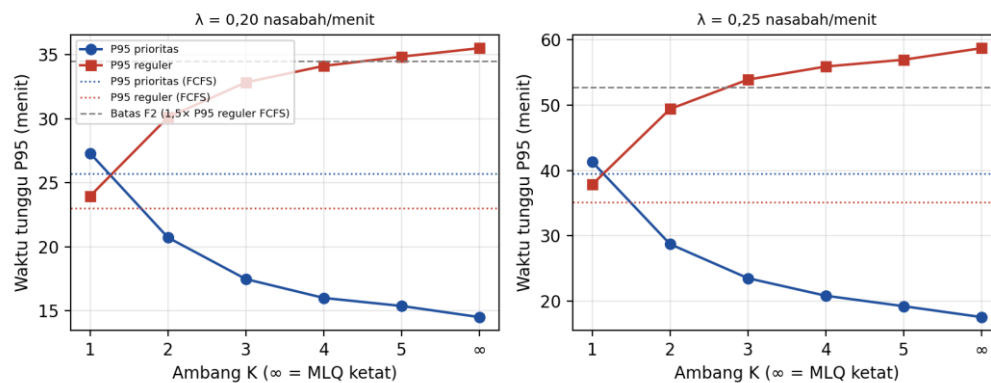
Faktor	Nilai	P90 priori- tas: FCFS	MLQ	MLQ + AS	P95 regul- er: FCFS	MLQ	MLQ + AS
Intensitas λ	0,10	6,73	5,65	5,74	9,72	11,32	11,11
	0,15	11,00	7,89	8,38	14,63	20,19	18,98
	0,20	17,99	10,47	12,05	22,99	35,51	32,83
	0,25	28,14	12,98	16,17	35,13	58,68	53,88
CV waktu layanan	0,0	14,50	7,70	8,70	18,61	29,55	27,01
	0,5	17,99	10,47	12,05	22,99	35,51	32,83
	1,0	26,79	16,91	18,94	35,01	52,31	48,22
Konfigurasi ($\lambda = 0,15$)	Satu konter gabungan	38,07	14,29	17,25	50,04	83,05	78,15
	Dua konter gabungan	4,05	2,89	3,00	6,66	7,76	7,45
	Dua konter terpisah	11,00	7,89	8,38	14,63	20,19	18,98

Ambang K dan kriteria keadilan. Tabel 10 dan Gbr. 4 menunjukkan bahwa meningkatkan K menurunkan waktu tunggu prioritas dan menaikkan ekor distribusi reguler secara monoton. $K = 1$ hampir sama dengan FCFS (pada $\lambda = 0,20$, P95 prioritas 27,30 menit berbanding 25,71 pada FCFS) dan gagal memenuhi F1 ($87,1\% < 90\%$). Pada $\lambda = 0,20$, $K = 2, 3$, dan 4 memenuhi F1 dan F2, sedangkan $K = 5$ dan MLQ ketat gagal pada F2 (P95 reguler 34,84 dan 35,51 menit berbanding batas 34,49 menit). Pada $\lambda = 0,25$ tidak ada nilai K yang memenuhi kedua syarat: $K \leq 3$ gagal pada F1 dan $K \geq 3$ gagal pada F2. $K = 3$ karena itu berada dalam rentang layak pada beban dasar, tetapi bukan satu-satunya nilai layak, dan pada beban lebih tinggi kapasitas (konter atau petugas) perlu ditambah karena kebijakan antrian saja tidak cukup.

