

SKRIPSI
SISTEM PAKAR PENENTUAN SUBSTITUSI BAHAN KUE BAGI
PENDERITA ALERGI MENGGUNAKAN METODE FORWARD CHAINING
DAN FUZZY LOGIC BERBASIS WEB



DISUSUN OLEH :

NAMA : MILKY GRATIA BR SITORUS

NIM :223020503116

JURUSAN/PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS PALANGKA RAYA

2026

HALAMAN PENGESAHAN

SISTEM PAKAR PENENTUAN SUBSTITUSI BAHAN KUE BAGI PENDERITA ALERGI MENGUNAKAN METODE FORWARD CHAINING DAN FUZZY LOGIC BERBASIS WEB

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Strata-I pada Jurusan Teknik Informatika Fakultas
Teknik Universitas Palangka Raya

Oleh

MILKY GRATIA BR SITORUS

223020503116

Telah dipertahankan didepan tim penguji, pada :

Hari/Tanggal : Kamis, 20 Agustus 2026

Waktu : 11:05-12:35 WIB

Tempat : Ruang Ujian 2

1. DEDDY RONALDO, S.T., M.T.

NIP. 19801226 200812 1 002

2. WIDIATRY, S.T., M.T.

NIP. 19820717 2003122 2 002

3. RESSA PRISKILA, S.T., M.T.

NIP. 19940301 201903 1 016

4. EFRANS CHRISTIAN, S.T., M.T.

NIP. 19910630 201903 1 013

 (Ketua Penguji)
 (Pembimbing Utama/Pertama)
 (Pembimbing Pendamping/Kedua)
 (Anggota)

Mengetahui :

Jurusan / Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya

Ketua Jurusan,



ARIESTA LESTARI, S.Kom., M.Cs., Ph.D.
NIP. 19800322 200501 2 004

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenar - benarnya bahwa dalam Skripsi ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan disuatu Perguruan Tinggi, serta tidak terdapat karya ilmiah atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam Skripsi ini dan disebutkan dalam Tinjauan Pustaka.

Palangka Raya, 20 Agustus 2026



Milky Gratia Br Sitorus

223020503116

RIWAYAT PENYUSUN

Data Diri

Nama : Milky Gratia Br Sitorus
NIM : 223020503116
Fakultas : Teknik
Jurusan/Program Studi : Teknik Informatika
Jenjang : Strata 1 (S-1)
Jenis Kelamin : Perempuan
Tempat, Tanggal Lahir : Kabanjahe, 15 Maret 2004
Agama : Kristen Protestan
Status dalam Keluarga : Anak Kandung
Anak ke – : 3 (Tiga)
Alamat : Jl. Borneo
No. Telepon/HP : 082283537007



Data Orang Tua

Nama Ayah : Kilmer Sitorus
Pekerjaan Ayah : Petani
Nama Ibu : Esnita Br Sitepu
Pekerjaan Ibu : Petani
Alamat Orang Tua : Desa Salit
No. Telepon/HP : 081377142160

Riwayat Pendidikan

SD : SD Negeri 044850 Kuta Kepar Salit (Tahun Lulus 2016)
SMP : SMP Negeri 2 Kabanjahe (Tahun Lulus 2019)
SMA : SMA Negeri 1 Tigapanah (Tahun Lulus 2022)

Palangka Raya, 20 Agustus 2026

Milky Gratia Br Sitorus
223020503116

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur, penulis mengucapkan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini sebagai bagian dari penyelesaian studi S-1 Teknik Informatika ini. Penulis menyadari bahwa pencapaian ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya, khususnya kepada yang penulis hormati :

Untuk Bapak dan Mamak tercinta anugerah terindah dari Tuhan dalam hidupku, dengan penuh rasa bakti dan terima kasih yang tak. Cinta kasih yang tanpa syarat, kesabaran dalam menghadapi setiap dinamika, serta tidak pernah lelah mendoakan keberhasilan penulis, dan telah menjadi fondasi kekuatan penulis. Kalian adalah alasan terbesar di balik setiap langkah maju yang penulis ambil. Terima kasih telah menjadi rumah yang selalu memberikan kehangatan dan motivasi di tengah segala keterbatasan dan tantangan. Maaf jika aku belum bisa memberikan yang terbaik, namun semoga gelar kecil ini mampu menjadi pelipur lara dan mengukirkan senyum bangga di wajah kalian.

Untuk **Abang (Zimrif T. Sitorus), Kakak (Virginia R. Br Sitorus), dan Adek (Ondo Tamba Tua Sitorus)** tersayang. Karya sederhana ini penulis persembahkan sebagai wujud terima kasih atas segala cinta dan kepedulian kalian. Terima kasih sudah selalu sabar mendengar keluh kesah, memberikan motivasi, dan yang terpenting, tidak pernah ragu atau pelit dalam membantu, baik dari segi materi maupun tenaga, tanpa mengharap imbalan. Kalian adalah saudara-saudara terbaik yang Tuhan berikan, dan penulis berjanji akan terus berusaha menjadi kebanggaan keluarga.

Terima kasih yang mendalam untuk sahabat-sahabat terbaik selama masa kuliah di Teknik Informatika: **223020503109, 223020503119, 223020503140** dan seluruh anggota **SipNWarp**. Terima kasih telah menjadi tempat berbagi keluh kesah, saling menyemangati saat tugas menumpuk, dan mewarnai hari-hari perkuliahan dengan kebersamaan yang luar biasa. Diskusi, tawa, dan saling dukung di tengah kesibukan akademik telah menjadikan masa-masa perkuliahan ini sebagai kenangan yang sangat berharga dan bermakna.

Sebuah pelukan hangat dan rasa syukur penulis ucapkan untuk **diri sendiri**, karena telah berhasil menaklukkan segala rintangan dan bertahan hingga garis akhir ini. Dalam setiap perjuangan, saya selalu mengingat firman Tuhan dalam Yeremia 29:11, "Sebab Aku ini mengetahui rancangan-rancangan apa yang ada pada-Ku mengenai kamu, demikianlah firman TUHAN, yaitu rancangan damai sejahtera dan bukan rancangan kecelakaan, untuk memberikan kepadamu hari depan yang penuh harapan". Ayat ini menjadi pengingat bahwa Menjadi pengingat abadi bahwa menyandarkan harapan pada Tuhan adalah sumber kekuatan yang sejati. Harapan dan kekuatan untuk terus melangkah hari ini, sepenuhnya adalah karena campur tangan dan kasih karunia-Nya.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas berkat, kasih, dan karunia-Nya sehingga skripsi yang berjudul “Sistem Pakar Penentuan Substitusi Bahan Kue Bagi Penderita Alergi Menggunakan Metode Forward Chaining Dan Fuzzy Logic Berbasis Web” ini dapat diselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai bentuk kontribusi ilmu yang diharapkan bermanfaat, khususnya bagi mahasiswa di bidang terkait, baik sebagai bahan pemahaman maupun acuan pengembangan penelitian lebih lanjut. Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penulisan ini dan dengan rendah hati menerima kritik serta saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat, khususnya bagi seluruh mahasiswa dan akademisi Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Palangka Raya.

Penulis menyadari bahwa pencapaian ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya, khususnya kepada yang penulis hormati :

1. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Frieda, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.
2. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Ariesta Lestari, S.Kom., M.Cs., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Informatika Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.
3. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Widiatry, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik serta Dosen Pembimbing I, atas bimbingan, perhatian, serta dukungan yang telah diberikan sepanjang masa studi penulis.

4. Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ibu Ressa Priskila, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I dan II, atas bimbingan dan arahan yang sangat berarti selama penyusunan skripsi saya.
5. Penulis menyampaikan terima kasih kepada Bapak Deddy Ronaldo, S.T., M.T., dan Bapak Efrans Christian, S.T., M.T., selaku Penguji, atas segala masukan dan dukungan selama proses penyusunan skripsi penulis.
6. Seluruh dosen dan staff akademik di Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Palangka Raya yang telah memberikan ilmu dan pengalaman selama masa perkuliahan.
7. Keluarga tercinta yang selalu memberikan doa, dukungan, dan semangat dalam setiap proses yang penulis jalani.
8. Sahabat dan teman-teman seperjuangan yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan kebersamaan selama masa studi

Palangka Raya, 20 Agustus 2025



Milky Gratia br Sitorus

**SISTEM PAKAR PENENTUAN SUBSTITUSI BAHAN KUE BAGI
PENDERITA ALERGI MENGGUNAKAN METODE FORWARD CHAINING
DAN FUZZY LOGIC BERBASIS WEB**

MILKY GRATIA BR SITORUS (223020503116)

Jurusan Teknik Informatika Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya Kampus

Tunjung Nyaho Jalan Yos Sudarso, Palangka Raya 73112

gratiamilky@gmail.com

ABSTRAK

Penderita alergi makanan sering menghadapi kesulitan dalam memodifikasi resep kue secara mandiri karena risiko kegagalan struktur kue dan reaksi alergi yang berbahaya. Pendekatan konvensional yang ada saat ini bersifat statis dan tidak mempertimbangkan fungsi kimiawi bahan dalam proses *baking*. Penelitian ini bertujuan untuk membangun Sistem Pakar Berbasis Web yang mampu merekomendasikan substitusi bahan kue yang aman, terukur, dan optimal bagi penderita alergi. Sistem ini mengintegrasikan metode *Forward Chaining* sebagai mesin inferensi untuk menyaring kandidat bahan yang bebas alergen, serta *Fuzzy Logic Mamdani* yang dipadukan dengan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk mengevaluasi dan memberi peringkat (*ranking*) kelayakan bahan berdasarkan kriteria fungsi, tekstur, rasa, dan ketersediaan. Basis pengetahuan sistem mencakup 8 jenis alergi, 26 jenis kue, 69 bahan pengganti, dan 76 aturan yang divalidasi oleh tiga pakar *pastry* dan *bakery*. Sistem dibangun menggunakan bahasa pemrograman PHP *native* dan basis data MySQL.

Evaluasi sistem dilakukan melalui *Black Box Testing* dan pengujian akurasi metode menggunakan pendekatan *Gold Standard* berbasis konsensus pakar (*Majority Voting*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berjalan 100% sesuai pada seluruh skenario fungsional. Sementara itu, pengujian akurasi terhadap 23 kasus valid menghasilkan tingkat kesesuaian sebesar 95,65% dengan rekomendasi pakar. Sistem ini terbukti efektif membantu penderita alergi dan pelaku UMKM dalam menentukan substitusi bahan kue yang tepat tanpa harus melakukan metode *trial and error*.

Kata Kunci: Sistem Pakar, Substitusi Bahan Kue, Alergi Makanan, *Forward Chaining*, *Fuzzy Logic Mamdani*, AHP, Berbasis Web.

**EXPERT SYSTEM FOR DETERMINING CAKE INGREDIENT
SUBSTITUTION FOR ALLERGY SUFFERERS USING WEB-BASED
FORWARD CHAINING AND FUZZY LOGIC METHODS**

MILKY GRATIA BR SITORUS (223020503116)

Jurusan Teknik Informatika Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya Kampus

Tunjung Nyaho Jalan Yos Sudarso, Palangka Raya 73112

Email: gratiamilky@gmail.com

ABSTRACT

Food allergy sufferers often face difficulties in modifying cake recipes independently due to the risk of structural failure and dangerous allergic reactions. Conventional approaches are static and do not consider the chemical functions of ingredients in the baking process. This study aims to build a Web-Based Expert System capable of recommending safe, measurable, and optimal cake ingredient substitutions for allergy sufferers. The system integrates the Forward Chaining method as an inference engine to filter allergen-free ingredient candidates, along with Fuzzy Logic Mamdani combined with the Analytical Hierarchy Process (AHP) to evaluate and rank ingredient suitability based on function, texture, taste, and availability criteria.

The system's knowledge base consists of 8 types of allergies, 26 types of cakes, 69 substitute ingredients, and 76 rules validated by three pastry and bakery experts. The system was built using native PHP and a MySQL database. System evaluation was conducted through Black Box Testing and method accuracy testing using a Gold Standard approach based on expert consensus (Majority Voting). The test results show that the system functions 100% correctly across all functional scenarios. Meanwhile, accuracy testing on 23 valid cases yielded a 95.65% match rate with expert recommendations. This system is proven effective in helping allergy sufferers and MSME actors determine the right cake ingredient substitutions without resorting to trial and error.

Keywords: *Expert System, Cake Ingredient Substitution, Food Allergy, Forward Chaining, Fuzzy Logic Mamdani, AHP, Web-Based.*

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
RIWAYAT PENYUSUN.....	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Manfaat Penelitian	6
1.6. Sistematika Penulisan	6
1.7. Jadwal Penelitian.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1. Sistem Pakar.....	9
2.2. Forward Chaining	10
2.3. Logika Fuzzy.....	13
2.4. Alergi Bahan	24
2.5. Fungsi Kimia Baking	25
2.6. Bahan makanan	25
2.7. Teknologi Web.....	26
2.8. Pengujian Sistem.....	28
2.8.1. Black Box Testing.....	28
2.8.2. Pengujian Metode Forward Chaining dan Fuzzy Logic	29

2.9.	Penelitian Terdahulu	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		35
3.1.	Alur Penelitian	35
3.2.	Pengumpulan Data	37
3.3.	Data Preparation.....	39
3.3.1.	Persiapan Forward Chaining/ Analisis Kebutuhan	39
3.3.2.	Persiapan Fuzzy AHP	52
3.4.	Perancangan Sistem	84
3.5.	Perancangan Basis Pengetahuan	119
3.5.1.	Perancangan Rules Metode Forward Chaining.....	119
3.5.2.	Perancangan Logika Fuzzy	133
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		209
4.1.	Pengumpulan Data	209
4.1.1.	Data Basis Pengetahuan (<i>Knowledge Base</i>).....	209
4.2.	Implementasi	210
4.2.1.	Implementasi Sistem	210
4.2.2.	Implementasi Metode Pengambilan Keputusan.....	217
4.3.	Data Skenario Pengujian	230
4.3.1.	Skenario Pengujian Akurasi Metode.....	231
4.3.2.	Skenario Pengujian Fungsional (<i>Black Box Testing</i>).....	236
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		245
DAFTAR PUSTAKA		248
LAMPIRAN.....		251

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Jadwal Penelitian.....	8
Tabel 2. 1. Skala fundamental Saaty	21
Tabel 3. 1. Data bahan alergi	41
Tabel 3. 2. Jenis Kue	44
Tabel 3. 3. Fungsi bahan	46
Tabel 3. 4. Bahan pengganti.....	49
Tabel 3. 5. Penilaian bobot prioritas ahli 1	53
Tabel 3. 6. Matriks Perbandingan	58
Tabel 3. 7. Hasil Normalisasi.....	59
Tabel 3. 8. Rata-rata hasil Lambda Max	60
Tabel 3. 9. Lembar Penilaian Ahli 2	62
Tabel 3. 10. Hasil matriks perbandingan	67
Tabel 3. 11. Normalisasi	68
Tabel 3. 12. Hasil lambda max	69
Tabel 3. 13. Lembar Penilaian Ahli 3	71
Tabel 3. 14. Hasil matriks perbandingan	77
Tabel 3. 15. Hasil Normalisasi.....	78
Tabel 3. 16. Hasil lambda max	79
Tabel 3. 17. Hasil bobot prioritas.....	81
Tabel 3. 18. Rekomendasi desain.....	88
Tabel 3. 19. Desain konteks admin	95
Tabel 3. 20. Desain konteks pengguna.....	97
Tabel 3. 21. Tabel admin.....	102
Tabel 3. 22. Tabel Alergi	102
Tabel 3. 23. Tabel bahan asli	102
Tabel 3. 24. Tabel teknik pengolahan	102
Tabel 3. 25. Tabel jenis kue	103
Tabel 3. 26. Tabel fungsi bahan	103
Tabel 3. 27. Tabel bahan pengganti	103
Tabel 3. 28. Tabel aturan.....	103
Tabel 3. 29. Tabel forward chaining	124
Tabel 3. 30. Nilai Rata-rata Penilaian Pakar	136

Tabel 3. 31. Fungsi Keanggotaan Segitiga.....	137
Tabel 3. 32. Hasil Fuzzifikasi Aquafaba + agar-agar	138
Tabel 3. 33. Hasil Fuzzifikasi Silken tofu + maizena	138
Tabel 3. 34. Hasil Fuzzifikasi Agar-agar plain + maizena.....	139
Tabel 3. 35. Aturan inferensi untuk kriteria.....	139
Tabel 3. 36. Hasil Inferensi per Kriteria	140
Tabel 3. 37. Fungsi keanggotaan Fuzzy.....	141
Tabel 3. 38. Hasil Perangkingan Akhir.....	143
Tabel 3. 39. Nilai Rata-rata Penilaian Pakar	144
Tabel 3. 40. Hasil Fuzzifikasi Aquafaba.....	145
Tabel 3. 41. Hasil Fuzzifikasi Flax egg + baking powder	146
Tabel 3. 42. Hasil Fuzzifikasi Applesauce + cuka apel	147
Tabel 3. 43. Hasil Inferensi per Kriteria	147
Tabel 3. 44. Hasil skor dari aquafaba.....	148
Tabel 3. 45. Hasil skor dari Flax egg + baking powder	149
Tabel 3. 46. Hasil skor dari Applesouce + cuka apel.....	149
Tabel 3. 47. Hasil Perangkingan Akhir.....	151
Tabel 3. 48. Nilai Rata-rata Penilaian Pakar	152
Tabel 3. 49. Inferensi Fuzzy.....	153
Tabel 3. 50. Hasil perangkingan terakhir	155
Tabel 3. 51. Nilai rata-rata pakar	156
Tabel 3. 52. Inferensi Fuzzy.....	157
Tabel 3. 53. Hasil skor perangkingan.....	159
Tabel 3. 54. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Madeleine.....	160
Tabel 3. 55. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Brownies	161
Tabel 3. 56. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Choux.....	161
Tabel 3. 57. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Dacquoise.....	162
Tabel 3. 58. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Churros.....	162
Tabel 3. 59. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Cannoli.....	163
Tabel 3. 60. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Croissant	164
Tabel 3. 61. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Donat.....	164
Tabel 3. 62. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Macaron	165
Tabel 3. 63. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Bika Ambon	165
Tabel 3. 64. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Mille Crepe	166
Tabel 3. 65. Hasil Perangkingan Akhir Pound Cake	167

Tabel 3. 66. Hasil Perangkingan Akhir Telur and Souffle.....	168
Tabel 3. 67. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Cookies	168
Tabel 3. 68. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Chiffon	169
Tabel 3. 69. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Carrot Cake	170
Tabel 3. 70. Hasil Perangkingan Akhir Gluten Dan Bakpao	170
Tabel 3. 71. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Apem	171
Tabel 3. 72. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Bolu Kukus	172
Tabel 3. 73. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Kue Putu Ayu	172
Tabel 3. 74. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Marble Cake	173
Tabel 3. 75. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Madeleine	174
Tabel 3. 76. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Brownies	174
Tabel 3. 77. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Choux.....	175
Tabel 3. 78. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Churros	176
Tabel 3. 79. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Kue Cucur.....	176
Tabel 3. 80. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Gandasturi.....	177
Tabel 3. 81. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Cannoli.....	177
Tabel 3. 82. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Croissant	178
Tabel 3. 83. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Donat	178
Tabel 3. 84. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Pound Cake.....	179
Tabel 3. 85. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Carrot Cake.....	179
Tabel 3. 86. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Souffle	180
Tabel 3. 87. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Chiffon.....	181
Tabel 3. 88. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Cookies	181
Tabel 3. 89. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Bakpao.....	182
Tabel 3. 90. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Creme Caramel.....	183
Tabel 3. 91. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Choux	183
Tabel 3. 92. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Churros	184
Tabel 3. 93. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Macaron.....	185
Tabel 3. 94. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Mille Crepe.....	185
Tabel 3. 95. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Pound Cake.....	186
Tabel 3. 96. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Chiffon.....	187
Tabel 3. 97. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Cookies.....	187
Tabel 3. 98. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Souffle	188
Tabel 3. 99. Hasil Perangkingan Akhir Cream dan Creme Caramel	188
Tabel 3. 100. Hasil Perangkingan Akhir Cream dan Cheesecake.....	189