Tabel 10. Sensitivitas terhadap ambang K (dua konter terpisah, CV = 0,5) dan pemenuhan kriteria keadilan F1 dan F2

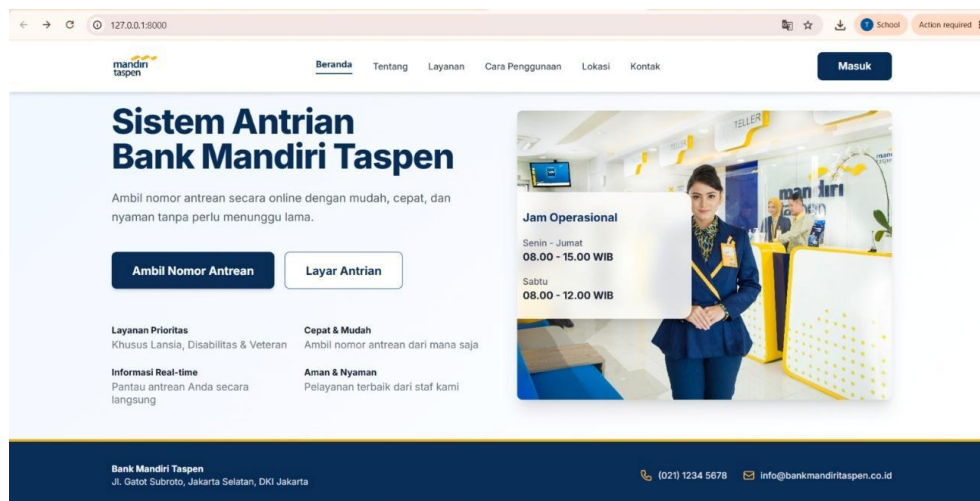
λ	K	Rata ² prioritas	P90 priorita- s	% ≤ 15 menit	Rata ² reguler	P95 reguler	F1	F2
0,20	FCFS	5,58	17,99	86,8	4,98	22,99	–	–
	1	5,46	17,94	87,1	4,96	23,95	Tida k	Ya
	2	4,29	13,82	91,2	6,07	30,11	Ya	Ya
	3	3,79	12,05	93,2	6,57	32,83	Ya	Ya
	4	3,56	11,25	94,2	6,81	34,12	Ya	Ya
	5	3,44	10,84	94,8	6,94	34,84	Ya	Tida k
	∞ (MLQ ketat)	3,30	10,47	95,4	7,09	35,51	Ya	Tida k
0,25	FCFS	9,33	28,14	77,0	8,36	35,13	–	–
	1	9,03	28,28	78,3	8,46	37,84	Tida k	Ya
	2	6,44	19,66	85,3	10,86	49,39	Tida k	Ya
	3	5,45	16,17	88,7	11,82	53,88	Tida k	Tida k
	4	4,99	14,59	90,5	12,26	55,88	Ya	Tida k

λ	K	Rata ² prioritas	P90 prioritas	% ≤ 15 menit	Rata ² reguler	P95 reguler	F1	F2
5		4,76	13,85	91,4	12,50	56,92	Ya	Tidak
∞ (MLQ ketat)		4,45	12,98	92,6	12,82	58,68	Ya	Tidak

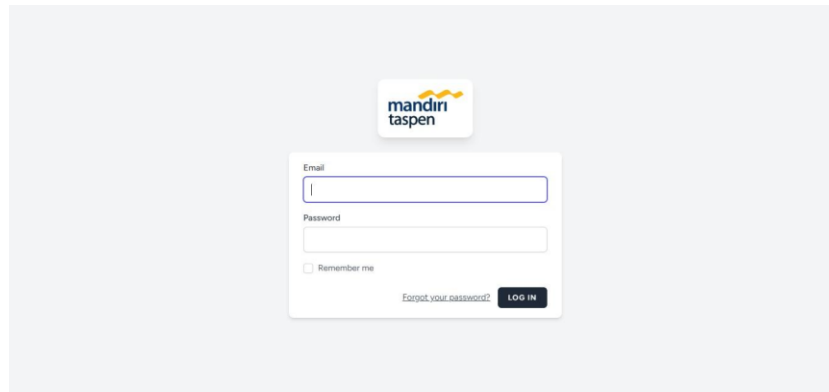


Gambar 4. Trade-off ambang K: P95 waktu tunggu prioritas dan reguler pada $\lambda = 0,20$ dan $0,25$ (garis putus-putus abu-abu: batas F2)

Sistem berbasis web diimplementasikan mengikuti rancangan di atas. Halaman beranda (Gbr. 5) menawarkan dua tombol utama, “Take Queue Number” dan “Queue Screen”, menampilkan jam operasional, dan menonjolkan layanan prioritas bagi lansia, penyandang disabilitas, dan veteran, pengambilan nomor dari mana saja, pemantauan antrian secara real-time, dan layanan yang aman. Halaman login (Gbr. 6) mengautentikasi pengguna dengan e-mail dan kata sandi, menyediakan opsi Remember Me dan pemulihan kata sandi, serta melindungi akses ke sistem antrian.



Gambar 5. Halaman beranda



Gambar 6. Halaman login

Setelah login, nasabah memilih salah satu dari empat kategori layanan (Gbr. 7): A Priority Teller, B Priority Customer Service, C Regular Teller, atau D Regular Customer Service. Setiap kategori memiliki jalur antreannya sendiri, sehingga antrean dari kategori yang berbeda tidak bercampur. Sistem kemudian membuat nomor antrean untuk kategori yang dipilih, misalnya B-001 (Gbr. 8), menyimpannya di basis data, dan menempatkannya pada antrean yang sesuai, yang merupakan langkah implementasi pertama metode MLQ.



Gambar 7. Halaman pemilihan kategori layanan



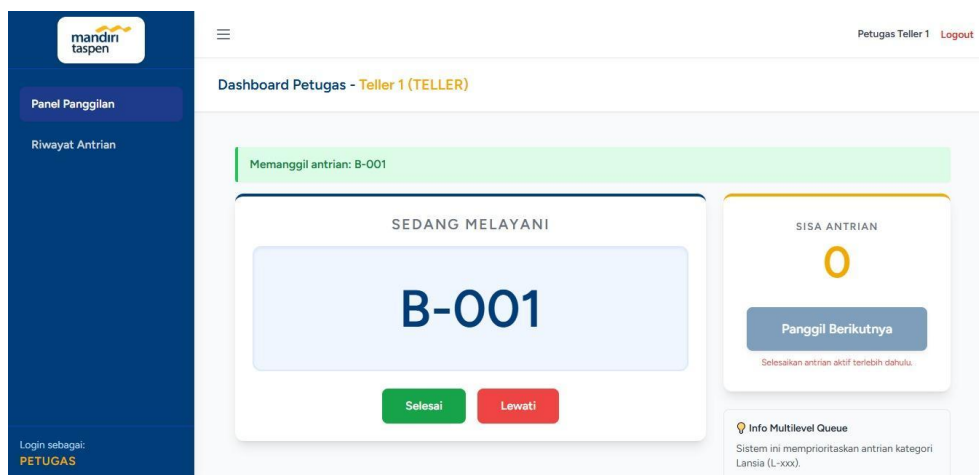
Gambar 8. Halaman pengambilan nomor antrean

Layar monitor (Gbr. 9) menampilkan nomor yang sedang dilayani beserta konternya, riwayat panggilan terbaru, dan waktu saat ini secara real-time, serta mengumumkan setiap panggilan dengan text-to-speech. Dasbor admin (Gbr. 10) merangkum jumlah antrean harian, layanan yang selesai, serta nasabah prioritas

dan reguler, menampilkan status konter dan petugas serta log antrian terbaru, dan menyediakan menu untuk mengelola petugas, nasabah, konter, dan laporan antrian.