Tabel 3. 101. Hasil Perangkingan Akhir Cream dan Brownies	190
Tabel 3. 102. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Marble Cake	191
Tabel 3. 103. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Madeleine	191
Tabel 3. 104. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Brownies	192
Tabel 3. 105. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Churros	193
Tabel 3. 106. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Cookies	193
Tabel 3. 107. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Choux	194
Tabel 3. 108. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Donat	195
Tabel 3. 109. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Croissant	196
Tabel 3. 110. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Cannoli	197
Tabel 3. 111. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Dacquoise.....	197
Tabel 3. 112. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Macaron	198
Tabel 3. 113. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Onde-onde.....	199
Tabel 3. 114. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Carrot Cake	200
Tabel 3. 115. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Cookies	200
Tabel 3. 116. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Croissant	201
Tabel 3. 117. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Cannoli.....	202
Tabel 3. 118. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Croissant	203
Tabel 3. 119. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Bakpao	203
Tabel 3. 120. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Donat.....	204
Tabel 3. 121. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Bolu Kukus	205
Tabel 3. 122. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Cheesecake	206
Tabel 3. 123. Hasil Perangkingan Akhir Wijen dan Onde-onde.....	207
Tabel 3. 124. Hasil Perangkingan Akhir Wijen dan Cookies	207
Tabel 3. 125. Hasil Perangkingan Akhir Wijen dan Bakpao	208
Tabel 4. 1. Hasil akhir Bahan pengganti	219
Tabel 4. 2. Rekapitulasi Penentuan Gold Standard dan Pengujian Akurasi Sistem .	232
Tabel 4. 3. Pengujian Fungsional Antarmuka Pengguna	237
Tabel 4. 4. Pengujian Fungsional Dashboard Admin	240
Tabel 4. 5. Ringkasan Hasil Pengujian	244

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Metode forward chaining	12
Gambar 2. 2. Representasi linear naik	15
Gambar 2. 3. Representasi linear turun	16
Gambar 2. 4. Representasi linear naik	16
Gambar 3. 1. Alur Penelitian.....	37
Gambar 3. 2. Pengumpulan data dari para pakar	38
Gambar 3. 3. Data diri ahli pakar.....	39
Gambar 3. 4. Data diri ahli pakar (2)	40
Gambar 3. 5. Data diri ahli pakar (3)	40
Gambar 3. 6. Flowchart admin.....	92
Gambar 3. 7. Flowchart pengguna	94
Gambar 3. 8DFD level 0	98
Gambar 3. 9. DFD level 1	99
Gambar 3. 10. ERD	100
Gambar 3. 11. Halaman Dashboard Pengguna	104
Gambar 3. 12. Halaman Pilih Alergi.....	105
Gambar 3. 13. Halaman Pilih Kue	106
Gambar 3. 14. Halaman Rekomendasi.....	107
Gambar 3. 15. Halaman Login Admin.....	108
Gambar 3. 16. Halaman Dashboard Admin	108
Gambar 3. 17. Halaman Data Aturan.....	109
Gambar 3. 18. Halaman tambah dan edit data aturan	110
Gambar 3. 19. Halaman Data Alergi.....	111
Gambar 3. 20. Halaman tambah dan edit alergi.....	111
Gambar 3. 21. Halaman Jenis Kue.....	112
Gambar 3. 22. Halaman Tambah dan Edit Jenis Kue	113
Gambar 3. 23. Halaman Data Bahan Asli	113
Gambar 3. 24. Halaman Tambah dan Edit Bahan Asli	114
Gambar 3. 25. Halaman Bahan Pengganti	115
Gambar 3. 26. Halaman Tambah dan Edit Bahan Pengganti.....	115
Gambar 3. 27. Halaman Fungsi Bahan	116
Gambar 3. 28. Halaman Tambah dan Edit Fungsi Bahan.....	117

Gambar 3. 29. Halaman Teknik Pengolahan	117
Gambar 3. 30. Halaman Tambah dan Edit Teknik Pengolahan.....	118
Gambar 3. 31. Rule dari Forward Chaining.....	122
Gambar 3. 32. Rule dari Forward Chaining.....	123
Gambar 3. 33. Rule dari Forward Chaining.....	123
Gambar 4. 1. Halaman Awal.....	210
Gambar 4. 2. Halaman Pilih Alergi.....	211
Gambar 4. 3. Pilih Jenis Kue.....	212
Gambar 4. 4. Halaman Hasil Rekomendasi	213
Gambar 4. 5. Halaman Detail Rekomendasi	214
Gambar 4. 6. Login Admin	214
Gambar 4. 7. Dashboard Admin	215
Gambar 4. 8. Hasil Rekomendasi Multi-Alergi	216

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Konsumsi produk pangan olahan, termasuk kue dan roti, telah menjadi bagian tak terpisahkan dari gaya hidup masyarakat modern. Namun, kenikmatan ini justru menjadi tantangan serius bagi penderita alergi makanan. Prevalensi alergi makanan menunjukkan tren peningkatan yang signifikan secara global dalam dua dekade terakhir, dengan estimasi memengaruhi sekitar 4–8% populasi anak dan 2–5% populasi dewasa di seluruh dunia (Elghoudi & Narchi, 2022). Di Indonesia, data epidemiologis menunjukkan peningkatan kunjungan klinis terkait alergi makanan, didorong oleh perubahan pola konsumsi, urbanisasi, dan paparan alergen yang semakin kompleks. Reaksi alergi terhadap bahan umum seperti telur, susu sapi, dan gandum tidak hanya menyebabkan gejala gastrointestinal atau dermatologis, tetapi juga dapat menyebabkan reaksi alergi parah yang fatal (Arasi et al., 2023). Kondisi ini menuntut adanya strategi manajemen diet yang ketat, terutama dalam pemilihan bahan pangan olahan yang seringkali mengandung alergen tersembunyi.

Permasalahan semakin kompleks ketika penderita alergi mencoba memodifikasi resep kue secara mandiri. Dalam ilmu pangan, proses *baking* merupakan sistem reaksi kimia-fisik yang sangat presisi. Setiap bahan memiliki peran fungsional spesifik: telur berperan sebagai *binder*, *leavening agent*, dan emulsifier; susu menyumbang kelembaban, protein, dan reaksi Maillard; sedangkan gandum menyediakan jaringan gluten yang menentukan elastisitas dan struktur. Substitusi yang dilakukan secara coba-coba sering gagal karena mengabaikan perbedaan karakteristik adonan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa bahan pengganti telur seperti susu nabati atau protein nabati memerlukan optimasi rasio dan teknik pencampuran yang spesifik agar tidak mengganggu tekstur akhir produk (Halm et al., 2024). Ketidakmampuan menilai kemiripan fungsi, tekstur, dan rasa secara kuantitatif berujung pada penurunan kualitas

sensorik, pemborosan bahan baku, dan risiko kontaminasi silang atau reaksi alergi akibat substitusi yang tidak terverifikasi.

Saat ini, masyarakat awam umumnya mengandalkan metode konvensional seperti kamus substitusi cetak, aplikasi katalog bahan, atau modifikasi resep berbasis pengalaman pribadi. Pendekatan ini memiliki keterbatasan inheren: bersifat statis, tidak mempertimbangkan konteks resep (jenis adonan, teknik pencampuran, suhu pemanggangan), dan hanya memberikan label biner “aman/tidak aman” tanpa penilaian gradasional terhadap tingkat kecocokan. Selain itu, edukasi substitusi bahan di pasar bebas masih terbatas dan sering kali tidak diverifikasi secara ilmiah. Akibatnya, penderita alergi berada dalam dilema antara mengikuti diet ketat yang membatasi variasi pangan, atau melakukan eksperimen resep yang berisiko terhadap kesehatan dan efisiensi ekonomi (Cummings et al., 2021).

Di tengah keterbatasan tersebut, sistem pakar (*expert system*) hadir sebagai solusi digital yang mampu menjembatani kesenjangan pengetahuan antara ahli teknologi pangan dan masyarakat awam. Sistem pakar merupakan cabang kecerdasan buatan yang mengemas pengetahuan domain spesifik ke dalam basis pengetahuan dan mesin inferensi, sehingga mampu memberikan rekomendasi konsisten, terukur, dan dapat diakses kapan saja. Implementasi sistem pakar berbasis web untuk diagnosis kondisi kesehatan terkait pangan telah terbukti efektif meningkatkan aksesibilitas dan akurasi rekomendasi bagi pengguna awam (Maulia & Kusuma, 2026). Dalam konteks modifikasi resep, sistem pakar dapat berfungsi sebagai *Intelligent Baking Assistant* yang tidak hanya menyaring bahan aman, tetapi juga menyesuaikan rekomendasi dengan profil resep dan preferensi sensorik pengguna.

Untuk tahap identifikasi keamanan bahan, metode *Forward Chaining* dipilih sebagai mesin inferensi utama. Forward Chaining merupakan pendekatan *data-driven* yang memulai penelusuran dari fakta input pengguna (misal: alergi terhadap telur, jenis kue yang dibuat, preferensi tekstur) menuju ke kesimpulan

melalui serangkaian aturan *IF-THEN*. Metode ini unggul dalam skenario penyaringan deterministik karena bersifat eksplisit, transparan, dan mudah dilacak alur penalarannya. Penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas Forward Chaining dalam sistem diagnosis berbasis gejala, termasuk pada diagnosis penyakit tropis dan kesehatan hewan (Saefudin et al., 2021; Tampubolon, 2022). Dalam konteks alergi makanan, Forward Chaining dapat secara sistematis mengevaluasi komposisi bahan, memeriksa riwayat alergen, dan menghasilkan daftar substitusi yang telah terverifikasi keamanannya sebelum masuk ke tahap penilaian kualitas.

Meskipun Forward Chaining efektif dalam aspek keamanan, logika binernya kurang mampu merepresentasikan realitas kuliner yang bersifat gradasional. Substitusi bahan bukan persoalan "berhasil/gagal", melainkan "seberapa mendekati" fungsi asli dalam hal kelembutan, kekenyalan, warna, dan rasa. Oleh karena itu, *Fuzzy Logic* diintegrasikan sebagai pelengkap inferensi. Logika fuzzy memungkinkan sistem memproses variabel linguistik seperti "tingkat kelembutan sedang" atau "derajat kemiripan rasa tinggi" melalui fungsi keanggotaan dan aturan inferensi yang lebih fleksibel. Pendekatan ini telah diuji dalam berbagai domain pendukung keputusan, termasuk formulasi produk pangan dan rekomendasi diet, dengan kemampuan mengonversi preferensi kualitatif menjadi skor kuantitatif yang dapat ditindaklanjuti.

Meskipun Forward Chaining dan Fuzzy Logic telah banyak diterapkan secara terpisah atau dalam domain medis, penerapan metode hibrida keduanya secara khusus untuk manajemen modifikasi resep kue bagi penderita alergi makanan masih sangat minim. Sebagian besar sistem pendukung keputusan di bidang pangan berfokus pada pelabelan alergen atau rekomendasi diet umum, tanpa mempertimbangkan variabel teknis *baking* (rasio substitusi, jenis adonan, mekanisme pengembangan). Belum adanya sistem yang mengintegrasikan penyaringan keamanan berbasis aturan deterministik dengan penilaian kecocokan berbasis ketidakpastian kuliner menciptakan celah penelitian yang

krusial. Risiko *trial and error* pada substitusi bahan setara dengan kesalahan diagnosis: berpotensi memicu reaksi anafilaksis, menurunkan kepatuhan diet, dan meningkatkan beban ekonomi rumah tangga.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini merancang dan membangun **"Sistem Pakar Penentuan *Substitusi* Bahan Kue bagi Penderita Alergi Menggunakan Metode *Forward Chaining* dan *Fuzzy Logic* Berbasis Web"**. Sistem ini bertujuan untuk membantu penderita alergi makanan dalam memperoleh rekomendasi substitusi bahan *baking* yang aman, terukur, dan disesuaikan dengan karakteristik resep serta preferensi sensorik pengguna. Dengan mengintegrasikan kekuatan inferensi logis *Forward Chaining* untuk penyaringan alergen dan kemampuan penanganan ketidakpastian *Fuzzy Logic* untuk penilaian gradasional kecocokan, sistem ini diharapkan dapat menjadi alat bantu yang praktis, ilmiah, dan mudah diakses. Implementasi berbasis web memastikan skalabilitas dan kemudahan pembaruan pengetahuan, sehingga berkontribusi langsung pada peningkatan keamanan pangan dan kemandirian diet alergi di tingkat rumah tangga.

1.2.Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

Bagaimana merancang sistem pakar berbasis web yang mengintegrasikan *Forward Chaining* dan *Fuzzy Logic* untuk merekomendasikan substitusi bahan kue yang aman dan layak bagi penderita alergi makanan?

1.3.Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan mendalam, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini membatasi objek "kue" pada produk pangan kategori dessert dan camilan manis/gurih yang umum dikonsumsi di Indonesia, baik yang dipanggang (*baking*), dikukus (*steaming*), maupun digoreng (*frying*).

2. Metode yang digunakan untuk penentuan bahan aman menggunakan *Forward Chaining*, sedangkan penilaian derajat kecocokan fungsi, tekstur, rasa menggunakan *Fuzzy*.
3. Metode logika *fuzzy* yang digunakan dalam sistem ini adalah inferensi *Mamdani*. Penentuan bobot kriteria pada sistem fuzzy dilakukan secara terstruktur menggunakan metode *Analytic Hierarchy Process (AHP)*.
4. Penelitian ini menerapkan pendekatan Sistem Pakar (*Expert System*) dengan memanfaatkan pengetahuan dari pakar berlatar belakang Ahli Madya (AM.D) Pariwisata sebagai sumber akuisisi pengetahuan utama. Basis pengetahuan sistem, meliputi aturan keputusan, kriteria penilaian, rekomendasi bahan pengganti kue, serta validasi keamanan terhadap alergi, diperoleh melalui proses wawancara dan validasi dengan pakar tersebut.
5. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdapat 8 jenis data alergi yang diambil dari *Minnesota Department of Agriculture (MDA)*, 26 jenis data kue, 11 jenis data fungsi bahan, dan 69 jenis data bahan pengganti. Di mana seluruh data tersebut telah divalidasi dan disetujui oleh pakar untuk memastikan kesesuaian bahan terhadap pengguna.
6. Output sistem berupa nama bahan pengganti, rasio takaran otomatis, dan tips teknis pengolahan.
7. Evaluasi sistem dibatasi pada *Black-box Testing* untuk pengujian fungsional, serta pengujian metode *Forward Chaining* dan *Fuzzy Logic* yang dilakukan dengan memberikan kasus uji yang sama kepada sistem dan pakar, kemudian membandingkan kedua hasil rekomendasi bahan pengganti untuk mengukur tingkat kesesuaiannya.
8. Sistem tidak memberikan diagnosa medis mengenai jenis alergi pengguna, melainkan memberikan solusi substitusi berdasarkan input alergi yang sudah diketahui pengguna.

1.4.Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

Membangun sistem pakar berbasis web yang mampu menganalisis substitusi bahan kue bagi penderita alergi.

1.5.Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Penulis: Menambah wawasan dalam penerapan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) khususnya sistem pakar dalam bidang sains pangan.
2. Bagi Penderita Alergi: Memberikan kemudahan dalam memodifikasi resep kue secara mandiri tanpa harus khawatir akan risiko kesehatan atau kegagalan struktur kue.
3. Bagi Masyarakat/UMKM: Menjadi referensi bagi pelaku usaha kuliner sehat untuk mengembangkan varian produk yang ramah bagi penderita alergi (*allergy-friendly*).

1.6.Sistematika Penulisan

Penulisan laporan ini disusun dalam lima bab, dengan menggunakan sistematika sebagai berikut.

Bab I Pendahuluan

Pada bab ini diuraikan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, sistematika penulisan, dan jadwal penelitian.

Bab II Landasan Teori

Landasan teori berisikan teori yang digunakan untuk menguraikan mengenai suatu pedoman atau teori yang dikemukakan oleh pakar-pakar dalam suatu bidang tertentu untuk memecahkan masalah, serta penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian yang digunakan

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian, pengumpulan data, perancangan sistem pakar, perancangan basis data, perancangan aturan

(rule base), perancangan metode forward chaining dan logika fuzzy, serta desain antarmuka sistem berbasis web.

Bab IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini memaparkan hasil implementasi sistem, pengujian sistem menggunakan metode black box, pengujian akurasi dengan membandingkan hasil sistem dan ahli, serta analisis hasil rekomendasi bahan pengganti.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini merupakan bab yang berisi tentang kesimpulan yang berisi ringkasan jawaban atas permasalahan yang diangkat dalam penelitian dan saran yang merupakan perbaikan yang diperlukan untuk pengembangan sistem yang lebih baik.

1.7.Jadwal Penelitian

Tabel 1. 1. Jadwal Penelitian

NO	KEGIATAN	BULAN																											
		FEBRUARI			MARET					APRIL				MEI					JUNI			JULI				AGUSTUS			
		2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	Pengajuan Judul																												
	Penyusunan Alur Penelitian																												
	Analisis dan Pengumpulan Data																												
	Perancangan Sistem																												
	Penyusunan dan Pengumpulan Proposal Skripsi																												
	Seminar Proposal																												
	Pembangunan Sistem (<i>Coding</i>)																												
	Pengujian Sistem (<i>Testing</i>)																												
	Penyusunan Laporan Skripsi																												
10	Seminar Hasil																												
11	Sidang Akhir																												

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1.Sistem Pakar

Sistem pakar adalah cabang dari Artificial Intelligence dan dikembangkan oleh komunitas Artificial Intelligence di pertengahan tahun 1960-an (Eluis et al., 2021). Sistem pakar merupakan sistem berbasis komputer yang dirancang untuk meniru kemampuan pengambilan keputusan seorang pakar dalam bidang tertentu. Sistem ini bekerja dengan mengadopsi pengetahuan, fakta, serta aturan (*rules*) yang diperoleh dari pakar manusia ke dalam basis pengetahuan (*knowledge base*). Sistem pakar umumnya terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu basis pengetahuan, mesin inferensi, basis fakta, dan antarmuka pengguna.

Dalam bidang kesehatan dan pangan, sistem pakar banyak digunakan untuk membantu proses diagnosis, rekomendasi, serta pengambilan keputusan secara cepat dan konsisten. Sistem pakar merupakan cabang dari kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) yang memanfaatkan pengetahuan seorang pakar yang direpresentasikan dalam bentuk aturan dan fakta untuk menyelesaikan permasalahan yang umumnya memerlukan keahlian manusia. Hal ini sejalan dengan pendapat(Tampubolon, 2022), yang menyatakan bahwa sistem pakar dirancang agar dapat berpikir dan menarik kesimpulan menyerupai seorang pakar di bidangnya.