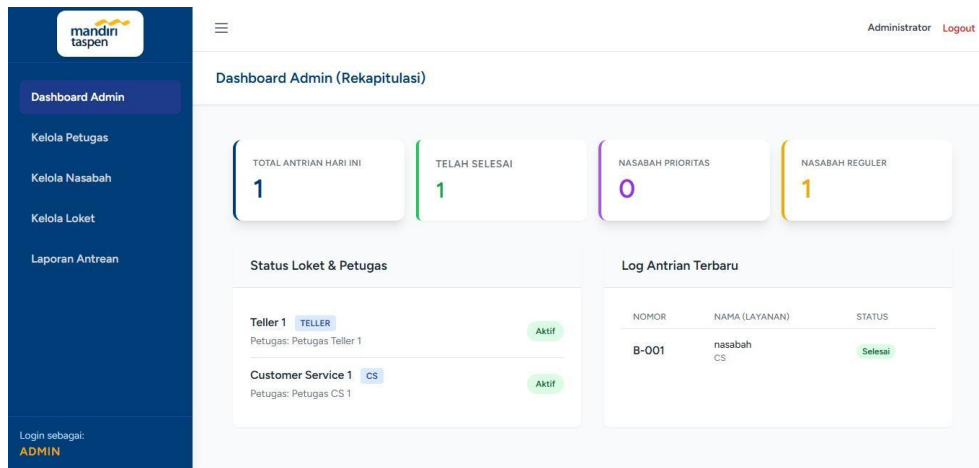


Gambar 9. Tampilan monitor pemanggilan antrian



Gambar 10. Dasbor admin

Panel petugas (Gbr. 11) mengelola layanan pada satu konter: menampilkan nomor yang sedang dilayani (B-001 di Konter 1), jumlah antrian yang tersisa, dan tombol “Call Next”, “Finish”, dan “Skip”. MLQ diterapkan ketika petugas menekan “Call Next”: sistem memeriksa setiap kelompok antrian, memilih antrian tidak kosong dengan prioritas tertinggi (Aturan 1), memanggil nasabah paling awal di dalamnya (Aturan 2), dan menerapkan aturan anti-starvation (Aturan 3), sehingga nasabah prioritas dilayani lebih cepat tanpa memblokir kategori lain secara tak terbatas.



Gambar 11. Panel petugas

Kasus uji black-box [20] untuk fungsi utama sistem dirangkum pada Tabel 11. Hasil aktual dan status setiap kasus uji ditampilkan pada dua kolom terakhir.

Tabel 11. Kasus uji black-box sistem antrian

Kasus uji	Masukan	Hasil yang diharapkan	Hasil aktual	Status
TC-01 Penerbitan tiket menurut kategori	Nasabah memilih kategori A, B, C, atau D	Tiket berprefiks sesuai kategori (mis., B-001) dibuat, disimpan di basis data dengan status menunggu, dan masuk ke antrian kategori tersebut	Tiket A, B, C, dan D terbuat sesuai kategori (mis., B-001), tersimpan di basis data dengan status menunggu, dan masuk ke antrian yang benar	Berhasil
TC-02 Penomoran urut dalam level	Dua nasabah berturut-turut memilih kategori A	Nomor urut bertambah dalam level yang sama (A-001, lalu A-002)	Nomor bertambah urut: A-001, lalu A-002	Berhasil
TC-03 Prioritas antarlevel (Aturan 1)	Nasabah C menunggu lebih dahulu, kemudian nasabah A datang; petugas teller menekan "Call Next"	Nasabah level A dipanggil lebih dahulu daripada nasabah level C meskipun C datang lebih awal	Nasabah A dipanggil lebih dulu daripada nasabah C, walaupun C datang lebih awal	Berhasil
TC-04 FCFS dalam level (Aturan 2)	Dua nasabah level A menunggu; petugas menekan "Call Next"	Nasabah level A dengan waktu kedatangan paling awal dipanggil lebih dahulu	Nasabah level A yang datang paling awal dipanggil lebih dulu	Berhasil
TC-05 Anti-starvation (Aturan 3, K = 3)	Tiga panggilan prioritas berturut-turut pada satu konter, sementara nasabah reguler menunggu; petugas menekan "Call Next" lagi	Panggilan ke-4 memanggil nasabah reguler tertua (C sebelum D) dan penghitung c diatur ulang menjadi 0	Setelah tiga panggilan prioritas, panggilan ke-4 memanggil nasabah reguler tertua, lalu hitungan c kembali ke 0	Berhasil

Kasus uji	Masukan	Hasil yang diharapkan	Hasil aktual	Status
TC-06 Aksi lewati	Petugas menekan “Skip” pada nomor yang sedang dipanggil	Status nomor diperbarui, nomor tersebut tidak lagi tampil sebagai sedang dilayani, dan “Call Next” memanggil nomor berikutnya	Nomor dilewati, status berubah, dan “Call Next” memanggil nomor berikutnya	Berhasil
TC-07 Aksi selesai	Petugas menekan “Finish” pada nomor yang sedang dilayani	Status menjadi selesai, stempel waktu penyelesaian tercatat, dan konter siap memanggil nomor berikutnya	Status menjadi selesai, waktu selesai tercatat, dan konter siap memanggil lagi	Berhasil
TC-08 Pembaruan layar monitor	Petugas menekan “Call Next”	Layar menampilkan nomor yang dipanggil beserta konter, riwayat panggilan diperbarui, dan nomor diumumkan dengan text-to-speech	Layar menampilkan nomor dan konter, riwayat panggilan bertambah, dan suara pengumuman terdengar	Berhasil
TC-09 Antrean kosong	Petugas menekan “Call Next” saat tidak ada nasabah menunggu	Sistem menampilkan informasi bahwa tidak ada antrean tanpa menimbulkan kesalahan	Muncul pesan bahwa tidak ada antrean, dan tidak terjadi kesalahan	Berhasil

4. PEMBAHASAN

Cakupan bukti dan validitas eksternal. Seluruh angka kinerja dalam artikel ini berasal dari simulasi: satu skenario deterministik terkonstruksi berisi 14 nasabah dan simulasi stokastik yang parameternya dikalibrasi pada skenario tersebut, bukan pada data tercatat di bank. Hasil ini menunjukkan perilaku model antrean di bawah asumsi yang dinyatakan, bukan peningkatan layanan yang terukur di Bank Mandiri Taspen. Belum ada pengukuran lapangan waktu tunggu setelah penerapan, serta hasil pengujian black-box dan evaluasi penerimaan pengguna belum dilaporkan. Validitas eksternal baru dapat dinyatakan setelah uji coba lapangan dengan stempel waktu tercatat. Simulasi menunjukkan bahwa MLQ memindahkan waktu tunggu dari nasabah prioritas ke nasabah reguler alih-alih menghilangkannya. Pada skenario deterministik, rata-rata prioritas turun 55,1% sementara rata-rata reguler naik 36,0%; arah yang sama muncul pada replikasi lonjakan (B1) dan pada konfigurasi dasar (B2), sehingga arah temuan ini tidak bergantung pada satu realisasi. Karena layanan bersifat non-preemptive dan semua kebijakan memproses beban kerja yang sama, rata-rata keseluruhan hampir tidak berubah (Tabel 6 dan 8; mis., 5,24 menjadi 5,41 menit pada B2). MLQ karena itu dinilai dari keadilan bagi nasabah rentan, bukan dari total throughput. Median waktu tunggu yang hanya sekitar satu menit pada B2 menunjukkan bahwa rata-rata saja menyesatkan; P90 dan P95 lebih informatif untuk kasus terburuk yang lazim.

Aturan anti-starvation meredam beban bagi nasabah reguler. Pada B2, $K = 3$ menurunkan P95 reguler dari 35,51 (MLQ ketat) menjadi 32,83 menit dengan harga P95 prioritas yang naik dari 14,50 menjadi 17,47 menit. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa pemilihan K adalah trade-off yang bergantung beban: $K = 3$ berada dalam rentang yang memenuhi kriteria F1 dan F2 pada $\lambda = 0,20$ (bersama $K = 2$ dan 4), tetapi tidak ada K yang memenuhinya pada $\lambda = 0,25$. Oleh karena itu $K = 3$ tidak diklaim optimal atau berlaku umum; K sebaiknya menjadi parameter yang dapat diatur admin dan ditetapkan ulang berdasarkan data lapangan dan kebijakan layanan bank. Kriteria F1 dan F2 pun merupakan parameter kebijakan ilustratif, dan kriteria keadilan lain (misalnya batas maksimum atau bobot kategori) dapat dipilih. Dibandingkan dengan sistem antrean bank sebelumnya, yang mendigitalkan penerbitan tiket dan pemantauan tetapi melayani nasabah berdasarkan FIFO/FCFS [6], [11], [12], sistem yang diusulkan menambahkan prioritas otomatis berdasarkan kategori nasabah. Sistem ini mengikuti penggunaan MLQ dan antrean prioritas pada klinik, sekolah, logistik, dan rumah sakit [13]–[16] dan menangani risiko starvation pada prioritas ketat [17] dengan aturan sederhana berbasis penghitung alih-alih mekanisme umpan balik; perbandingan pada Tabel 1 dibatasi oleh informasi pada abstrak yang ditelaah. Seperti