Menurut(SAKTI, 2021), sistem pakar mempunyai karakteristik atau ciri-ciri sebagai berikut:

- a. Terbatas pada bidang yang spesifik
- b. Dapat memberikan penalaran untuk data-data yang tidak lengkap atau tidak pasti.

- c. Dapat mengemukakan rangkaian alasan yang diberikannya dengan cara yang dapat dipahami.
- d. Berdasarkan pada rule atau kaidah tertentu.
- e. Dirancang untuk dapat dikembangkan secara bertahap.
- f. Outputnya bersifat nasihat atau anjuran.
- g. Outputnya tergantung dari dialog dengan user.
- h. Knowledge *base* dan *interface engine* terpisah.

Dalam penelitian (FARADINA, 2017), penggunaanya sistem pakar memiliki keuntungan dan kelemahan. Adapun keuntungan menggunakan sistem pakar antara lain:

- a. Memungkinkan orang awam bisa mengerjakan pekerjaan para ahli.
- b. Menyimpan pengetahuan dan keahlian para pakar.
- c. Meningkatkan output dan produktivitas.
- d. Menghemat waktu dalam pengambilan keputusan.
- e. Meningkatkan kualitas

Adapun kelemahan dari sistem pakar, antara lain :

- a. Biaya yang diperlukan untuk membuat dan memeliharanya sangat mahal.
- b. Sulit dikembangkan karena pakar (orang yang ahli) sesuai bidangnya terbatas.
- c. Tidak 100% bernilai benar.

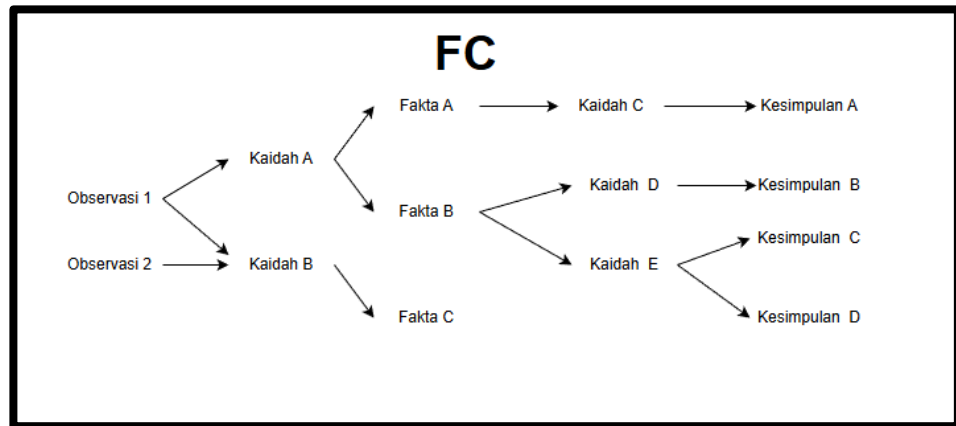
2.2.Forward Chaining

Forward Chaining merupakan metode penalaran dalam sistem pakar yang bersifat *data-driven*, yaitu proses inferensi yang dimulai dari pengumpulan fakta-fakta awal untuk kemudian menghasilkan suatu kesimpulan. Metode ini bekerja dengan mencocokkan fakta yang tersedia dengan aturan (*IF-THEN*) dalam basis pengetahuan. Apabila kondisi pada bagian *IF* terpenuhi, maka bagian *THEN* akan dijalankan sehingga menghasilkan fakta baru.

Dalam penelitian ini, fakta yang digunakan berupa jenis alergi yang dimiliki pengguna dan jenis kue atau bahan baking yang akan diolah. Fakta-fakta tersebut diproses menggunakan metode forward chaining untuk menentukan bahan pengganti yang aman dan sesuai bagi penderita alergi. Metode ini dinilai efektif karena mampu menghasilkan solusi berdasarkan data awal yang diberikan pengguna. Hal ini sejalan dengan pendapat (Saefudin et al., 2021) yang menyatakan bahwa metode ini sangat efektif digunakan jika masalah dimulai dari pengumpulan data untuk mencari solusi akhir yang bersifat data-driven.

Tahapan untuk membuat sistem pakar memanfaatkan metode Forward Chaining adalah:

- a. Pendefinisian masalah dengan memilih domain masalah dan akuisisi knowledge.
- b. Pendefinisian data masukan untuk memulai inferensi hal ini dikarenakan untuk keperluan metode Forward Chaining.
- c. Pendefinisian struktur pengendalian data yang berfungsi untuk membantu mengendalikan pengaktifan aturan.
- d. Penulisan kode awal domain pengetahuan.
- e. Pengujian sistem agar kemudian mengetahui bagaimana sistem berjalan.
- f. Perancangan antarmuka untuk basis pengetahuan.
- g. Pengembangan pada sistem.
- h. Evaluasi sistem.



Gambar 2. 1. Metode forward chaining

Gambar tersebut menggambarkan alur kerja metode *Forward Chaining (FC)* dalam sistem pakar. Proses penalaran diawali dari observasi awal, yaitu Observasi 1 dan Observasi 2, yang kemudian diproses menggunakan kaidah atau aturan yang tersedia dalam basis pengetahuan, yaitu Kaidah A dan Kaidah B. Dari penerapan kaidah tersebut, sistem menghasilkan fakta baru, seperti Fakta A, Fakta B, dan Fakta C. Fakta-fakta ini selanjutnya menjadi input lanjutan bagi proses inferensi berikutnya.

Fakta yang dihasilkan kemudian dicocokkan kembali dengan aturan lain, yaitu Kaidah C, Kaidah D, dan Kaidah E. Setiap kaidah yang terpenuhi akan menghasilkan suatu kesimpulan. Sebagai contoh, Fakta A yang memenuhi Kaidah C akan menghasilkan Kesimpulan A, sedangkan Fakta B dapat memenuhi Kaidah D atau Kaidah E sehingga menghasilkan Kesimpulan B, C, atau D. Proses ini berlangsung secara bertahap dan berurutan hingga tidak ada lagi aturan yang dapat dipicu.

Dengan demikian, metode forward chaining bekerja secara data-driven, yaitu penarikan kesimpulan dimulai dari fakta-fakta awal yang diketahui, kemudian dikembangkan melalui aturan-aturan yang ada sampai diperoleh kesimpulan akhir. Pendekatan ini sangat sesuai digunakan dalam sistem pakar

penentuan substitusi bahan baking, karena sistem memulai proses dari data alergi dan produk *baking* yang dimasukkan pengguna untuk menghasilkan rekomendasi bahan pengganti yang tepat.

2.3. Logika Fuzzy

Setelah kandidat tersaring oleh *Forward Chaining*, *Logika Fuzzy Mamdani* diterapkan untuk mengevaluasi tingkat kelayakan fungsional setiap kandidat berdasarkan penilaian pakar yang bersifat kualitatif dan mengandung ketidakpastian. Mamdani dipilih karena kemampuannya merepresentasikan pengetahuan pakar dalam bentuk himpunan linguistik (misal: Rendah, Sedang, Tinggi) dan aturan IF-THEN yang intuitif, serta menghasilkan output berupa skor numerik melalui proses defuzzifikasi.

Logika Fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Dasar logika fuzzy adalah teori himpunan fuzzy (Iqbal). Logika fuzzy merupakan metode penalaran yang digunakan untuk menangani ketidakpastian dan nilai yang bersifat samar. Nasution (2012) di (NAYANA, 2021) menyatakan bahwa logika fuzzy memiliki nilai kesamaran (*fuzzyness*) antara benar dan salah, di mana suatu nilai dapat memiliki derajat kebenaran dan kesalahan secara bersamaan. Derajat keanggotaan dalam logika fuzzy berada pada rentang nilai 0 sampai 1.

Logika fuzzy juga digunakan untuk memetakan ruang input ke ruang output, terutama pada sistem yang kompleks. Berbeda dengan sistem konvensional, penambahan variabel input pada sistem fuzzy dapat dilakukan dengan menambahkan fungsi keanggotaan dan aturan yang relevan tanpa harus mengubah keseluruhan sistem. Menurut Kusumadewi (2002), di dalam (NAYANA, 2021) logika fuzzy dipilih karena kemampuannya dalam menangani data yang tidak pasti dan fleksibel dalam pengembangan sistem. Sehingga, logika

fuzzy efektif diterapkan dalam sistem pakar untuk menghasilkan keputusan yang lebih adaptif.

Beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem fuzzy, yaitu:

a. Variabel Fuzzy

Variabel fuzzy merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem fuzzy. Contoh: umur, temperatur, permintaan, dsb.

b. Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel fuzzy.

c. Semesta Pembicaraan

Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel fuzzy. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Adakalanya nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas akhirnya.

d. Domain

Domain himpunan fuzzy adalah keseluruhan nilai yang diijinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan fuzzy.

Dalam penelitian (Athiyah et al., 2021), alasan menggunakan logika fuzzy ini, yaitu:

- a. Logika ini mudah dimengerti karena konsep matematisnya sederhana,
- b. sangat fleksibel,
- c. memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat (kabur),
- d. mampu memodelkan fungsi-fungsi non-linear yang sangat kompleks,

- e. dapat menerapkan pengalaman pakar secara langsung tanpa proses pelatihan,
- f. dapat bekerja sama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional, dan
- g. didasarkan pada bahasa alami.

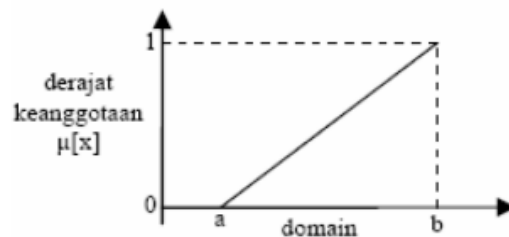
2.3.1 Fungsi keanggotaan

Fungsi keanggotaan (membership function) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval 0 sampai 1 (Antoni et al., 2024). Nilai 0 berarti tidak termasuk dalam himpunan, sedangkan nilai 1 berarti sepenuhnya termasuk. Fungsi ini memungkinkan sistem menangani ketidakpastian dan ambiguitas dengan cara yang menyerupai penalaran manusia.

Fungsi keanggotaan yang umum digunakan adalah sebagai berikut (NAYANA, 2021);

a. Representasi Linier Naik

Representasi ini adalah kenaikan himpunan yang dimulai domain memiliki nilai keanggotaan nol kemudian menuju ke kanan mencapai nilai domain dengan nilai keanggotaan lebih tinggi.



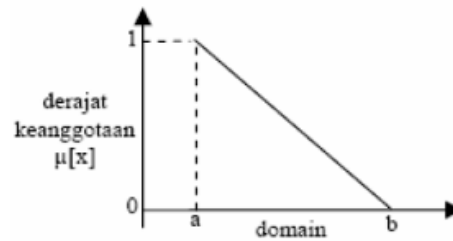
Gambar 2. 2. Representasi linear naik

Fungsi keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}; & a < x \leq b \\ 1; & x > b \end{cases}$$

b. Representasi Linier Turun

Representasi linier turun merupakan penurunan himpunan yang dimulai dengan domain yang memiliki nilai keanggotaan tertinggi pada sisi kiri yang bergerak ke kanan menuju nilai domain yang memiliki nilai keanggotaan yang lebih rendah.



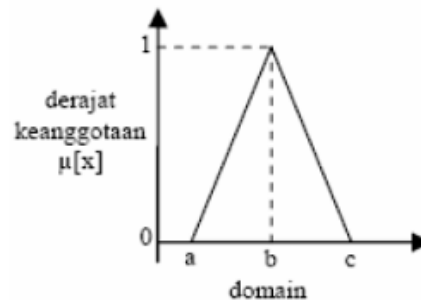
Gambar 2. 3. Representasi linear turun

Fungsi keanggotaan;

$$\mu[x] = \begin{cases} \frac{(b-x)}{(b-a)} & ; \quad a \leq x < b \\ 0 & ; \quad x \geq b \end{cases}$$

c. Representasi Kurva Segitiga

Representasi kurva segitiga merupakan gabungan dari dua garis linier yaitu linier naik dan linier turun.



Gambar 2. 4. Representasi linear naik

Fungsi keanggotaan;

$$\mu [x]=\begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{(x-a)}{(b-a)} & a < x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} & b < x < c \end{cases}$$

Menurut Alim (2015) dalam penelitian (NAYANA, 2021), terdapat tiga metode inferensi yang digunakan pada Fuzzy, antara lain

- a. Metode Tsukamoto adalah aturan yang berbentuk IF-THEN yang direpresentasikan dengan himpunan Fuzzy dengan fungsi keanggotaan yang monoton. Kemudian hasil output nya dari tiap aturan diberikan α -predikat. Kemudian rata rata berbobot diperoleh pada nilai akhir.
- b. Metode Mamdani, ini adalah metode yang juga dikenal dengan nama Metode MaxMin diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani tahun 1975.
- c. Metode Sugeno adalah metode yang hampir mirip metode Mamdani, namun output sistem tidak dalam himpunan *Fuzzy* akan tetapi dalam bentuk konstanta. Metode ini dikenal dengan sebutan Takagi-Sugeno-Kang diperkenalkan tahun 1985.

2.3.2 Logika Fuzzy Mamdani

Pada penelitian kali ini, akan menggunakan *logika fuzzy mamdani*. *Logika Fuzzy Mamdani* adalah metode inferensi berbasis himpunan fuzzy yang diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani (1975)(Jenalabdurrohman & Saprudin, 2023). Metode ini mengubah variabel input numerik menjadi derajat keanggotaan linguistik (misal: Rendah, Sedang, Tinggi), memprosesnya melalui sekumpulan aturan IF-THEN yang merepresentasikan pengetahuan pakar, lalu mengubah kembali hasil fuzzy menjadi nilai crisp melalui defuzzifikasi. Berbeda dengan logika Boolean yang bersifat dikotomis (0 atau 1), Mamdani memungkinkan nilai berada di antara kedua ekstrem tersebut, sehingga lebih sesuai untuk memodelkan

sistem yang mengandung ketidakpastian, subjektivitas, atau penalaran kualitatif.

Bentuk umum aturan Mamdani:

IF x_1 adalah A_1 AND x_2 adalah A_2 AND ... AND x_n adalah A_n
THEN y adalah B

Tahapan inferensi Mamdani meliputi:

- a. Fuzzifikasi: Mengubah input *crisp* menjadi derajat keanggotaan fuzzy.
- b. Evaluasi Aturan: Menghitung firing strength (α_i) menggunakan operator:
 - 1) MIN untuk AND: $\alpha_i = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n))$
 - 2) MAX untuk OR: $\alpha_i = \max(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n))$
- c. Komposisi Aturan: Menggabungkan hasil dari semua aturan menggunakan operator MAX.

2.3.3 Defuzzifikasi Weight Average

Defuzzifikasi *Weighted Average* (Rata-rata Terbobot) adalah metode pengubahan himpunan fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp*) dengan menghitung rata-rata tertimbang dari pusat setiap himpunan fuzzy, dimana bobotnya adalah derajat keanggotaan (μ) hasil fuzzifikasi. Metode ini dipilih karena komputasinya efisien dan memberikan aproksimasi yang baik terhadap metode *Centroid* ketika fungsi keanggotaan bersifat simetris

Rumus defuzzifikasi:

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)}$$

Keterangan:

- a. Z^* = nilai *crisp* hasil defuzzifikasi
- b. $\mu(z_i)$ = derajat keanggotaan pada titik z_i

- c. z_i = nilai output pada domain ke- i

Parameter Pusat Himpunan Output Penelitian Ini: Berdasarkan fungsi keanggotaan segitiga yang didefinisikan pada skala 1–5 dan dikonversi ke skala 0–100:

- a. Himpunan Rendah = 12.50 (dari parameter segitiga 1, 1, 2.5),
- b. Himpunan Sedang = 50.00 (dari parameter segitiga 1.5, 3, 4.5), dan
- c. Himpunan Tinggi = 87.50 (dari parameter segitiga 3.5, 5, 5)

Status rekomendasi ditetapkan berdasarkan titik potong (*crossover points*) fungsi keanggotaan output Fuzzy Mamdani, yaitu:

- a. Sangat Direkomendasikan (> 68.75): Dominasi himpunan Tinggi; bahan memiliki kesesuaian fungsi, tekstur, rasa, dan ketersediaan yang sangat baik.
- b. Direkomendasikan (31.26 – 68.75): Dominasi himpunan Sedang; bahan layak digunakan dengan kemungkinan penyesuaian minor pada formulasi.
- c. Cukup/Kurang Direkomendasikan (≤ 31.25): Dominasi himpunan Rendah; bahan kurang memenuhi kriteria kelayakan dan hanya disarankan sebagai opsi terakhir

2.3.4 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Setelah proses inferensi fuzzy dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian setiap bahan pengganti, diperlukan mekanisme penentuan prioritas kriteria dan pengurutan akhir alternatif. Untuk itu, penelitian ini mengintegrasikan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP). AHP merupakan metode pengambilan keputusan multi-kriteria yang dikembangkan oleh Saaty (1980) untuk menguraikan masalah kompleks menjadi struktur hierarkis, kemudian menentukan bobot prioritas melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*).

Dalam konteks sistem rekomendasi bahan pengganti kue, Logika Fuzzy Mamdani dan AHP memiliki peran yang komplementer. Fuzzy Mamdani berperan dalam menangani ketidakpastian data input kualitatif (seperti penilaian fungsi, tekstur, dan rasa) serta memetakan kesesuaian setiap bahan ke dalam skor awal melalui *rule base*. Metode AHP merupakan salah satu teknik pengambilan keputusan multikriteria (*Multi-Criteria Decision Making* /MCDM) yang digunakan untuk menyederhanakan permasalahan kompleks ke dalam bentuk hierarki (Zilasar et al., 2026). Sementara itu, AHP berfungsi menentukan bobot relatif dari ketiga kriteria tersebut berdasarkan tingkat kepentingannya dalam formulasi kue, sekaligus mengintegrasikannya ke dalam skor akhir untuk menghasilkan perbandingan yang terstruktur dan konsisten. Pendekatan hibrida ini, yang dalam literatur sistem pendukung keputusan sering disebut sebagai *Fuzzy-AHP* atau *Fuzzy MCDM*, telah terbukti efektif dalam mengurangi bias subjektif dan meningkatkan reliabilitas keputusan pada bidang teknologi pangan dan rekayasa formulasi.

a. Skala Fundamental Saaty

Dalam AHP, perbandingan berpasangan antar kriteria menggunakan Skala Fundamental *Saaty* yang terdiri dari 9 tingkat kepentingan:

Tabel 2. 1. Skala fundamental Saaty

Nilai	Definisi	Penjelasan
1	Sama penting	Kedua elemen memiliki pengaruh yang sama
3	Sedikit lebih penting	Satu elemen sedikit lebih penting
5	Lebih penting	Satu elemen jelas lebih penting
7	Jauh lebih penting	Satu elemen sangat dominan
9	Mutlak lebih penting	Satu elemen mutlak lebih penting
2,4,6,8	Nilai antara	Jika ragu di antara dua nilai

Matriks perbandingan berpasangan berukuran

$$\begin{matrix}
 1 & a_{12} & 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{1n} & \dots & a_{2n} & \dots & 1/a_{1n} & 1/a_{2n} \\
 a_{2n} & \ddots & \dots & 1 & & & & & & &
 \end{matrix}$$

- Perhitungan bobot prioritas Pembobotan Kriteria (AHP): Pakar melakukan perbandingan berpasangan antar kriteria (Fungsi, Tekstur, Rasa, Ketersediaan) menggunakan skala fundamental Saaty. Matriks perbandingan dinormalisasi dan diuji konsistensinya (*Consistency Ratio* < 0,1) untuk menghasilkan vektor bobot prioritas.
- Agregasi & Perangkingan: Skor fuzzy hasil defuzzifikasi dikalikan dengan bobot kriteria hasil AHP menggunakan pendekatan *Weighted Sum Model* (WSM). Nilai akhir berupa skor komposit 0–100 yang langsung digunakan sebagai dasar pengurutan (*ranking*) bahan

pengganti dari yang paling direkomendasikan hingga yang kurang layak.