penelitian-penelitian yang dirangkum pada [5], bukti kami berasal dari kasus yang sempit; tinjauan [5] juga mengidentifikasi literasi digital yang rendah sebagai hambatan, yang penting bagi pensiunan, sehingga pengambilan tiket dengan bantuan staf atau di lokasi sebaiknya melengkapi antarmuka web.

Keterbatasan lain adalah sebagai berikut. Model memakai waktu kedatangan Poisson dan waktu layanan Gamma yang parameternya dikalibrasi pada 14 nasabah terkonstruksi, tanpa pola kedatangan harian, tanpa nasabah yang tidak hadir atau membatalkan, dan dengan komposisi level tetap. Eksperimen A memakai satu konter gabungan, sehingga klaimnya dibatasi pada ilustrasi; struktur dua konter dimodelkan pada Eksperimen B dan C, tetapi belum mencakup variasi jumlah petugas per konter atau pergeseran petugas antarkonter. Sistem juga belum memiliki estimasi waktu tunggu, notifikasi ke perangkat pribadi nasabah, dan integrasi dengan sistem bank lainnya. Penelitian selanjutnya sebaiknya mengumpulkan stempel waktu tercatat dalam uji coba lapangan, menganalisis model dengan teori antrean (misalnya antrean prioritas non-preemptive), mengevaluasi ambang K secara adaptif terhadap beban, serta menambahkan prediksi waktu tunggu, notifikasi SMS atau WhatsApp, dan aplikasi seluler.

5. KESIMPULAN

Sistem antrean nasabah berbasis web dengan konfigurasi Multilevel Queue empat level dan aturan anti-starvation telah dirancang dan diimplementasikan untuk Bank Mandiri Taspen KC Medan; kontribusinya adalah integrasi aplikasi dan kebijakan, bukan algoritma MLQ baru. Dalam simulasi, bukan pengukuran lapangan, MLQ menurunkan waktu tunggu nasabah prioritas dan menaikkan waktu tunggu nasabah reguler: pada skenario terkonstruksi 14 nasabah, rata-rata prioritas turun 55,1%, dan pada simulasi stokastik dua konter, P95 prioritas turun dari 25,71 menjadi 17,47 menit dengan $K = 3$ sementara P95 reguler naik dari 22,99 menjadi 32,83 menit. Ambang $K = 2-4$ memenuhi kriteria keadilan ilustratif pada $\lambda = 0,20$, tetapi tidak ada K yang memenuhinya pada $\lambda = 0,25$, sehingga K perlu dapat diatur dan kapasitas perlu dipertimbangkan pada beban tinggi. Hasil ini belum merupakan bukti peningkatan layanan di bank; validasi dengan data lapangan, estimasi waktu tunggu, dan notifikasi ke perangkat pribadi nasabah masih menjadi pekerjaan selanjutnya.

KONTRIBUSI PENULIS

Esti Kurnia Dara: Konseptualisasi, Metodologi, Perangkat Lunak, Investigasi, Penulisan – Draf Awal. Tengku Khairul Rifaldi: Perangkat Lunak, Validasi, Analisis Formal, Investigasi, Penulisan – Draf Awal. Triase: Konseptualisasi, Validasi, Peninjauan & Penyuntingan, Supervisi.

UCAPAN TERIMA KASIH (Opsional)

Penulis berterima kasih kepada Bank Mandiri Taspen KC Medan atas kesempatan mengamati proses antrean selama kerja praktik.