2.3.5 Integrasi Metode Fuzzy Mamdani AHP & Mekanisme Perangkingan

Integrasi metode Fuzzy Mamdani dan Analytic Hierarchy Process (AHP) dalam penelitian ini dirancang secara berurutan (sequential hybrid) untuk menghasilkan rekomendasi bahan substitusi yang memenuhi tiga kriteria utama:

- a. Aman secara alergen,
- b. terukur kelayakan fungsionalnya, dan
- c. terprioritaskan berdasarkan bobot kriteria teknis baking.

Pendekatan hibrida ini mengadopsi pola evaluasi dua tahap yang telah divalidasi dalam literatur sistem pakar (Sutiari, 2020), dengan penambahan dimensi pembobotan multi kriteria untuk memperkuat reliabilitas perangkingan dan mengurangi bias subjektif penilaian tunggal.

- a. Tahap: Penentuan Bobot Kriteria dengan AHP

Sebelum evaluasi fuzzy dilakukan, prioritas kriteria ditetapkan secara objektif menggunakan AHP. Tiga pakar melakukan perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) terhadap variabel yang ingin di evaluasi menggunakan Skala Fundamental Saaty (Saaty, 1980). Matriks perbandingan dinormalisasi dan diuji konsistensinya melalui *Consistency Ratio* (CR) untuk memastikan koherensi logis penilaian pakar:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \text{Dimana } CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Jika $CR < 0,1$, matriks dinyatakan konsisten dan vektor bobot prioritas $W = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ dapat digunakan. Bobot ini merepresentasikan tingkat kepentingan relatif setiap kriteria dalam formulasi kue, sehingga kriteria dengan dampak fungsional terbesar

(misalnya Fungsi) memiliki pengaruh dominan dalam penilaian akhir (Saaty, 1980).

b. Tahap: Evaluasi Kelayakan dengan Fuzzy Mamdani

Setiap kandidat bahan yang lolos penyaringan *Forward Chaining* dievaluasi kelayakan fungsionalnya menggunakan Logika Fuzzy Mamdani. Metode ini dipilih karena kemampuannya menangani ketidakpastian penilaian kualitatif pakar dan merepresentasikan pengetahuan kuliner dalam bentuk aturan linguistik IF-THEN yang transparan dan dapat ditelusuri (Mamdani, 1975; Kusumadewi & Purnomo, 2010). Proses inferensi meliputi:

- 1) *Fuzzifikasi*: Konversi nilai input *crisp* menjadi derajat keanggotaan himpunan linguistik (Rendah, Sedang, Tinggi).
- 2) *Evaluasi & Agregasi Aturan*: Perhitungan *firing strength* (α_i) menggunakan operator MIN untuk logika AND, kemudian penggabungan seluruh output fuzzy yang teraktivasi dengan operator MAX.
- 3) *Defuzzifikasi*: Konversi himpunan fuzzy agregasi menjadi nilai *crisp* (Z_i) menggunakan metode *Centroid* (Center of Gravity):

$$Z^* = \frac{\int z \cdot \mu_{agg}(z) dz}{\int \mu_{agg}(z) dz}$$

Output Z_i merepresentasikan skor kelayakan fungsional awal setiap kandidat pada skala 0–100, sebelum mempertimbangkan bobot prioritas kriteria (Kusumadewi & Purnomo, 2010).

c. Tahap: Agregasi & Perangkingan Menggunakan *Weighted Sum Model* (WSM)

Untuk menghasilkan perangkingan akhir yang mempertimbangkan prioritas teknis baking, skor fuzzy Z_i dikombinasikan dengan vektor bobot AHP menggunakan

pendekatan *Weighted Sum Model* (WSM). WSM merupakan metode agregasi standar dalam *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) yang efektif untuk menghasilkan skor komposit terstruktur dan mudah diinterpretasikan. Rumus perhitungan skor komposit adalah:

$$S_i = \sum_{j=1}^4 (w_j \times Z_{ij})$$

Keterangan:

S_i = skor komposit akhir alternatif ke- i (digunakan untuk ranking)

w_j = bobot kriteria ke- j hasil AHP ($\sum_{j=1}^4 w_j = 1$)

Z_{ij} = skor fuzzy alternatif i pada kriteria j (atau nilai agregat global Z_i jika Mamdani menghasilkan satu keluaran terpadu)

d. Mekanisme Output & Rekomendasi Final

Berdasarkan nilai S_i , seluruh alternatif diurutkan secara menurun (*descending order*). Tiga alternatif dengan skor tertinggi ditetapkan sebagai rekomendasi final. Sistem kemudian menampilkan hasil perankingan disertai penjelasan fungsional singkat (misalnya: alasan prioritas, catatan penyesuaian resep, atau tingkat ketersediaan bahan). Mekanisme ini menjamin bahwa rekomendasi tidak hanya bersifat biner (layak/tidak layak), tetapi juga terukur, transparan, dan selaras dengan prinsip *Fuzzy MCDM* yang telah terbukti meningkatkan reliabilitas keputusan pada bidang rekayasa formulasi pangan (Zilasar et al., 2026).

2.4. Alergi Bahan

Alergi pangan adalah reaksi sistem imun yang terjadi ketika tubuh secara keliru mengenali protein tertentu dalam makanan sebagai zat berbahaya. Reaksi ini umumnya dimediasi oleh antibodi *Immunoglobulin E* (IgE), yang memicu pelepasan zat kimia seperti histamin sehingga menimbulkan gejala alergi,

seperti gatal, pembengkakan, gangguan pernapasan, hingga reaksi anafilaksis pada kasus yang berat.

Menurut (Waserman et al., 2018), alergi makanan merupakan respons imunologis yang merugikan terhadap protein makanan, sehingga komponen protein dalam bahan pangan menjadi pemicu utama reaksi alergi. Oleh karena itu, dalam konteks baking, bahan seperti telur, susu, gluten pada gandum, serta kacang-kacangan termasuk dalam kategori alergen yang perlu dihindari oleh individu yang sensitif.

2.5. Fungsi Kimia Baking

Dalam proses pembuatan kue dan produk bakery, setiap bahan tidak hanya berperan sebagai komponen rasa, tetapi juga memiliki fungsi kimia dan fisika yang penting terhadap struktur, tekstur, stabilitas, dan penampilan akhir produk. Pemahaman mendalam tentang fungsi ini menjadi dasar utama dalam menentukan bahan pengganti yang efektif, terutama bagi penderita alergi yang harus menghindari bahan tertentu tanpa mengorbankan kualitas sensorik.

Bagian ini menjelaskan teori sains pangan yang berkaitan dengan fungsi bahan dalam proses baking. Menurut Beranbaum (2021), pemahaman terhadap fungsi bahan sangat penting karena setiap bahan memiliki peran kimiawi dan fisik yang memengaruhi kualitas produk akhir.

Proses penggantian bahan tersebut dikenal sebagai substitusi bahan. Substitusi bahan merupakan proses mengganti suatu bahan dengan bahan lain tanpa merusak karakteristik kimiawi dan mutu produk akhir. Oleh karena itu, dalam menentukan bahan substitusi bagi penderita alergi, perlu diperhatikan kesetaraan fungsi bahan agar hasil baking tetap optimal.

2.6. Bahan makanan

Bahan makanan merupakan komponen utama yang digunakan dalam proses pembuatan produk yang menggunakan teknik pengolahan dengan cara panggang,

digoreng, dan dikukus. Setiap bahan memiliki fungsi tertentu yang saling mendukung untuk menghasilkan tekstur, rasa, aroma, serta bentuk produk yang diinginkan. Pemilihan dan perbandingan bahan yang tepat sangat menentukan keberhasilan proses baking.

2.7. Teknologi Web

Website merupakan kumpulan halaman digital yang saling terhubung dan dapat diakses melalui jaringan internet menggunakan peramban web. Menurut Yadi (2018), website berfungsi sebagai media informasi, komunikasi, dan layanan yang dapat diorganisasikan secara hirarkis maupun dinamis sesuai kebutuhan pengguna. Dalam konteks penelitian ini, website berperan sebagai platform interaktif yang menyediakan sistem rekomendasi bahan pengganti kue berbasis web. Platform ini dirancang agar dapat diakses secara luas tanpa memerlukan instalasi perangkat lunak tambahan, sekaligus memungkinkan pengguna untuk memasukkan data alergi, jenis kue, dan mendapatkan saran bahan pengganti yang aman serta optimal secara fungsional. Dengan pendekatan berbasis web, sistem tidak hanya menjadi alat bantu teknis, tetapi juga media edukasi bagi pengguna mengenai alternatif bahan yang kompatibel dengan kondisi alergi tertentu.

2.7.1. Frontend

Frontend merupakan lapisan antarmuka yang berinteraksi langsung dengan pengguna. Komponen ini bertanggung jawab dalam menyajikan tampilan visual, mengatur tata letak, serta memastikan pengalaman pengguna yang intuitif dan responsif (Tandean, 2024). Pada sistem ini, frontend dikembangkan menggunakan *HTML* untuk menyusun struktur dokumen, *CSS* untuk mengelola desain, tipografi, dan adaptasi tampilan pada berbagai ukuran layar, serta *JavaScript* untuk menangani validasi input formulir, manipulasi elemen halaman secara dinamis, dan komunikasi asinkron dengan server. Penerapan ketiga teknologi ini memungkinkan sistem berjalan ringan, dapat diakses langsung melalui

peramban web modern, serta memberikan umpan balik visual yang jelas selama proses pemilihan rekomendasi.

2.7.2. Backend

Backend berfungsi sebagai pusat pemrosesan logika bisnis dan manajemen data yang berjalan di sisi server. Komponen ini menangani seluruh komputasi di balik layar, termasuk pengambilan keputusan berdasarkan aturan sistem dan pengolahan data masukan pengguna. Pada penelitian ini, backend dibangun menggunakan bahasa pemrograman PHP yang bersifat *server-side* dan terintegrasi langsung dengan *server web*. PHP digunakan untuk mengimplementasikan dua tahap utama dalam mesin rekomendasi, yaitu:

1. *Forward Chaining*, yang menyaring kandidat bahan pengganti berdasarkan kecocokan fungsi bahan dan kompatibilitas dengan jenis alergi yang diinput pengguna.
2. Logika *Fuzzy*, yang melakukan penilaian kualitatif terhadap kandidat yang lolos saringan awal. Penilaian mencakup variabel seperti tekstur, rasa, dan tingkat kesesuaian fungsi bahan, yang kemudian diolah melalui proses *fuzzifikasi*, *inferensi*, dan *defuzzifikasi* untuk menghasilkan skor peringkat akhir.

Penggunaan PHP native memberikan fleksibilitas tinggi dalam menyusun alur inferensi tanpa bergantung pada *framework* eksternal yang kompleks, sekaligus memudahkan integrasi antara modul berbasis aturan (*rule-based*) dengan modul berbasis ketidakpastian (*fuzzy logic*).

2.7.3. Database

Database merupakan sistem penyimpanan terstruktur yang mengelola kumpulan data secara efisien, konsisten, dan aman. Dalam sistem rekomendasi ini, database berfungsi sebagai repositori utama untuk menyimpan data master bahan, hubungan alergi-bahan, parameter keanggotaan fuzzy, basis aturan produksi, serta riwayat penggunaan

sistem. Sistem manajemen basis data yang digunakan adalah MySQL, yang merupakan *Relational Database Management System* (RDBMS) berbasis *open-source* dengan performa stabil dan dukungan query yang cepat (Ultariani et al., 2020). MySQL dipilih karena kompatibilitasnya yang tinggi dengan PHP, dukungan transaksi yang andal, serta kemampuannya dalam menangani relasi data yang kompleks.

Perancangan struktur basis data dilakukan menggunakan *Entity Relationship Diagram* (ERD) untuk memetakan keterkaitan logis antar tabel (seperti tabel pengguna, bahan, alergi, aturan, dan hasil rekomendasi), sehingga meminimalkan redundansi dan memastikan integritas referensial. Sementara itu, *Data Flow Diagram* (DFD) digunakan pada tahap perancangan untuk memvisualisasikan aliran data dari input pengguna, proses penyaringan *Forward Chaining*, evaluasi *Fuzzy*, hingga penyajian output rekomendasi. Kombinasi ERD dan DFD memastikan bahwa arsitektur data sistem tidak hanya terstruktur secara teknis, tetapi juga selaras dengan alur bisnis dan logika pengambilan keputusan yang diterapkan.

2.8. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan bahwa sistem pakar yang dibangun dapat berjalan sesuai dengan kebutuhan dan menghasilkan rekomendasi yang benar serta dapat dipercaya. Pengujian pada penelitian ini meliputi pengujian fungsional sistem menggunakan metode *Black Box Testing* dan pengujian metode dengan membandingkan hasil sistem terhadap pendapat ahli gizi.

2.8.1. Black Box Testing

Black box testing merupakan pengujian kualitas perangkat lunak yang berfokus pada fungsionalitas perangkat lunak (Wijaya & Astuti, 2021). Di mana pengujiannya berfokus pada fungsi sistem tanpa memperhatikan kode program. Tujuannya untuk memastikan bahwa

keluaran yang dihasilkan sistem sudah sesuai dengan kebutuhan pengguna atau ada fungsi yang tidak benar, kesalahan antarmuka, kesalahan pada struktur data, kesalahan performansi, kesalahan inisialisasi dan terminasi.

2.8.2. Pengujian Metode Forward Chaining dan Fuzzy Logic

Selain pengujian fungsional, dilakukan pula pengujian terhadap metode yang digunakan dalam sistem, yaitu *Forward Chaining* dan *Fuzzy Logic*. Pengujian ini bertujuan untuk menilai tingkat keakuratan rekomendasi bahan pengganti yang dihasilkan oleh sistem.

Pengujian metode dilakukan dengan cara membandingkan hasil rekomendasi sistem dengan rekomendasi yang diberikan oleh pakar, yaitu praktisi pariwisata. Dalam proses ini, praktisi pariwisata diminta untuk memberikan rekomendasi bahan pengganti berdasarkan kondisi alergi dan jenis baking tertentu. Selanjutnya, hasil tersebut dibandingkan dengan output sistem untuk melihat tingkat kesesuaian antara rekomendasi sistem dan pendapat ahli.

Hasil pengujian dianalisis untuk mengetahui apakah sistem mampu menghasilkan rekomendasi yang sejalan dengan pengetahuan pakar. Apabila hasil rekomendasi sistem memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan rekomendasi praktisi pariwisata, maka dapat disimpulkan bahwa metode Forward Chaining dan Fuzzy Logic yang diterapkan telah bekerja dengan baik dan layak digunakan.

Evaluasi yang digunakan pendekatan konsensus pakar untuk menetapkan standar acuan (*Gold Standard*) sebelum perhitungan akurasi dilakukan. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

2. Penentuan Gold Standard dengan Majority Voting Jawaban final dari pakar untuk setiap kasus uji ditentukan menggunakan metode Majority Voting, yaitu kategori atau rekomendasi yang dipilih oleh minimal dua dari tiga pakar. Apabila terjadi pola suara terpecah (1-

1-1), kasus tersebut dikeluarkan dari perhitungan atau diselesaikan melalui diskusi singkat untuk menjaga objektivitas.

3. Rumus Perhitungan Akurasi Setelah *Gold Standard* ditetapkan, akurasi sistem dihitung dengan membandingkan output sistem terhadap *Gold Standard* tersebut menggunakan rumus:

$$Akurasi = \frac{Kasus\ dengan\ Output\ Sistem - Gold\ Standard}{Total\ Kasus\ Uji\ Valid} \times 100\%$$

Keterangan:

- a. Output Sistem = Gold Standard: Kondisi dimana rekomendasi yang dihasilkan sistem sama persis dengan rekomendasi konsensus pakar.
 - b. Total Kasus Uji Valid: Jumlah seluruh skenario pengujian yang berhasil mencapai konsensus pakar (tidak termasuk kasus *deadlock* 1-1-1).
4. Pengukuran Kesepakatan Antar-Pakar (Inter-Rater Reliability) Untuk mengukur tingkat konsistensi penilaian di antara ketiga pakar, penetapan acuan berdasarkan kesepakatan sekelompok pakar sejalan dengan prinsip bahwa konsensus pakar dapat dihimpun secara sistematis untuk menjadi basis pengambilan keputusan (Kurniawan et al., 2017). Metrik ini memastikan bahwa *Gold Standard* yang digunakan sebagai acuan evaluasi memiliki reliabilitas yang tinggi.

2.9. Penelitian Terdahulu

- a. Penelitian oleh (Tampubolon, 2022) dalam “**Sistem Pakar Diagnosa Penyakit Skistosomiasis Menggunakan Kombinasi Forward Chaining Dan Fuzzy Logic Takagi Sugeno Kang**” yang mengembangkan sistem pakar untuk mendiagnosis penyakit skistosomiasis dengan menggabungkan metode *Forward Chaining* dan *Fuzzy Logic Takagi-Sugeno-Kang*. Sistem

ini menggunakan *Forward Chaining* untuk menelusuri gejala awal berdasarkan basis pengetahuan dari pakar medis, lalu memproses tingkat keparahan diagnosis menggunakan pendekatan fuzzy Sugeno yang menghasilkan output numerik melalui defuzzifikasi *weighted average*. Meskipun berhasil mengintegrasikan dua metode inferensi, fokus penelitian ini terbatas pada konteks medis umum dan tidak menyentuh aspek substitusi bahan atau rekomendasi personalisasi berbasis fungsi kimiawi suatu komponen, sehingga belum menjawab kebutuhan penderita alergi dalam konteks kuliner.

- b. Dalam penelitian (NAYANA, 2021) dengan judul **“Implementasi Fuzzy Expert System Dan Forward Chaining Untuk Diagnosa Penyakit Kucing Berbasis Android”** merancang sistem pakar berbasis Android yang menggabungkan *Forward Chaining* dan *Fuzzy Logic Tsukamoto* untuk mendiagnosis penyakit kucing berdasarkan gejala seperti batuk, bersin, dan suhu tubuh. Sistem ini membagi gejala menjadi kategori linguistik (ringan, sedang, berat) dan menghitung derajat keanggotaan untuk menghasilkan diagnosis dengan akurasi 80%. Penelitian ini menunjukkan keberhasilan integrasi hibrida dalam platform mobile, namun tetap berfokus pada diagnosis medis hewan tanpa menyediakan mekanisme rekomendasi substitusi bahan berdasarkan karakteristik resep atau fungsi teknis bahan—sehingga tidak dapat langsung diadaptasi untuk kebutuhan penderita alergi dalam dunia baking.
- c. (Aulia et al., 2024) dalam penelitiannya yang berjudul **“Pengembangan Web Pencarian Resep Masakan Dengan Fitur Rekomendasi Berbasis Algoritma Machine Learning Di Provinsi Aceh”** mengembangkan web pencarian resep masakan tradisional Aceh yang dilengkapi fitur rekomendasi berbasis *machine learning*. Sistem ini menganalisis preferensi pengguna dan riwayat pencarian untuk memberikan saran resep yang personal. Meskipun inovatif dalam pelestarian kuliner lokal, pendekatan ini tidak

mempertimbangkan aspek kesehatan seperti alergi makanan, apalagi menyediakan substitusi bahan yang aman dan fungsional. Sistem ini juga tidak menggunakan logika berbasis aturan (*rule-based*) seperti *Forward Chaining*, sehingga kurang cocok untuk menangani kasus yang memerlukan penalaran eksplisit berdasarkan pengetahuan ahli gizi atau pastry chef.