PENDANAAN

Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

PERNYATAAN KETERSEDIAAN DATA

Data skenario simulasi disajikan pada Tabel 2 dan hasilnya pada Tabel 5–10. Parameter model simulasi stokastik disajikan pada Tabel 4; kode simulasi dan data pendukung lainnya tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian, penulisan, maupun publikasi artikel ini.

REFERENCES

- [1] Y. Alam, S. N. Azizah, and C. Caroline, "Digital transformation in banking management: Optimizing operational efficiency and enhancing customer experience," *IJMSIT*, vol. 5, no. 1, pp. 46–55, Jan. 2025, doi: 10.35870/ijmsit.v5i1.3646.

- [2] Y. Buhel and B. Ocheretko, "Digital transformation of the banking system: Innovations and impact on financial services," *Econ. Anal.*, vol. 34, no. 3, pp. 257–273, 2024, doi: 10.35774/econa2024.03.257.
- [3] K. Chauhan, "Digital transformation in banking and financial services," *IJIS*, pp. 7–11, Nov. 2025, doi: 10.63856/j0r9r068.
- [4] N. Masitoh, E. Rosidah, and A. Kurniawati, "Pengaruh layanan digital banking terhadap kepuasan nasabah pada PT Bank Negara Indonesia (Persero) Tbk Kantor Cabang Tasikmalaya" [The effect of digital banking services on customer satisfaction at PT Bank Negara Indonesia (Persero) Tbk, Tasikmalaya Branch Office], *BanKu: J. Perbank. Keuang.*, vol. 4, no. 1, pp. 11–16, 2023, doi: 10.37058/banku.v4i1.6812.
- [5] C. A. Tesa, M. S. Haris, and W. T. Kusuma, "An analysis of digital queuing systems in Indonesian banking services: A systematic literature review," *Int. J. Softw. Eng. Comput. Sci. (IJSECS)*, vol. 5, no. 2, pp. 724–732, Aug. 2025, doi: 10.35870/ijsecs.v5i2.4379.
- [6] A. Dinanti, J. R. Gultom, I. Z. Muchtar, and A. B. Hutabarat, "Perancangan dan implementasi website sistem antrian bank berbasis queue untuk efisiensi pelayanan nasabah" [Design and implementation of a queue-based bank queue system website for customer service efficiency], *Teknik: J. Ilmu Tek. Inform.*, vol. 5, no. 2, pp. 93–107, Oct. 2025, doi: 10.51903/teknik.v5i2.976.
- [7] A. Aisya, A. Bastio, D. Pandiangan, and D. Y. Niska, "Analisis dan implementasi sistem antrian digital berbasis web untuk optimalisasi layanan perbankan modern" [Analysis and implementation of a web-based digital queuing system for optimizing modern banking services], *TIN: Terap. Inform. Nasant.*, vol. 6, no. 7, pp. 981–991, Dec. 2025, doi: 10.47065/tin.v6i7.8705.
- [8] P. M. Husania, R. Chantika, and M. Furqan, "Analisis dan perancangan prototype sistem antrian online berbasis web untuk layanan bank" [Analysis and design of a web-based online queue system prototype for bank services], *J. Publ. Ilmu Komput. Multimed.*, vol. 4, no. 2, pp. 111–135, 2025, doi: 10.55606/jupikom.v4i2.4074.
- [9] S. Sampe, T. Purba, B. Satria, and M. R. Syahputera, "An integrated queue system with fingerprint recognition and scoring board in bank," *J. Scientia*, vol. 13, no. 3, pp. 291–301, 2024.
- [10] G. Germecca, N. A. Wardhani, and M. M. Dewi, "Implementasi sistem informasi antrian berbasis website dengan metodologi Scrum" [Implementation of a website-based queue information system using the Scrum methodology], *J. Inf. Syst. Manag. (JOISM)*, vol. 5, no. 2, pp. 233–238, 2024, doi: 10.24076/joism.2024v5i2.1442.
- [11] A. Dharmalau, I. Hiswara, and N. Martiningsih, "Implementasi metode First Come First Serve pada sistem informasi antrian pelayanan Pegadaian menggunakan website" [Implementation of the First Come First Serve method in a Pegadaian service queue information system using a website], *JRIS: J. Rekayasa Inf. Swadharma*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, 2024, doi: 10.56486/jris.vol4no1.401.
- [12] A. Zulfahrizan, M. A. S. HSB, F. Hutagalung, and F. Ramadhani, "Implementasi library Python dequeue pada antrian bank menggunakan logika First In First Out" [Implementation of the Python deque library in a bank queue using First-In First-Out logic], *JATI (J. Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 9, no. 1, p. 224, Feb. 2025.
- [13] N. Huda and Novriyadi, "Penerapan metode Multilevel Queue antrian pendaftaran pasien pada Klinik Talang Kelapa berbasis Android" [Application of the Multilevel Queue method to patient registration queues at Talang Kelapa Clinic based on Android], *SMATIKA J.*, vol. 13, no. 1, pp. 62–72, Jun. 2023, doi: 10.32664/smatika.v13i01.722.
- [14] D. M. Ibrahim, Y. Apridiansyah, A. W. Mahfuzi, and Pahrizal, "Sistem pendaftaran siswa baru di SMP 8 Bengkulu menggunakan metode Multilevel Queue" [New student registration system at SMP 8 Bengkulu using the Multilevel Queue method], *JUKOMIKA (J. Ilmu Komput. Inform.)*, vol. 7, no. 2, pp. 31–36, Dec. 2024, doi: 10.54650/jukomika.v7i2.554.
- [15] Lukas and A. Ratnasari, "Implementasi dan perancangan sistem pengelolaan dan penyewaan aset berbasis web dengan algoritma Priority Scheduling Queue dan First In First Out (FIFO) untuk PT Indonesia Comnets Plus" [Implementation and design of a web-based asset management and rental system using Priority Scheduling Queue and First In First Out (FIFO) algorithms for PT Indonesia Comnets Plus], *Riau J. Tek. Inform.*, vol. 5, no. 2, pp. 564–573, Jul. 2026.
- [16] J. A. Aryandi, M. A. Nugraha, Y. A. A. Basith, M. F. Pratama, D. Pradeka, and D. Anggraini, "Implementasi algoritma queue untuk menentukan prioritas pelayanan umum di rumah sakit"