- d. (Eluis et al., 2021) dengan judul **“Aplikasi Sistem Pakar Pemilihan Makanan Berdasarkan Kebutuhan Gizi Menggunakan Metode *Forward Chaining*”** membangun sistem pakar berbasis *Forward Chaining* untuk merekomendasikan menu makanan sesuai kebutuhan gizi individu, dengan mempertimbangkan faktor seperti usia, aktivitas fisik, dan kondisi medis (misalnya diabetes). Sistem ini mampu merekomendasikan sumber protein, lemak, dan karbohidrat berdasarkan aturan if-then. Namun, penelitian ini tidak menyentuh isu alergi makanan secara spesifik, apalagi dalam konteks baking yang memerlukan pemahaman mendalam tentang fungsi kimiawi bahan (seperti pengikat, pengembang, emulsifier). Selain itu, sistem ini tidak menggunakan logika fuzzy, sehingga tidak mampu menangani ketidakpastian subjektif seperti “tingkat kemiripan rasa” atau “kesesuaian tekstur”.
- e. Pada penelitian (Alhamri et al., 2021) dengan judul **“Pengembangan Sistem Pakar Berbasis Android Untuk Menentukan Obat Generik Pada Penyakit Kulit Menggunakan Metode *Forward Chaining*”** mengembangkan sistem pakar berbasis Android yang mendiagnosis 39 jenis penyakit kulit dan merekomendasikan obat generik menggunakan metode *Forward Chaining*. Sistem ini memiliki basis pengetahuan yang luas (83 gejala, 150 aturan diagnosis) dan terbukti berjalan baik di perangkat mobile. Meski demikian, fokusnya tetap pada diagnosis medis dan resep obat, bukan pada modifikasi resep atau substitusi bahan. Tidak ada pertimbangan terhadap aspek sensorik, fungsional, atau ketersediaan bahan, elemen yang penting dalam substitusi bahan baking bagi penderita alergi.

f. Penelitian terdahulu yang menjadi acuan metodologis dalam pengembangan sistem ini adalah studi oleh (Sutiari, 2020) yang berjudul **”Layanan Diagnosa Deteksi Penyakit Jantung Dengan Forward Chaining Dan Fuzzy Logic Mamdani Berbasis Mobile”**. Dalam penelitian tersebut, penulis mengintegrasikan dua metode inferensi secara berurutan: Forward Chaining digunakan pada tahap pertama untuk mengklasifikasikan jenis penyakit jantung berdasarkan gejala yang diinput pengguna, sedangkan Fuzzy Mamdani diterapkan pada tahap kedua untuk menentukan tingkat keparahan penyakit dengan mempertimbangkan variabel klinis seperti demam, nyeri persendian, dan penurunan berat badan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan hybrid ini mampu menghasilkan diagnosa yang akurat dan dapat diimplementasikan dalam platform mobile untuk akses yang lebih mudah. Penelitian ini mengadopsi pola integrasi sequential two-stage dari (Sutiari, 2020), namun dengan adaptasi signifikan pada domain aplikasi dan parameter sistem. Jika penelitian sebelumnya berfokus pada domain kesehatan dengan variabel input berupa gejala klinis, penelitian ini menerapkan metode yang sama dalam domain teknologi pangan, yaitu sistem rekomendasi substitusi bahan baking untuk penderita alergi. Forward Chaining dirancang sebagai mekanisme filtering untuk menyaring kandidat bahan yang aman secara alergi, sedangkan Fuzzy Mamdani berfungsi sebagai evaluator kelayakan fungsional berdasarkan parameter teknis baking seperti kemampuan pengikat, kesesuaian rasa, dan kemiripan tekstur. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mereplikasi metode, tetapi juga memperluas aplikabilitas pendekatan hybrid Forward Chaining-Fuzzy Mamdani ke konteks baru yang memiliki karakteristik permasalahan berbeda.

Berdasarkan keenam penelitian terdahulu, terdapat celah signifikan yang belum terpenuhi: belum ada sistem pakar hibrida yang secara khusus dirancang untuk membantu penderita alergi dalam menentukan substitusi bahan baking

yang aman, fungsional, dan sensorik. Penelitian sebelumnya cenderung fokus pada diagnosis medis (manusia atau hewan) atau rekomendasi umum tanpa mempertimbangkan:

- a. Fungsi kimiawi bahan dalam adonan (pengikat, pengembang, emulsifier).
- b. Kesesuaian substitusi berdasarkan jenis resep (adonan padat vs. aerasi tinggi).
- c. Penilaian gradasional terhadap parameter seperti tekstur, rasa, harga, dan ketersediaan menggunakan logika fuzzy.
- d. Integrasi antara identifikasi alergen (via Forward Chaining) dan rekomendasi substitusi (via Fuzzy Logic) dalam satu sistem berbasis web.

Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengusulkan **“Sistem Pakar Penentuan Substitusi Bahan Kue bagi Penderita Alergi Menggunakan Metode *Forward Chaining* dan *Fuzzy Logic* Berbasis Web”**, yang menggabungkan penalaran berbasis aturan dengan penilaian manusiawi untuk menghasilkan rekomendasi yang ilmiah, aman, dan praktis.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alur Penelitian

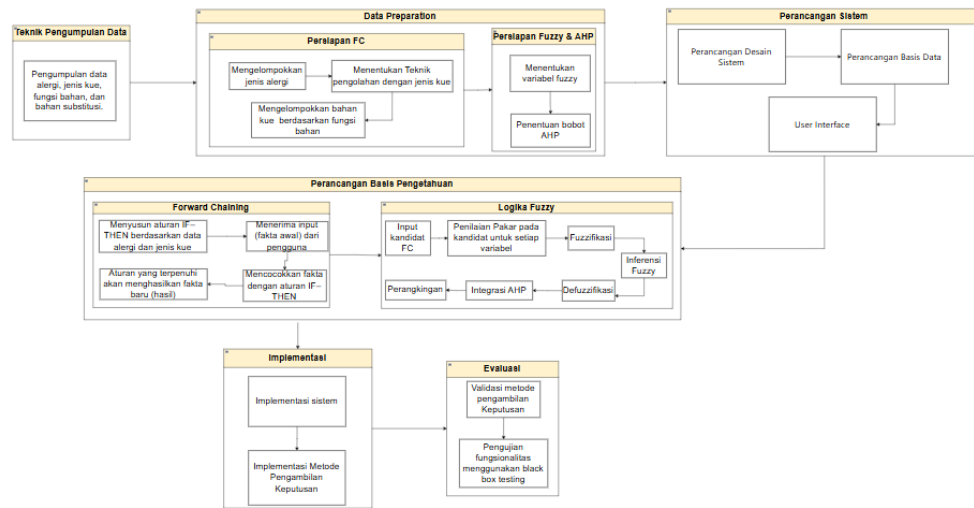
Penelitian ini diawali dengan tahap Teknik Pengumpulan Data, di mana data mentah mengenai jenis alergi, jenis kue, fungsi bahan, serta bahan substitusi dikumpulkan melalui studi literatur dan konsultasi pakar. Setelah data terkumpul, penelitian memasuki tahap Data Preparation yang terbagi menjadi dua fokus utama. Pertama, persiapan untuk Forward Chaining (FC) yang meliputi pengelompokan jenis alergi, penentuan hubungan antara alergi dengan bahan baking, serta pengelompokan bahan kue berdasarkan fungsi bahan. Kedua, persiapan untuk Fuzzy dan AHP yang berfokus pada penentuan variabel fuzzy serta penentuan bobot kriteria menggunakan metode AHP. Hasil dari tahap ini adalah basis aturan dan parameter sistem yang terstruktur dan siap digunakan pada tahap berikutnya.

Setelah persiapan data selesai, dilakukan tahap Perancangan Sistem. Tahap ini diawali dengan perancangan desain sistem untuk menentukan alur dan arsitektur sistem secara keseluruhan, dilanjutkan dengan perancangan basis data untuk menstrukturkan data yang dibutuhkan sistem, dan diakhiri dengan perancangan user interface sebagai antarmuka interaksi antara pengguna dan sistem.

Tahap inti penelitian dilanjutkan dengan Perancangan Basis Pengetahuan, yang terdiri atas proses Forward Chaining dan Logika Fuzzy. Pada proses Forward Chaining, aturan IF-THEN terlebih dahulu disusun berdasarkan data alergi dan jenis kue yang telah disiapkan. Ketika sistem menerima input (fakta awal) dari pengguna berupa jenis alergi dan produk kue yang ingin dibuat, sistem mencocokkan fakta tersebut dengan aturan yang ada di dalam basis pengetahuan. Aturan yang kondisi IF-nya terpenuhi kemudian dieksekusi untuk menghasilkan fakta baru (hasil), yaitu daftar kandidat bahan substitusi yang aman dan terbebas dari alergen pengguna.

Kandidat bahan yang lolos dari proses Forward Chaining selanjutnya menjadi input kandidat FC pada proses Logika Fuzzy untuk menentukan peringkat rekomendasi terbaik. Proses ini diawali dengan penilaian pakar terhadap setiap kandidat untuk setiap variabel yang telah ditentukan. Nilai penilaian tersebut kemudian dikonversi melalui fuzzifikasi, diolah menggunakan inferensi fuzzy, dan dikembalikan menjadi nilai numerik melalui defuzzifikasi. Skor kelayakan yang dihasilkan untuk setiap variabel kemudian diintegrasikan dengan bobot AHP yang telah dihitung pada tahap persiapan. Integrasi ini menghasilkan skor akhir yang digunakan untuk melakukan perangkingan, sehingga sistem dapat mengurutkan kandidat bahan substitusi dari yang paling direkomendasikan hingga yang paling rendah.

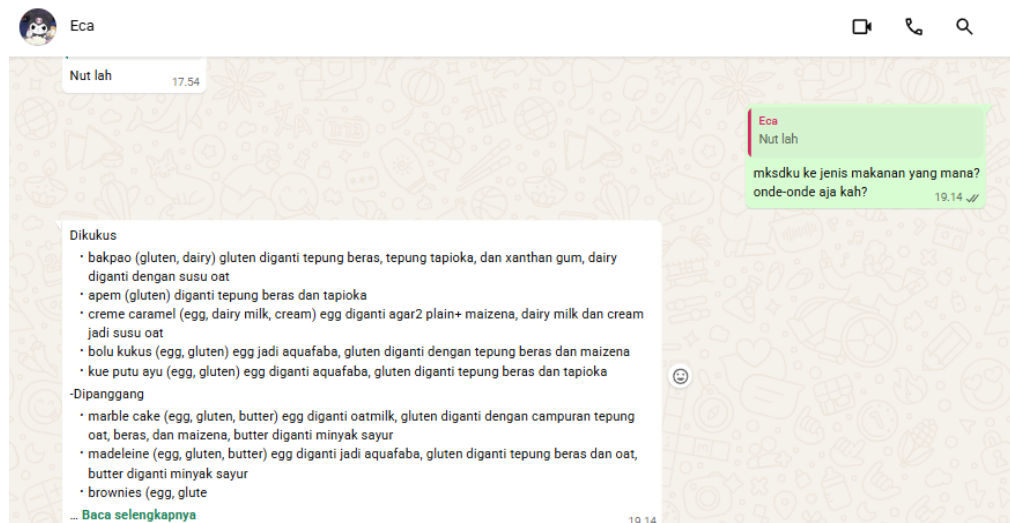
Tahap akhir dari alur penelitian ini adalah Implementasi dan Evaluasi. Pada tahap implementasi, seluruh logika dan basis pengetahuan yang telah dirancang dibangun menjadi sebuah sistem (implementasi sistem), termasuk implementasi metode pengmablikan keputusan, sehingga sistem mampu menampilkan rekomendasi substitusi bahan kue secara dinamis sesuai input alergi dan produk kue yang dimasukkan pengguna. Setelah sistem berhasil dibangun, dilakukan tahap Evaluasi yang diawali dengan validasi metode pengambilan keputusan untuk memastikan bahwa kombinasi Forward Chaining dan Fuzzy-AHP bekerja secara akurat, logis, dan sesuai tujuan penelitian, dilanjutkan dengan pengujian fungsionalitas sistem menggunakan black box testing sebelum sistem digunakan secara luas.



Gambar 3. 1. Alur Penelitian

3.2. Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui kombinasi studi literatur dan penilaian pakar yang relevan dengan bidang pastry, bakery, dan teknologi pangan. Melalui studi literatur, data dasar dikumpulkan dari sumber-sumber ilmiah dan referensi terpercaya, seperti jurnal teknologi pangan, buku panduan baking profesional, dan standar keamanan pangan. Data yang diperoleh dari literatur ini mencakup data alergi, identifikasi jenis-jenis kue, karakteristik serta fungsi bahan dalam adonan (misalnya sebagai pengikat, pengembang, pelembap, atau penambah rasa), serta informasi mengenai pemicu alergi.



Gambar 3. 2. Pengumpulan data dari para pakar

Sementara itu, untuk membangun logika pengambilan keputusan sistem, data berupa aturan substitusi bahan (rules) dan parameter penilaian kualitatif diperoleh langsung dari pakar pastry/bakery yang memiliki kompetensi dan pengalaman praktis di bidangnya. Melalui wawancara dan penilaian terstruktur, pakar memberikan justifikasi, aturan kondisi (if-then), serta pembobotan terhadap variabel-variabel Fuzzy seperti tingkat kesamaan tekstur, cita rasa, dan kesesuaian fungsi bahan pengganti. Seluruh data yang terkumpul kemudian diseleksi, divalidasi silang, dan dipetakan secara sistematis sehingga membentuk basis pengetahuan (knowledge base) yang solid. Basis pengetahuan ini terdiri atas himpunan aturan Forward Chaining dan parameter fungsi keanggotaan Fuzzy, yang selanjutnya menjadi fondasi akurat dalam menghasilkan rekomendasi bahan pengganti yang aman dan optimal.

3.3. Data Preparation

3.3.1. Persiapan Forward Chaining/ Analisis Kebutuhan

Data penelitian digunakan sebagai dasar dalam membangun basis pengetahuan sistem pakar. Data yang dikumpulkan meliputi informasi alergi pangan, jenis produk baking, fungsi bahan, bahan baking, serta bahan pengganti yang diperoleh dari literatur baking dan referensi ilmiah terkait. Seluruh data tersebut selanjutnya digunakan untuk menyusun aturan sistem dan proses inferensi dalam menentukan rekomendasi bahan substitusi.

Data dan informasi yang diperoleh kemudian dimanfaatkan sebagai dasar dalam penyusunan landasan teori serta sebagai acuan dalam perancangan sistem pakar yang dikembangkan. Informasi tersebut digunakan untuk membentuk basis pengetahuan, menyusun aturan forward chaining, menentukan parameter logika fuzzy, serta memastikan bahwa rekomendasi substitusi bahan kue yang dihasilkan sesuai dengan prinsip ilmiah, pertimbangan praktisi pariwisata, dan kebutuhan pengguna.

Gambar 3. 3. Data diri ahli pakar

Nama	: Yulia Emresa Br. Tarigan, A.Md. Par.	
Tempat/ tanggal lahir	: Kabanjahe, 02 Juli 2004	
Alamat	: Desa Singa	
Pekerjaan	: Wiraswasta	

Gambar 3. 4. Data diri ahli pakar (2)

Nama	: Tiara Dwi Utari, A.Md. Par.	
Tempat/ tanggal lahir	: Medan, 03 April 2004	
Alamat	: Jl. Brigjend. Katamso, Medan	
Pekerjaan	: Wiraswasta	

Gambar 3. 5. Data diri ahli pakar (3)

Nama	: Aklul Muhari, A.Md. Par.	
Tempat/ tanggal lahir	: Matang keupula sa, 30 Desember 2002	
Alamat	: Madat, Aceh Timur	
Pekerjaan	: Freelance	

Dalam penelitian ini, akuisisi pengetahuan dilakukan melalui tiga orang pakar yang memiliki kompetensi di bidang *pastry*, *bakery*, dan pengolahan makanan. Pemilihan tiga pakar bertujuan untuk melakukan triangulasi pengetahuan, sehingga basis pengetahuan yang dihasilkan tidak bersifat subjektif dari satu sudut pandang, melainkan merupakan konsensus dari beberapa praktisi yang memahami karakteristik teknis produk baking di Indonesia.

Ketiga pakar dalam penelitian ini memiliki latar belakang pendidikan Ahli Madya Pariwisata (A.Md. Par.), yang dalam kurikulum pendidikannya mencakup kompetensi di bidang food and beverage, khususnya *pastry* and *bakery*. Program studi pariwisata secara spesifik membekali lulusan dengan pemahaman mendalam mengenai teknik pengolahan makanan, fungsi bahan dalam produk kuliner, standar hygiene pangan, serta karakteristik sensorik produk akhir aspek-aspek yang menjadi fondasi utama dalam penyusunan basis pengetahuan sistem pakar ini.

a. Data Alergi

Data alergi pangan yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari situs resmi *Minnesota Department of Agriculture (MDA)* (Agriculture, 2024). Sumber ini memuat informasi komprehensif mengenai bahan-bahan pangan yang berpotensi menimbulkan reaksi alergi. Undang-Undang Pelabelan Alergen Makanan dan Perlindungan Konsumen tahun 2004 (FALCPA) mendefinisikan alergen makanan utama sebagai delapan makanan dan turunan proteinnya yang bertanggung jawab atas lebih dari 90% alergi makanan dan reaksi parah di Amerika Serikat (Esko, 2026). Namun, mengingat tidak seluruh data tersebut relevan dengan konteks produk baking di Indonesia, dilakukan proses seleksi dan validasi oleh pakar berlatar belakang Ahli Madya (AM.D) Pariwisata. Pakar memilih dan menetapkan jenis-jenis alergi yang paling umum dijumpai serta bahan-bahan alergen yang paling sering digunakan dalam produk kue dan baking. Hasil seleksi ini menghasilkan 8 jenis alergi yang kemudian dijadikan basis pengetahuan dalam sistem pakar.

Tabel 3. 1. Data bahan alergi

Nomor	Alergi Pangan
1.	Kacang-kacangan
2.	Gluten (Tepung terigu)
3.	Susu
4.	Mentega
5.	Cream
6.	Keju
7.	Wijen
8.	Telur

1) Kacang-kacangan

Berdasarkan klasifikasi MDA, kacang-kacangan termasuk dalam kategori *Peanuts* dan *Tree Nuts* yang merupakan alergen pangan utama. Alergi ini dapat menyebabkan reaksi yang serius dan berpotensi mengancam jiwa. Dalam produk baking, kacang-kacangan sering digunakan sebagai *topping*, isian, atau bahan campuran adonan. Gejala yang biasanya dialami seperti, gatal-gatal di mulut/tenggorokan, bengkak di bibir/lidah/mata, biduran, mual, muntah, diare, kram perut, sesak napas, dan pada kasus berat dapat menyebabkan reaksi anafilaksis (syok).

2) *Gluten* (Tepung terigu)

MDA mengategorikan gluten dalam kelompok *Wheat* yang mengandung protein alergenik. *Gluten* merupakan komponen utama dalam tepung terigu yang berfungsi memberikan elastisitas pada adonan. Alergi terhadap gluten sangat umum dijumpai pada produk roti dan kue, sehingga memerlukan substitusi dengan tepung bebas *gluten* seperti tepung beras atau tepung jagung.

3) Susu

Susu termasuk dalam kategori *Milk/Dairy* menurut MDA dan merupakan salah satu dari delapan alergen pangan utama. Protein susu (*kasein* dan *whey*) dapat memicu reaksi alergi pada sebagian individu. Bahkan sedikit protein susu pun dapat memicu reaksi serius, mulai dari gatal-gatal dan mengi hingga anafilaksis. Dalam baking, susu berfungsi sebagai pemberi rasa, kelembapan, dan struktur pada produk.

4) Mentega

Mentega merupakan produk turunan susu yang juga termasuk dalam kategori *Milk/Dairy* berdasarkan *MDA*. Meskipun berasal dari sumber yang sama dengan susu, mentega memerlukan perhatian khusus dalam substitusi karena memiliki fungsi spesifik sebagai sumber lemak padat yang mempengaruhi tekstur dan rasa produk baking.

5) Cream

Cream adalah produk olahan susu dengan kandungan lemak tinggi yang masuk dalam kategori *Milk/Dairy* menurut klasifikasi *MDA*. Dalam produk baking, cream sering digunakan untuk *topping*, isian, atau bahan adonan yang memerlukan kelembapan ekstra. Alergi terhadap cream memerlukan substitusi dengan alternatif *non-dairy*.

6) Keju

Keju termasuk dalam kategori *Milk/Dairy* yang diakui *MDA* sebagai alergen pangan utama. Produk ini sering digunakan dalam berbagai jenis kue dan roti untuk memberikan cita rasa gurih dan tekstur tertentu. Penderita alergi *dairy* harus menghindari keju dan menggantinya dengan alternatif yang aman.

7) Wijen

Wijen adalah biji-bijian kecil kaya minyak yang memiliki cita rasa gurih (*nutty*) dan tekstur yang renyah. Dalam pembuatan kue dan roti, wijen (baik jenis putih maupun hitam) umumnya digunakan sebagai *topping* atau campuran adonan untuk menambah aroma, cita rasa, dan estetika, seperti pada onde-onde, roti manis, *burger bun*, atau kue kering.

8) Telur

Berdasarkan klasifikasi *MDA*, telur (*Eggs*) merupakan salah satu dari delapan alergen pangan utama yang wajib dicantumkan dalam label produk. Protein dalam telur, terutama pada bagian putih telur, sering menyebabkan reaksi alergi, seperti biduran, ruam kulit gatal, bengkak di bibir/mata, mual, muntah, diare, kram perut, hidung tersumbat, dan sesak napas. Dalam baking, telur memiliki fungsi vital sebagai pengikat, pengembang, dan pemberi struktur, sehingga memerlukan substitusi yang tepat seperti aquafaba atau applesauce.

b. Data Jenis Kue

Data jenis kue dalam penelitian ini dikelompokkan berdasarkan teknik pengolahan utama, yaitu dipanggang (*baked*), dikukus (*steamed*), dan digoreng (*fried*). Data jenis kue didapat dari pakar *AM.D* Pariwisata untuk memilih produk baking yang relevan secara komposisi dan konteks substitusi. Proses seleksi pakar menghasilkan 26 jenis kue yang digunakan sebagai input sistem

Tabel 3. 2. Jenis Kue

No	Teknik Pengolahan	Jenis Kue
1.	Panggang	Marble cake
2.		Madeleine
3.		Cheesecake
4.		Brownies
5.		Cookies
6.		choux
7.		Dacquoise
8.		Macaron
9.		Croissant

10.		Kue Mille Crepe
11.		Souffle
12.		Chiffon
13.		Pound cake
14.		Carrot Cake
15.	Kukus	Bakpao
16.		Apem
17.		Crepe caramel
18.		Putu ayu
19.		Bolu kukus
20.		Bika Ambon
21.	Goreng	Gandasturi
22.		Donat
23.		Churros
24.		Onde-onde
25.		Cannoli
26.		Kue cucur

Kelompok ini terdiri dari 14 jenis produk (*marble cake, madeleine, cheesecake, brownies, cookies, choux, dacquoise, macaron, croissant, mille crepe, soufflé, chiffon, pound cake, dan carrot cake*) yang mengandalkan presisi fungsi bahan pengikat, pengembang, dan pelembap untuk mencapai tekstur yang khas.

Sementara itu, kategori kukus (6 jenis: bakpao, apem, *crème caramel*, putu ayu, bolu kukus, bika ambon) merepresentasikan produk dengan kelembapan tinggi dan proses gelatinisasi pati yang dominan, sedangkan kategori goreng (6 jenis: gandasturi, donat, churros, onde-onde, *cannoli*, kue cucur) menekankan pada ketahanan

struktur adonan terhadap suhu minyak tinggi dan penyerapan lemak. Ketiga kelompok teknik ini telah disepakati pakar sebagai representasi komprehensif dari produk baking yang umum dijumpai, sehingga rekomendasi substitusi yang dihasilkan sistem dapat mencakup berbagai konteks pengolahan secara akurat.

c. Data Fungsi Bahan

Data fungsi bahan sebanyak 11 kategori (seperti pengikat, pengembang, pelembap, dan pemberi rasa) diperoleh dari literatur standar teknologi serta telah divalidasi oleh pakar AM.D Pariwisata. Data ini menjadi parameter utama dalam sistem untuk mencocokkan bahan substitusi yang memiliki kesetaraan fungsi teknis dengan bahan alergenik.

Tabel 3. 3. Fungsi bahan

No mor	Fungsi bahan
1.	Struktur
2.	Pengikat
3.	Pengembang
4.	Pelembut
5.	Kelembapan
6.	Rasa
7.	Warna
8.	Emulsi
9.	Volume
10.	Pengawet alami
11.	Topping

1) Struktur

Berfungsi membentuk kerangka fisik yang kokoh pada produk akhir agar tidak mudah runtuh. Hal ini biasanya dilakukan oleh protein (seperti gluten pada tepung terigu) dan proses koagulasi protein telur saat terpapar panas.

2) Pengikat (Binder)

Berperan menyatukan seluruh komponen adonan (kering dan basah) agar tetap melekat dan tidak terpisah saat proses pencampuran maupun pemanggang. Telur dan pati sering menjadi bahan pengikat utama.

3) Pengembang (Leavener)

Bertugas menghasilkan gas (karbondioksida atau uap air) untuk mengembangkan adonan, sehingga menciptakan tekstur yang ringan dan berpori. Contohnya adalah baking powder, soda kue, ragi, dan udara yang terperangkap saat pengocokan.

4) Pelembut (Tenderizer)

Bekerja melemahkan jaringan protein atau gluten agar tekstur produk menjadi empuk, halus, dan tidak alot. Bahan dengan sifat ini umumnya adalah lemak (mentega/minyak) dan gula.

5) Kelembapan (Moisture)

Menyediakan cairan yang diperlukan untuk menghidrasi bahan kering (seperti tepung), melarutkan gula dan garam, serta menjaga produk agar tetap basah dan tidak kering saat dikonsumsi.

6) Rasa (*Flavor*)

Memberikan cita rasa utama atau penegas rasa pada produk. Bahan ini meliputi gula, garam, vanila, rempah, atau ekstrak buah yang membentuk profil rasa yang diinginkan.

7) Warna (*Color*)

Bertanggung jawab atas estetika visual produk, baik pada bagian dalam maupun kulit luar (*crust*). Proses pencoklatan (seperti reaksi Maillard) yang melibatkan gula dan protein, serta penggunaan kuning telur, sangat berperan dalam fungsi ini.

8) Emulsi (*Emulsifier*)

Berfungsi menstabilkan campuran bahan berbasis minyak/lemak dan air agar tercampur rata dan tidak terpisah (mengendap) selama proses pengolahan. Lesitin yang terdapat pada kuning telur adalah contoh emulsifier alami terbaik.

9) Volume

Berkontribusi pada peningkatan massa dan ukuran fisik produk akhir. Volume yang baik dihasilkan dari keseimbangan antara kemampuan bahan menahan udara (saat pengocokan) dan kekuatan struktur menahan gas pengembang.

10) Pengawet Alami

Membantu memperpanjang umur simpan produk dengan cara menghambat pertumbuhan mikroba atau memperlambat proses ketengikan, seringkali melalui pengikatan kadar air bebas. Gula dan garam dosis tinggi sering berfungsi ganda sebagai pengawet alami.

11) Topping

Komponen tambahan yang diletakkan di permukaan produk untuk tujuan dekorasi, penambah tekstur, atau penegas rasa. Fungsi ini meliputi *glaze* (olesan), taburan kacang, coklat chip, atau buah kering yang memberikan kesan akhir pada visual dan rasa.

b. Data Bahan Pengganti

Sebanyak 69 bahan pengganti dikumpulkan dari literatur standar pastry dan divalidasi pakar AM.D Pariwisata berdasarkan kesetaraan fungsi dan keamanan alergi. Data ini digunakan sebagai basis rekomendasi dalam aturan *Forward Chaining* dan variabel input *Fuzzy Mamdani*.

Tabel 3. 4. Bahan pengganti

No	Bahan Pengganti
1	Aquafaba
2	Agar-agar
3	Silken tofu
4	Tepung Maizena
5	Flax egg
6	Baking Powder
7	Applesauce
8	Cuka Apel
9	Baking soda
10	Yogurt nabati
11	Soda kue
12	Pure pisang
13	Cream of tartar
14	Sweet potato
15	Susu nabati
16	Minyak sayur
17	Sirup maple
18	Commercial meringue powder
19	Susu nabati

20	Chia egg
21	Chickpea flour
22	Xanthan Gum
23	Tepung Tapioka
24	Commercial egg replacer
25	Tepung Beras
26	Mocaf
27	Sagu
28	Tepung ketan
29	Tepung oat
30	Pati kentang
31	Pati jagung
32	Guar gum
33	Psyllium
34	kapur sirih
35	Ragi ekstra
36	Almond flour
37	Susu kedelai plain
38	Susu oat
39	Santan encer
40	vanila
41	Air biasa
42	Susu almond
43	Coconut cream
44	Santan kental
45	Vegan cream cheese
46	Tofu sutra blender

47	Lemon
48	Gula
49	Kacang mete
50	Margarin vegan
51	Minyak kelapa cair
52	Pure alpukat
53	Minyak zaitun ringan
54	Madu
55	Shortening nabati
56	Biji Rambutan
57	Tepung biji bunga matahari halus
58	Tepung biji labu sangrai
59	Kacang hijau
60	Kacang merah
61	Pasta wijen
62	Pasta kacang kedelai
63	Kelapa parut sangrai
64	Dark chocolate chips (vegan)
65	Kayu manis
66	Ekstrak vanili
67	Garam
68	Ragi nutrisi
69	Pasta kacang putih

3.3.2. Persiapan Fuzzy AHP

Pada tahap persiapan Fuzzy dan AHP, dihasilkan beberapa parameter dan konfigurasi sistem yang akan digunakan dalam proses evaluasi dan perancangan, yaitu:

a. Variabel dan Himpunan Fuzzy

Ditetapkan empat variabel kriteria yang akan digunakan dalam penilaian kandidat bahan substitusi, yaitu:

- 1) Fungsi Bahan: Menilai kesesuaian fungsi bahan pengganti dengan bahan asli
- 2) Tekstur: Menilai kemiripan tekstur yang dihasilkan
- 3) Rasa: Menilai kesesuaian cita rasa
- 4) Ketersediaan: Menilai kemudahan memperoleh bahan di pasaran

Setiap variabel memiliki tiga himpunan fuzzy, yaitu Rendah (R), Sedang (S), dan Tinggi (T) dengan fungsi keanggotaan yang telah didefinisikan berdasarkan validasi pakar.

b. Bobot Prioritas Kriteria (AHP)

Untuk menentukan bobot prioritas setiap kriteria penilaian (Fungsi, Tekstur, Rasa, dan Ketersediaan), penelitian ini menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) yang melibatkan tiga orang pakar di bidang pastry dan bakery.

Proses diawali dengan penyebaran kuesioner pairwise comparison (perbandingan berpasangan) kepada ketiga pakar untuk menilai tingkat kepentingan relatif antar kriteria. Contohnya, pakar diminta membandingkan seberapa lebih penting kriteria Fungsi dibandingkan Tekstur, Fungsi dibandingkan Rasa, dan seterusnya menggunakan skala 1-9.

Selanjutnya, penilaian dari ketiga pakar diagregasikan menggunakan rata-rata geometrik untuk menghasilkan satu matriks perbandingan konsensus. Matriks ini kemudian dinormalisasi dan dihitung bobot prioritas setiap kriteria. Untuk memastikan konsistensi penilaian pakar, dihitung nilai Consistency Ratio (CR) yang mensyaratkan $CR < 0.10$.

Hasil dari proses tersebut adalah bobot prioritas kriteria yang akan digunakan dalam sistem, seperti ditunjukkan pada Tabel berikut:

1. Penilaian Ahli 1

Tabel 3. 5. Penilaian bobot prioritas ahli 1

LEMBAR VALIDASI AHP		
Nama Ahli	: Yulia Emresa Br Tarigan, A. Md. Par.	
Tanggal	: 12 Mei 2026	
Petunjuk Pengisian:		
Bandingkan dua kriteria yang tersedia. Pilih mana yang LEBIH PENTING untuk keberhasilan substitusi bahan kue, dan seberapa besar perbedaannya. - Skala 1: Sama Penting - Skala 3: Sedikit Lebih Penting - Skala 5: Jauh Lebih Penting - Skala 7: Sangat Jauh Lebih Penting - Skala 9: Mutlak Lebih Penting		
Tabel Perbandingan Berpasangan:		
No	Pertanyaan Perbandingan	Pilihan Jawaban (Centang Satu)

1	FUNGSI vs TEKSTUR Mana yang lebih prioritas: presisi fungsi teknis bahan atau pencapaian tekstur akhir kue yang optimal?	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☐ Fungsi jauh lebih penting (7) ☒ Fungsi lebih penting (5) ☐ Fungsi sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Tekstur sedikit lebih penting (3) ☐ Tekstur lebih penting (5) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☐ Tekstur mutlak lebih penting (9)
2	FUNGSI vs RASA Mana yang lebih penting: kesesuaian seluruh fungsi teknis bahan, atau kemiripan cita rasa dengan bahan asli?	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☒ Fungsi jauh lebih penting (7) ☐ Fungsi lebih penting (5) ☐ Fungsi sedikit lebih penting (3)

		☐ Sama penting (1) ☐ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7) ☐ Rasa mutlak lebih penting (9)
3	TEKSTUR vs RASA (Mana yang lebih penting: tekstur kue yang mirip, atau rasa yang mirip?)	☐ Tekstur mutlak lebih penting (9) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☐ Tekstur lebih penting (5) ☒ Tekstur sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7) ☐ Rasa mutlak lebih penting (9)

4.	FUNGSI KETERSEDIAAN	VS	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☒ Fungsi jauh lebih penting (7) ☐ Fungsi lebih penting (5) ☐ Fungsi sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3) ☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7) ☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9)
5.	TEKSTUR KETERSEDIAAN	VS	☐ Tekstur mutlak lebih penting (9) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☒ Tekstur lebih penting (5) ☐ Tekstur sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1)

		☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3) ☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7) ☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9)
6.	RASA VS KETERSEDIAAN	☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7) ☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☒ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7) ☐ Rasa mutlak lebih penting (9)

Dari hasil di atas, dapat dilihat bahwa praktisi pariwisata memilih:

- a. Fungsi vs Tekstur = Memilih “ Fungsi mutlak lebih penting (9)”
- b. Fungsi vs Rasa = Memilih “ Fungsi jauh lebih penting (7)”
- c. Tekstur vs Rasa = Memilih “ Sama penting (1)”
- d. Fungsi vs Ketersediaan = Memilih “ Fungsi jauh lebih penting (7)”
- e. Tekstur vs Ketersediaan= Memilih “ Tekstur lebih penting (5)”
- f. Rasa vs Ketersediaan= Memilih “ Rasa sedikit lebih penting (3)”

Melakukan hitung manual dengan metode rata-rata geometric:

- a. Buat matriks perbandingan
 - 1) Fungsi/ Tekstur= 5 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Tekstur = $1/5 = 0,2$
 - 2) Fungsi/ Rasa = 7 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Rasa = $1/7 = 0.14$
 - 3) Fungsi/Ketersediaan= 7 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Ketersediaan = $1/7 = 0.14$
 - 4) Tekstur/ Rasa = 3 $\rightarrow$ maka Tekstur/ Rasa = $1/3 = 0.33$
 - 5) Tekstur/ Ketersediaan = 5 $\rightarrow$ maka Tekstur/ Ketersediaan = $1/5 = 0.2$
 - 6) Rasa/ Ketersediaan= 3 $\rightarrow$ maka Rasa/ Ketersediaan = $1/3 = 0.33$
 - 7) Diagonal (fungsi/ fungsi, dll) = 1

Tabel 3. 6. Matriks Perbandingan

Kriteria	Fungsi	Tekstur	Rasa	Ketersediaan
Fungsi	1	5	7	7
Tekstur	0.2	1	3	5
Rasa	0.14	0.33	1	3
Ketersediaan	0.14	0.2	0.33	1

b. Jumlahkan tiap kolom

Kolom fungsi : $1 + 0.2 + 0.14 + 0.14 = 1.48$

Kolom tekstur : $5 + 1 + 0.33 + 0.2 = 6.53$

Kolom rasa : $7 + 3 + 1 + 0.33 = 11.33$

Kolom ketersediaan : $7 + 5 + 3 + 1 = 16$

c. Normalisasi (Bagi sel sesuai jumlah kolomnya)

Tabel 3. 7. Hasil Normalisasi

Kriteria	Fungsi	Tekstur	Rasa	Ketersediaan	Rata-rata baris
Fungsi	$1/1.48$ $= 0.68$	$5/6.53$ $= 0.77$	$7/11.33$ $= 0.62$	$7/16 = 0.44$	$2.51/4$ $= 0.63$
Tekstur	$0.2/1.48$ $= 0.14$	$1/6.53$ $= 0.15$	$3/11.33$ $= 0.26$	$5/16 = 0.31$	$0.86/4$ $= 0.21$
Rasa	$0.14/1.48$ $= 0.09$	$0.33/6.53$ $= 0.05$	$1/11.33$ $= 0.09$	$3/16 = 0.19$	$0.42/4$ $= 0.11$
Ketersediaan	$0.14/1.48$ $= 0.09$	$0.2/6.53$ $= 0.03$	$0.33/11.33$ $= 0.03$	$1/16 = 0.06$	$0.21/4$ $= 0.05$
Jumlah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Fungsi : $0.63 = 63\%$

Tekstur : $0.21 = 21\%$

Rasa : $0.11 = 11\%$

Ketersediaan : $0.05 = 5\%$

d. Uji konsistensi

AHP memiliki syarat yaitu penilaian ahli harus logis dan konsisten, yaitu dengan menggunakan *Consistency Ratio (CR)*

Rumus CR:

$$CR = CI / RI$$

Di mana:

$$CI = \text{Consistency Index} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

RI = Random Index (tabel baku Saaty)

n = jumlah kriteria (n=4)

1) Cara Hitung $\lambda_{\max}$ (Lambda Max):

- a) Kalikan setiap kolom matriks asli dengan bobot prioritas
- b) Jumlahkan hasil perkalian per baris
- c) Bagi hasil jumlah dengan bobot prioritas
- d) Rata-ratakan hasilnya $\rightarrow$ itu $\lambda_{\max}$

Tabel 3. 8. Rata-rata hasil Lambda Max

Kriteria	Perhitungan	Hasil
Fungsi	$(1 \times 0.63) + (5 \times 0.21) + (7 \times 0.11) + (7 \times 0.05) = 0.63 + 1.05 + 0.77 + 0.35$	2.8
Struktur	$(0.2 \times 0.63) + (1 \times 0.21) + (3 \times 0.11) + (5 \times 0.05) = 0.13 + 0.21 + 0.33 + 0.25$	0.92
Rasa	$(0.14 \times 0.63) + (0.33 \times 0.21) + (1 \times 0.11) + (3 \times 0.05) = 0.09 + 0.07 + 0.11 + 0.15$	0.42

Ketersediaan	$(0.14 \times 0.63) + (0.2 \times 0.21) +$ $(0.33 \times 0.11) + (1 \times 0.05) =$ $0.09 + 0.04 + 0.04 + 0.05$	0.22
--------------	---	------

2) Lalu bagi dengan bobot

Fungsi : $2.8/0.63 = 4.44$

Struktur : $0.92/0.21 = 4.38$

Rasa : $0.42/0.11 = 3.81$

Ketersediaan : $0.22/0.05 = 4.4$

$$\lambda_{\max} = (4.44 + 4.38 + 3.81 + 4.4) = 17.03 / 4 = 4.26$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (4.26 - 4) / (4 - 1) = 0.26 / 3 = 0.087$$

$$RI \text{ untuk } n=4 \text{ (dari tabel Saaty)} = 0.90$$

$$CR = CI / RI = 0.087 / 0.90 = 0.097 \rightarrow 9.7\%.$$

Karena $CR = 0.097 < 0.10$, maka penilaian ahli 1 dianggap konsisten.