- [Implementation of a queue algorithm to determine public service priority in a hospital], *JIKO (J. Inform. Komput.)*, vol. 7, no. 2, p. 218, Sep. 2023, doi: 10.26798/jiko.v7i2.806.
- [17] M. Prajana, H. Rajkumar, A. S. Sannidhi, K. Vidyasri, and S. Krishnan, "Adaptive multi-level feedback round-robin," in *Proc. 15th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. (ICCCNT)*, IEEE, 2024, doi: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10724187.
- [18] S. Hussain *et al.*, "Mitigating software vulnerabilities through secure software development with a policy-driven waterfall model," *J. Eng.*, vol. 2024, Art. no. 9962691, 2024, doi: 10.1155/2024/9962691.
- [19] W. Ningsih and H. Nurfauziah, "Perbandingan model Waterfall dan metode Prototype untuk pengembangan aplikasi pada sistem informasi" [Comparison of the Waterfall model and the Prototype method for application development in information systems], *J. Ilm. METADATA*, vol. 5, no. 1, pp. 83–95, Jan. 2023, doi: 10.47652/metadata.v5i1.311.
- [20] B. Prasetyo, F. S. Nugraha, and T. Agustin, "Design and development of web-based information system order monitoring system," *Formosa J. Comput. Inf. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 169–180, Aug. 2023, doi: 10.55927/fjicis.v2i2.5412.
- [21] T. Yifter, M. Mengstenew, S. Yoseph, and W. Moges, "Modeling and simulation of queuing system to improve service quality at Commercial Bank of Ethiopia," *Cogent Eng.*, vol. 10, no. 2, Art. no. 2274522, 2023, doi: 10.1080/23311916.2023.2274522.