2. Penilaian Ahli 2

Tabel 3. 9. Lembar Penilaian Ahli 2

LEMBAR VALIDASI AHP		
Nama Ahli	: Aklul Muhari, A. Md. Par.	
Tanggal	: 15 Mei 2026	
Petunjuk Pengisian:		
Bandingkan dua kriteria yang tersedia. Pilih mana yang LEBIH PENTING untuk keberhasilan substitusi bahan kue, dan seberapa besar perbedaannya. • Skala 1: Sama Penting • Skala 3: Sedikit Lebih Penting • Skala 5: Jauh Lebih Penting • Skala 7: Sangat Jauh Lebih Penting • Skala 9: Mutlak Lebih Penting		
Tabel Perbandingan Berpasangan:		
No	Pertanyaan Perbandingan	Pilihan Jawaban (Centang Satu)
1	FUNGSI vs TEKSTUR Mana yang lebih prioritas: presisi fungsi teknis bahan atau pencapaian tekstur akhir kue yang optimal?	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☐ Fungsi jauh lebih penting (7) ☒ Fungsi lebih penting (5) ☐ Fungsi sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Tekstur sedikit lebih penting (3)

		☐ Tekstur lebih penting (5) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☐ Tekstur mutlak lebih penting (9)
2	FUNGSI vs RASA Mana yang lebih penting: kesesuaian seluruh fungsi teknis bahan, atau kemiripan cita rasa dengan bahan asli?	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☒ Fungsi jauh lebih penting (7) ☐ Fungsi lebih penting (5) ☐ Fungsi sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7) ☐ Rasa mutlak lebih penting (9)

3	TEKSTUR vs RASA (Mana yang lebih penting: tekstur kue yang mirip, atau rasa yang mirip?)	☐ Tekstur mutlak lebih penting (9) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☐ Tekstur lebih penting (5) ☒ Tekstur sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7) ☐ Rasa mutlak lebih penting (9)
4.	FUNGSI VS KETERSEDIAAN	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☒ Fungsi jauh lebih penting (7) ☐ Fungsi lebih penting (5) ☐ Fungsi sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3)

		☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7) ☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9)
5.	TEKSTUR VS KETERSEDIAAN	☐ Tekstur mutlak lebih penting (9) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☒ Tekstur lebih penting (5) ☐ Tekstur sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3) ☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7) ☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9)

6.	RASA KETERSEDIAAN	VS	☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7) ☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☒ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7) ☐ Rasa mutlak lebih penting (9)
----	----------------------	----	--

Dari hasil di atas, dapat dilihat bahwa praktisi pariwisata memilih:

- Fungsi vs Tekstur = Memilih “ Fungsi lebih penting (5)”
- Fungsi vs Rasa = Memilih “ Fungsi jauh lebih penting (7)”
- Tekstur vs Rasa = memilih “ Tekstur sedikit lebih penting (3)”
- Fungsi vs Ketersediaan = Memilih “ Fungsi lebih penting (5)”
- Tekstur vs Ketersediaan= Memilih “ Tekstur lebih penting (7)”
- Rasa vs Ketersediaan= Memilih “ Rasa sedikit lebih penting (3)

Melakukan hitung manual dengan metode rata-rata geometric:

a. Buat matriks perbandingan

- 1) Fungsi/ Tekstur = 5 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Tekstur = $1/5 = 0.2$
- 2) Fungsi/ Rasa = 7 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Rasa = $1/7 = 0.14$
- 3) Fungsi/ Ketersediaan = 7 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Ketersediaan = $1/7 = 0.14$
- 4) Tekstur/ Rasa = 3 $\rightarrow$ maka Tekstur/ Rasa = $1/3 = 0.33$
- 5) Tekstur/ Ketersediaan = 5 $\rightarrow$ maka Tekstur/ Ketersediaan = $1/5 = 0.2$
- 6) Rasa/ Ketersediaan = 3 $\rightarrow$ maka Rasa/ Ketersediaan = $1/3 = 0.33$
- 7) Diagonal (fungsi/ fungsi, dll) = 1

Tabel 3. 10. Hasil matriks perbandingan

Kriteria	Fungsi	Tekstur	Rasa	Ketersediaan
Fungsi	1	5	7	7
Tekstur	0.2	1	3	5
Rasa	0.14	0.33	1	3
Ketersediaan	0.14	0.2	0.33	1

b. Jumlahkan tiap kolom

Kolom fungsi : $1 + 0.2 + 0.14 + 0.14 = 1.48$

Kolom tekstur : $5 + 1 + 0.33 + 0.2 = 6.53$

Kolom rasa : $7 + 3 + 1 + 0.33 = 11.33$

Kolom ketersediaan : $7 + 5 + 3 + 1 = 16$

c. Normalisasi (Bagi sel sesuai jumlah kolomnya)

$$1) \text{ Fungsi : } (1/1.48 + 5/6.53 + 7/11.33 + 7/16) / 4 \text{ baris} = 0.62 = 62\%$$

$$2) \text{ Tekstur : } (0.2/1.48 + 1/6.53 + 3/11.33 + 5/16) / 4 \text{ baris} = 0.22 = 22\%$$

$$3) \text{ Rasa : } (0.14/1.48 + 0.33/6.53 + 1/11.33 + 3/16) / 4 \text{ baris} = 0.11 = 11\%$$

$$4) \text{ Ketersediaan : } (0.14/1.48 + 0.2/6.53 + 0.33/11.33 + 1/16) / 4 \text{ baris} = 0.05 = 5\%$$

Tabel 3. 11. Normalisasi

Kriteria	Fungsi	Tekstur	Rasa	Ketersediaan	Rata-rata baris
Fungsi	$1/1.48 = 0.676$	$5/6.53 = 0.766$	$7/11.33 = 0.618$	$7/16 = 0.438$	$0.62 = 62\%$
Tekstur	$0.2/1.48 = 0.135$	$1/6.53 = 0.153$	$3/11.33 = 0.265$	$5/16 = 0.313$	$0.22 = 22\%$
Rasa	$0.14/1.48 = 0.095$	$0.33/6.53 = 0.051$	$1/11.33 = 0.088$	$3/16 = 0.188$	$0.11 = 11\%$
Ketersediaan	$0.14/1.48 = 0.095$	$0.2/6.53 = 0.031$	$0.33/11.33 = 0.029$	$1/16 = 0.063$	$0.05 = 5\%$
Jumlah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

d. Uji konsistensi

AHP memiliki syarat yaitu penilaian ahli harus logis dan konsisten, yaitu dengan menggunakan *Consistency Ratio (CR)*

Rumus CR:

$$CR = CI / RI$$

Di mana:

$$CI = \text{Consistency Index} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

RI = Random Index (tabel baku Saaty)

n = jumlah kriteria (n=3)

1) Cara Hitung $\lambda_{\max}$ (Lambda Max):

- a) Kalikan setiap kolom matriks asli dengan bobot prioritas
- b) Jumlahkan hasil perkalian per baris
- c) Bagi hasil jumlah dengan bobot prioritas
- d) Rata-ratakan hasilnya $\rightarrow$ itu $\lambda_{\max}$

Tabel 3. 12. Hasil lambda max

Kriteria	Perhitungan	Hasil
Fungsi	$(1 \times 0.62) + (5 \times 0.22) + (7 \times 0.11) + (7 \times 0.05) = 0.62 + 1.1 + 0.77 + 0.35$	2.48
Tekstur	$(0.2 \times 0.62) + (1 \times 0.22) + (3 \times 0.11) + (5 \times 0.05) = 0.12 + 0.22 + 0.33 + 0.25$	0.92
Rasa	$(0.14 \times 0.62) + (0.33 \times 0.22) + (1 \times 0.11) + (3 \times 0.05) = 0.09 + 0.07 + 0.11 + 0.15$	0.42

Ketersediaan	$(0.14 \times 0.62) + (0.2 \times 0.22) +$ $(0.33 \times 0.11) + (1 \times 0.05) =$ $0.09 + 0.04 + 0.04 + 0.05$	0.22
--------------	---	------

2) Lalu bagi dengan bobot

Fungsi : $2.48/0.62 = 4$

Struktur : $0.92/0.22 = 4.18$

Rasa : $0.42/0.11 = 3.82$

Ketersediaan : $0.22/0.05 = 4.4$

$$\lambda_{\max} = (4 + 4.18 + 3.82 + 4.4) / 4 = 16.4 / 4 = 4.1$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (4.1 - 4) / (4 - 1) = 0.1 / 3 = 0.03$$

$$RI \text{ untuk } n=3 \text{ (dari tabel Saaty)} = 0.90$$

$$CR = CI / RI = 0.03 / 0.90 = 0.033 \rightarrow 3.3 \%$$

Karena $CR = 0.033 < 0.10$, maka penilaian ahli 2 dianggap konsisten.

3. Penilaian Ahli 3

Tabel 3. 13. Lembar Penilaian Ahli 3

LEMBAR VALIDASI AHP		
Nama Ahli	: Tiara Dwi Utari, A. Md. Par.	
Tanggal	: 16 Mei 2026	
Petunjuk Pengisian:		
Bandingkan dua kriteria yang tersedia. Pilih mana yang LEBIH PENTING untuk keberhasilan substitusi bahan kue, dan seberapa besar perbedaannya. - Skala 1: Sama Penting - Skala 3: Sedikit Lebih Penting - Skala 5: Jauh Lebih Penting - Skala 7: Sangat Jauh Lebih Penting - Skala 9: Mutlak Lebih Penting		
Tabel Perbandingan Berpasangan:		
No	Pertanyaan Perbandingan	Pilihan Jawaban (Centang Satu)
1	FUNGSI vs TEKSTUR Mana yang lebih prioritas: presisi fungsi teknis bahan atau pencapaian tekstur akhir kue yang optimal?	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☐ Fungsi jauh lebih penting (7) ☐ Fungsi lebih penting (5) ☐ Fungsi sedikit lebih penting (3) ☒ Sama penting (1)

		☐ Tekstur sedikit lebih penting (3) ☐ Tekstur lebih penting (5) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☐ Tekstur mutlak lebih penting (9)
2	FUNGSI vs RASA Mana yang lebih penting: kesesuaian seluruh fungsi teknis bahan, atau kemiripan cita rasa dengan bahan asli?	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☐ Fungsi jauh lebih penting (7) ☒ Fungsi lebih penting (5) ☐ Fungsi sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7) ☐ Rasa mutlak lebih penting (9)

3	TEKSTUR vs RASA (Mana yang lebih penting: tekstur kue yang mirip, atau rasa yang mirip?)	☐ Tekstur mutlak lebih penting (9) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☐ Tekstur lebih penting (5) ☒ Tekstur sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7) ☐ Rasa mutlak lebih penting (9)
4.	FUNGSI VS KETERSEDIAAN	☐ Fungsi mutlak lebih penting (9) ☐ Fungsi jauh lebih penting (7) ☐ Fungsi lebih penting (5) ☒ Fungsi sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1)

		☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3) ☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7) ☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9)
5.	TEKSTUR VS KETERSEDIAAN	☐ Tekstur mutlak lebih penting (9) ☐ Tekstur jauh lebih penting (7) ☐ Tekstur lebih penting (5) ☒ Tekstur sedikit lebih penting (3) ☐ Sama penting (1) ☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3) ☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7)

		☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9)
6.	RASA VS KETERSEDIAAN	☐ Ketersediaan mutlak lebih penting (9) ☐ Ketersediaan jauh lebih penting (7) ☐ Ketersediaan lebih penting (5) ☐ Ketersediaan sedikit lebih penting (3) ☒ Sama penting (1) ☐ Rasa sedikit lebih penting (3) ☐ Rasa lebih penting (5) ☐ Rasa jauh lebih penting (7)

		☐ Rasa mutlak lebih penting (9)

Dari hasil di atas, dapat dilihat bahwa praktisi pariwisata memilih:

- a. Fungsi vs Tekstur = Memilih “ Sama penting (1)”
- b. Fungsi vs Rasa = Memilih “ Fungsi lebih penting (5)”
- c. Tekstur vs Rasa = memilih “ Sama penting (1)”
- d. Fungsi vs Ketersediaan = Memilih “ Fungsi sedikit lebih penting (3)”
- e. Tekstur vs Ketersediaan= Memilih “ Tekstur sedikit lebih penting (3)”
- f. Rasa vs Ketersediaan= Memilih “ Sama penting (1)”

Melakukan hitung manual dengan metode rata-rata geometric:

a. Buat matriks perbandingan

- 1) Fungsi/ Tekstur = 1 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Tekstur = $1/1 = 1$
- 2) Fungsi/ Rasa = 5 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Rasa = $1/5 = 0.2$
- 3) Fungsi/ Ketersediaan = 3 $\rightarrow$ maka Fungsi/ Ketersediaan = $1/3 = 0.33$
- 4) Tekstur/ Rasa = 3 $\rightarrow$ maka Tekstur/ Rasa = $3/1 = 3$
- 5) Tekstur/ Ketersediaan = 3 $\rightarrow$ maka Tekstur/ Ketersediaan = $1/3 = 0.33$
- 6) Rasa/ Ketersediaan = 1 $\rightarrow$ maka Rasa/ Ketersediaan = $1/1 = 1$
- 7) Diagonal (fungsi/ fungsi, dll) = 1

Tabel 3. 14. Hasil matriks perbandingan

Kriteria	Fungsi	Tekstur	Rasa	Ketersediaan
Fungsi	1	1	5	3
Tekstur	1	1	3	3
Rasa	0.2	0.33	1	1
Ketersediaan	0.33	0.33	1	1

b. Jumlahkan tiap kolom

- 1) Kolom fungsi : $1 + 1 + 0.2 + 0.33 = 2.53$
- 2) Kolom tekstur : $1 + 1 + 0.33 + 0.33 = 2.66$
- 3) Kolom rasa : $5 + 3 + 1 + 1 = 10$
- 4) Kolom Ketersediaan : $3 + 3 + 1 + 1 = 8$

c. Normalisasi (Bagi sel sesuai jumlah kolomnya)

$$1) \text{ Fungsi : } (1/2.53 + 1/2.66 + 5/10 + 3/8) / 4 \text{ baris} = 0.41 = 41\%$$

$$2) \text{ Tekstur : } (1/2.53 + 1/2.66 + 3/10 + 3/8) / 4 \text{ baris} = 0.36 = 36\%$$

$$3) \text{ Rasa : } (0.2/2.53 + 0.33/2.66 + 1/10 + 1/8) / 4 \text{ baris} = 0.11 = 11\%$$

$$4) \text{ Ketersediaan : } (0.33/2.53 + 0.33/2.66 + 1/10 + 1/8) / 4 \text{ baris} = 0.12 = 12\%$$

Tabel 3. 15. Hasil Normalisasi

Kriteria	Fungsi	Tekstur	Rasa	Ketersediaan	Rata-rata baris
Fungsi	$1/2.53 = 0.395$	$1/2.66 = 0.376$	$5/10 = 0.5$	$3/8 = 0.375$	$0.41 = 41\%$
Tekstur	$1/2.53 = 0.395$	$1/2.66 = 0.376$	$3/10 = 0.3$	$3/8 = 0.375$	$0.36 = 36\%$
Rasa	$0.2/2.53 = 0.079$	$0.33/2.66 = 0.124$	$1/10 = 0.1$	$1/8 = 0.125$	$0.11 = 11\%$
Ketersediaan	$0.33/2.53 = 0.130$	$0.33/2.66 = 0.124$	$1/10 = 0.1$	$1/8 = 0.125$	$0.12 = 12\%$
Jumlah	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

d. Uji konsistensi

AHP memiliki syarat yaitu penilaian ahli harus logis dan konsisten, yaitu dengan menggunakan *Consistency Ratio (CR)*

Rumus CR:

$$CR = CI / RI$$

Di mana:

$$CI = \text{Consistency Index} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

RI = Random Index (tabel baku Saaty)

n = jumlah kriteria (n=3)

1) Cara Hitung $\lambda_{\max}$ (Lambda Max):

- a) Kalikan setiap kolom matriks asli dengan bobot prioritas
- b) Jumlahkan hasil perkalian per baris
- c) Bagi hasil jumlah dengan bobot prioritas
- d) Rata-ratakan hasilnya $\rightarrow$ itu $\lambda_{\max}$

Tabel 3. 16. Hasil lambda max

Kriteria	Perhitungan	Hasil
Fungsi	$(1 \times 0.41) + (1 \times 0.36) + (5 \times 0.11) + (3 \times 0.12) = 0.41 + 0.36 + 0.55 + 0.36$	1.68
Struktur	$(1 \times 0.41) + (1 \times 0.36) + 3 \times 0.11 + (3 \times 0.12) = 0.41 + 0.36 + 0.33 + 0.36$	1.46
Rasa	$(0.2 \times 0.41) + (0.33 \times 0.36) + (1 \times 0.11) + (1 \times 0.12) = 0.08 + 0.12 + 0.11 + 0.12$	0.43

Ketersediaan	$(0.33 \times 0.41) + (0.33 \times 0.36) + (1 \times 0.11) + (1 \times 0.12) = 0.14 + 0.12 + 0.11 + 0.12$	0.49
--------------	---	------

2) Lalu bagi dengan bobot

$$\text{Fungsi} : 1.68/0.41 = 4.1$$

$$\text{Struktur} : 1.46/0.36 = 4.05$$

$$\text{Rasa} : 0.43/0.11 = 3.90$$

$$\text{Ketersediaan} : 0.49/0.12 = 4.08$$

$$\lambda_{\max} = (4.1 + 4.05 + 3.90 + 4.08) / 4 = 16.13/4 = 4.032$$

$$\text{CI} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (4.95 - 4) / (4 - 1) = 0.032 / 3 = 0.011$$

$$\text{RI untuk } n=3 \text{ (dari tabel Saaty)} = 0.90$$

$$\text{CR} = \text{CI} / \text{RI} = 0.011 / 0.90 = 0.012 \rightarrow 1.2\%$$

Karena $\text{CR} = 0.012 < 0.10$, maka penilaian ahli 3 dianggap konsisten.

Setelah mendapat hasil dari ketiga para ahli, maka menjumlahkan semua bobot hasil penilaian para ahli, kemudian mencari rata-rata untuk mendapat hasil bobot final)

Tabel 3. 17. Hasil bobot prioritas

Kriteria	Perhitungan	Bobot Final
Fungsi	$(0.63 + 0.62 + 0.41) = 1.66/3 = 0.553$	$0.553 = 55.3\%$
Struktur	$(0.21 + 0.22 + 0.36) = 0.79/3 = 0.263$	$0.263 = 26.3\%$
Rasa	$(0.11 + 0.11 + 0.11) = 0.33/3 = 0.11$	$0.11 = 11\%$
Ketersediaan	$(0.05 + 0.05 + 0.12) = 0.22/3 = 0.073$	$0.073 = 7.3\%$

Penentuan bobot prioritas kriteria dalam penelitian ini dilakukan melalui metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dengan melibatkan tiga orang pakar yang memiliki kompetensi di bidang pastry dan bakery, yaitu Yulia Emresa Br Tarigan, Aklul Muhari, dan Tiara Dwi Utari. Setiap pakar mengisi kuesioner perbandingan berpasangan (pairwise comparison) untuk menilai tingkat kepentingan relatif antar empat kriteria yang telah ditetapkan, yaitu Fungsi Bahan, Tekstur, Rasa, dan Ketersediaan, menggunakan skala 1 hingga 9 sesuai dengan standar Saaty. Pendekatan multi-pakar ini dipilih untuk menghasilkan bobot yang lebih objektif dan merepresentasikan konsensus dari berbagai sudut pandang ahli, sehingga mengurangi subjektivitas yang mungkin muncul apabila hanya melibatkan satu pakar saja.

Sebelum dilakukan penggabungan, penilaian masing-masing pakar dihitung secara individual untuk memastikan konsistensi logika penilaiannya. Berdasarkan hasil perhitungan, Pakar 1 menghasilkan bobot Fungsi sebesar 63%, Tekstur 21%, Rasa 11%, dan Ketersediaan 5% dengan nilai Consistency Ratio (CR) sebesar

0,097. Pakar 2 menghasilkan bobot Fungsi sebesar 62%, Tekstur 22%, Rasa 11%, dan Ketersediaan 5% dengan CR sebesar 0,033. Sementara itu, Pakar 3 memberikan penilaian yang sedikit berbeda dengan bobot Fungsi sebesar 41%, Tekstur 36%, Rasa 11%, dan Ketersediaan 12% dengan CR sebesar 0,012. Ketiga pakar dinyatakan konsisten karena seluruh nilai CR berada di bawah ambang batas 0,10 yang dipersyaratkan oleh Saaty, sehingga penilaian mereka dapat dilanjutkan ke tahap agregasi.

Karena melibatkan lebih dari satu pakar, penggabungan penilaian tidak dilakukan dengan rata-rata aritmatik sederhana, melainkan menggunakan rata-rata geometrik (geometric mean) pada level matriks perbandingan berpasangan. Pendekatan ini direkomendasikan oleh Saaty karena mampu mempertahankan sifat resiprokal matriks AHP, di mana jika kriteria A dinilai lima kali lebih penting daripada kriteria B, maka secara otomatis kriteria B bernilai seperlima dari kriteria A. Melalui proses ini, keenam pasangan kriteria digabungkan nilai-nilainya dari ketiga pakar. Sebagai contoh, perbandingan Fungsi terhadap Tekstur yang masing-masing diberi nilai 5, 5, dan 1 oleh ketiga pakar menghasilkan nilai geometrik sebesar 2,924. Perbandingan Fungsi terhadap Rasa menghasilkan nilai 6,257, Fungsi terhadap Ketersediaan sebesar 4,718, Tekstur terhadap Rasa sebesar 3,000, Tekstur terhadap Ketersediaan sebesar 4,217, serta Rasa terhadap Ketersediaan sebesar 2,080. Nilai-nilai ini kemudian disusun menjadi matriks perbandingan berpasangan agregat yang merepresentasikan konsensus kolektif dari ketiga pakar.

Selanjutnya, matriks agregat tersebut dinormalisasi dengan membagi setiap elemen dengan jumlah kolomnya, kemudian dihitung rata-rata dari setiap baris untuk memperoleh bobot prioritas final. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kriteria Fungsi Bahan

memperoleh bobot tertinggi sebesar 0,553 atau 55,3%, diikuti oleh Tekstur sebesar 0,263 atau 26,3%, Rasa sebesar 0,11 atau 11%, dan Ketersediaan sebesar 0,073 atau 7,3%. Hasil ini mengindikasikan bahwa dalam konteks substitusi bahan kue untuk penderita alergi, aspek fungsi teknis bahan menjadi pertimbangan paling dominan, karena bahan pengganti harus mampu menjalankan peran bahan asli baik sebagai pengembang, pengikat, pelembap, maupun pemberi struktur agar produk akhir tetap memiliki karakteristik yang mendekati aslinya. Tekstur menempati posisi kedua karena sangat mempengaruhi penerimaan konsumen, sementara rasa dan ketersediaan meskipun tetap penting, memiliki bobot yang lebih rendah.

Untuk memastikan bahwa penggabungan penilaian dari ketiga pakar tidak menghasilkan matriks yang inkonsisten, dilakukan uji konsistensi pada matriks agregat. Perhitungan nilai Lambda Maksimum (λ_{max}) dilakukan dengan mengalikan matriks agregat dengan vektor bobot, kemudian membagi hasilnya dengan bobot masing-masing kriteria dan merata-ratakan, sehingga diperoleh nilai λ_{max} sebesar 4,096. Dari nilai tersebut dihitung Consistency Index (CI) sebesar 0,032, dan dengan Random Index (RI) sebesar 0,90 untuk empat kriteria, diperoleh Consistency Ratio (CR) sebesar 0,036 atau 3,6%. Karena nilai CR ini jauh di bawah ambang batas 0,10, maka matriks gabungan dinyatakan konsisten, dan bobot prioritas yang dihasilkan dapat dipertanggungjawabkan secara metodologis untuk digunakan dalam sistem.

Berdasarkan seluruh proses tersebut, bobot prioritas final yang ditetapkan untuk implementasi sistem rekomendasi adalah Fungsi Bahan sebesar 0,553, Tekstur sebesar 0,263, Rasa sebesar 0,11, dan Ketersediaan sebesar 0,073. Bobot-bobot ini kemudian disimpan ke

dalam basis pengetahuan sistem dan digunakan pada tahap integrasi AHP (Weighted Sum Model) dalam proses Logika Fuzzy, di mana setiap kandidat bahan substitusi yang telah lolos dari proses Forward Chaining akan dihitung skor akhirnya menggunakan formula: $\text{Skor Akhir} = (\text{Sfungsi} \times 0,553) + (\text{Stekstur} \times 0,263) + (\text{Srasa} \times 0,11) + (\text{Sketersediaan} \times 0,073)$, dengan S merupakan skor hasil defuzzifikasi masing-masing variabel. Dengan demikian, sistem tidak hanya merekomendasikan bahan yang aman dari alergen, tetapi juga bahan yang paling optimal dari segi kualitas berdasarkan penilaian para ahli.

3.4. Perancangan Sistem

a. Perancangan Desain Sistem

Analisis kebutuhan sistem dilakukan untuk mengetahui kebutuhan yang diperlukan dalam pembangunan Sistem Pakar Penentuan Substitusi Bahan Kue bagi Penderita Alergi Menggunakan *Metode Forward Chaining* dan Logika *Fuzzy* Berbasis Web. Analisis ini bertujuan agar sistem yang dikembangkan dapat berjalan sesuai dengan kebutuhan pengguna dan admin.

1. Identifikasi masalah

Berdasarkan kajian literatur dan pengamatan umum, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan yang dihadapi oleh pengguna, khususnya penderita alergi bahan pangan dalam proses baking, antara lain:

- 1) Pengguna mengalami kesulitan dalam menentukan bahan substitusi baking yang aman sesuai dengan jenis alergi yang dimiliki.

- 2) Informasi mengenai substitusi bahan baking yang tersedia masih bersifat umum dan belum disesuaikan dengan kebutuhan serta kondisi alergi masing-masing pengguna.
- 3) Tidak semua pengguna memahami fungsi kimiawi dan fisik bahan baking, sehingga penggantian bahan sering dilakukan tanpa mempertimbangkan dampaknya terhadap hasil akhir produk.
- 4) Penentuan bahan substitusi masih banyak bergantung pada pengalaman pribadi atau percobaan berulang (trial and error), yang dapat menyebabkan kegagalan produk atau risiko alergi.
- 5) Pengguna membutuhkan media yang mudah diakses untuk memperoleh rekomendasi substitusi bahan baking yang cepat, akurat, dan mudah dipahami.

Berdasarkan identifikasi masalah tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengguna, khususnya penderita alergi bahan pangan, membutuhkan suatu sistem yang mampu membantu dalam menentukan substitusi bahan baking yang aman dan sesuai. Keterbatasan pengetahuan pengguna mengenai fungsi bahan serta banyaknya informasi yang bersifat umum menyebabkan proses pemilihan bahan substitusi menjadi kurang efektif dan berisiko. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem pakar berbasis web yang dapat memberikan rekomendasi substitusi bahan baking secara tepat dengan mempertimbangkan jenis alergi dan karakteristik produk baking, sehingga dapat membantu pengguna dalam mengambil keputusan secara lebih akurat dan aman.

Analisis kebutuhan dibagi menjadi dua, yaitu:

1) Kebutuhan Fungsional

Kebutuhan fungsional merupakan kebutuhan yang berkaitan langsung dengan fungsi sistem. Adapun kebutuhan fungsional sistem ini meliputi:

- a) Sistem mampu menerima input data alergi dan produk baking dari pengguna.
- b) Sistem mampu melakukan proses inferensi menggunakan metode forward chaining.
- c) Sistem mampu melakukan perhitungan tingkat kecocokan menggunakan logika fuzzy.
- d) Sistem mampu menampilkan rekomendasi substitusi bahan baking kepada pengguna.
- e) Sistem mampu menyimpan dan menampilkan data konsultasi.

2) Kebutuhan non-fungsional

Kebutuhan non-fungsional berkaitan dengan kualitas sistem. Adapun kebutuhan non-fungsional sistem meliputi:

- b) Sistem berbasis web sehingga dapat diakses melalui browser.
- c) Sistem memiliki antarmuka yang sederhana dan mudah digunakan.
- d) Sistem mampu memberikan hasil rekomendasi secara cepat.
- e) Sistem memiliki keamanan data pada sisi admin.
- f) Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut sesuai kebutuhan.

c. Analisis sistem lama

Pada kondisi saat ini, penentuan substitusi bahan baking bagi penderita alergi masih dilakukan secara manual. Pengguna menentukan bahan pengganti berdasarkan pengalaman pribadi, informasi dari buku resep, artikel daring, atau rekomendasi dari

orang lain. Informasi yang diperoleh umumnya bersifat umum dan tidak mempertimbangkan secara spesifik jenis alergi yang dimiliki oleh pengguna.

Selain itu, pengguna sering kali melakukan proses trial and error dalam mengganti bahan baking, yang dapat menyebabkan hasil produk kurang optimal atau bahkan berisiko menimbulkan reaksi alergi. Tidak adanya sistem yang dapat memberikan rekomendasi secara terstruktur dan berbasis aturan menyebabkan proses pengambilan keputusan menjadi tidak konsisten dan memerlukan waktu yang lebih lama.

d. Analisis sistem baru

Berdasarkan analisis sistem lama yang masih dilakukan secara manual dan belum mampu memberikan rekomendasi substitusi bahan baking secara spesifik dan konsisten, maka diperlukan suatu sistem baru yang dapat membantu pengguna dalam mengambil keputusan dengan lebih tepat. Sistem yang direkomendasikan adalah Sistem Pakar Penentuan Substitusi Bahan Baking bagi Penderita Alergi yang dibangun berbasis web.

Sistem ini dirancang untuk mampu menerima input berupa jenis alergi dan jenis produk baking dari pengguna, kemudian memproses data tersebut menggunakan metode *forward chaining* dan logika *fuzzy*. Metode *forward chaining* digunakan untuk menarik kesimpulan berdasarkan aturan yang telah ditentukan, sedangkan logika *fuzzy* digunakan untuk menangani ketidakpastian dan menentukan tingkat kecocokan bahan substitusi.

Dengan adanya sistem pakar ini, diharapkan pengguna dapat memperoleh rekomendasi substitusi bahan baking yang aman, akurat, dan mudah dipahami tanpa harus melakukan percobaan berulang. Selain itu, sistem ini juga memudahkan admin dalam

mengelola data bahan, data alergi, aturan, serta parameter yang digunakan, sehingga sistem dapat dikembangkan dan diperbarui sesuai dengan kebutuhan di masa mendatang. Tahap ini mencakup pembuatan rancangan sistem berdasarkan hasil analisis.

Tabel 3. 18. Rekomendasi desain

Aktor	Kegiatan	Informasi
Admin	1. Login	Data Login
	2. Mengelola data bahan baking.	Data Bahan Baking
	3. Mengelola data alergi.	Data Alergi
	4. Mengelola produk baking	Data Jenis baking Data fungsi bahan
	5. Mengelola fungsi bahan	Data Aturan
	6. Mengelola aturan forward chaining.	Data Bahan Pengganti
	7. Mengelola bahan pengganti	Data Subs Bahan Pengganti
	8. Mengelola subs bahan pengganti	Data Konsultasi Data
	9. Melihat data konsultasi	Rekomendasi
	10. Mengelola rekomendasi substitusi bahan	Substitusi
Pengguna	1. Menginput jenis alergi	Data Alergi
	2. Menginput jenis kue	Data Produk Baking
	3. Melihat rekomendasi substitusi bahan	Data Rekomendasi Substitusi

Dari sistem lama sebelumnya dapat membantu membuat sistem baru yang dapat menyempurnakan kekurangan pada sistem lama. Adapun proses dari sistem baru adalah sebagai berikut:

1) Admin

- a) Proses diawali oleh admin dengan memulai aplikasi.
- b) Admin membuka aplikasi dan sistem menampilkan halaman depan aplikasi.
- c) Admin memilih menu login.
- d) Admin mengisi form login, kemudian sistem memverifikasi dan menampilkan halaman home admin.
- e) Admin melakukan Pengelolaan Data oleh Admin
 - i) Admin memilih menu data bahan baking.
 - (1) Sistem mengambil data bahan baking dari basis data.
 - (2) Sistem menampilkan halaman data bahan baking.
 - (3) Admin dapat menambah, mengubah, atau menghapus data bahan baking.
 - (4) Perubahan data kemudian disimpan ke dalam basis data.
 - ii) Admin memilih menu data alergi.
 - (1) Sistem mengambil data alergi dari basis data.
 - (2) Sistem menampilkan halaman data alergi.
 - (3) Admin mengelola data alergi dan menyimpannya ke basis data.
 - iii) Admin memilih menu data fungsi bahan.
 - (1) Sistem mengambil data fungsi bahan dari basis data
 - (2) Sistem menampilkan halaman data fungsi bahan

- (3) Admin mengelola data fungsi bahan dan menyimpannya ke basis data,
- iv) Admin memilih menu data jenis produk baking.
 - (1) Sistem mengambil data produk baking dari basis data.
 - (2) Sistem menampilkan halaman data produk baking.
 - (3) Admin mengelola data jenis produk baking dan menyimpan data tersebut.
- v) Admin memilih menu data bahan pengganti.
 - (1) Sistem mengambil data bahan pengganti dari basis data.
 - (2) Sistem menampilkan halaman data bahan pengganti.
 - (3) Admin mengelola data bahan pengganti dan menyimpan data tersebut
- vi) Admin memilih menu data subs bahan pengganti.
 - (1) Sistem mengambil data subs bahan pengganti dari basis data.
 - (2) Sistem menampilkan halaman data subs bahan pengganti.
 - (3) Admin mengelola data subs bahan pengganti dan menyimpan data tersebut
- f) Admin melakukan pengelolaan Basis Pengetahuan
 - i) Admin memilih menu aturan forward chaining.
 - (1) Sistem mengambil data aturan dari basis data.
 - (2) Sistem menampilkan halaman data aturan.
 - (3) Admin mengelola aturan forward chaining dan menyimpan perubahan data.

g) Pengelolaan Rekomendasi dan Konsultasi

ii) Admin memilih menu rekomendasi substitusi bahan.

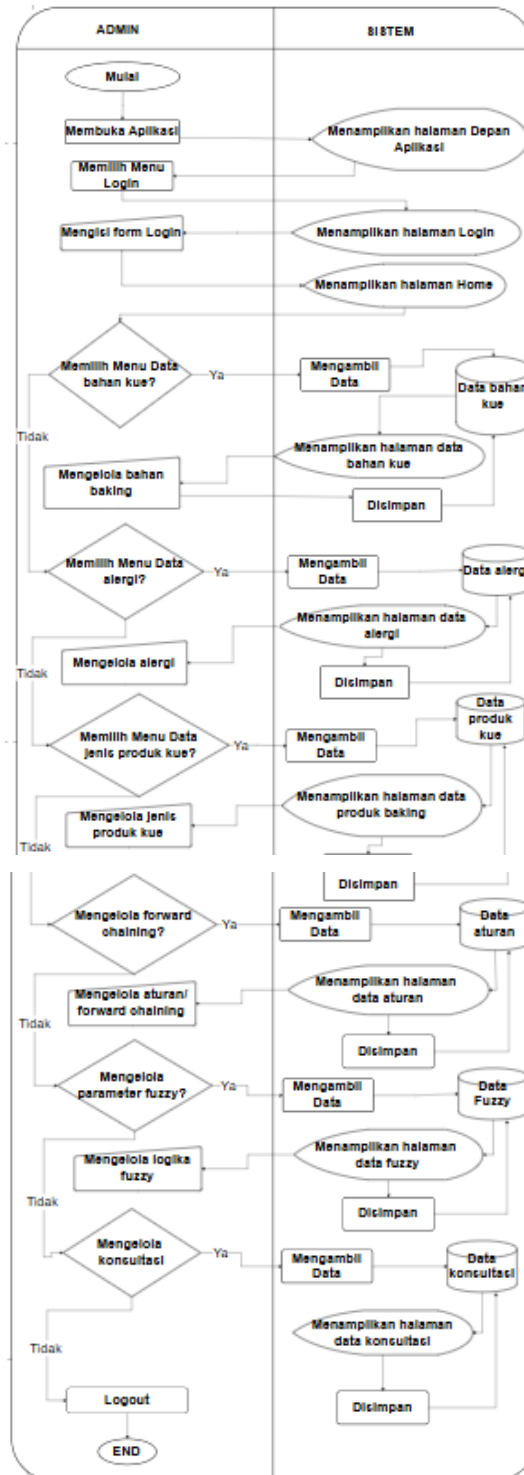
- (1) Sistem mengambil data rekomendasi dari basis data.
- (2) Sistem menampilkan halaman data rekomendasi substitusi bahan.
- (3) Admin dapat mengelola data rekomendasi jika diperlukan.

iii) Admin memilih menu data konsultasi.

- (1) Sistem mengambil data konsultasi dari basis data.
- (2) Sistem menampilkan halaman data konsultasi.
- (3) Admin dapat melihat atau mengunduh data konsultasi.

h) Admin melakukan logout.

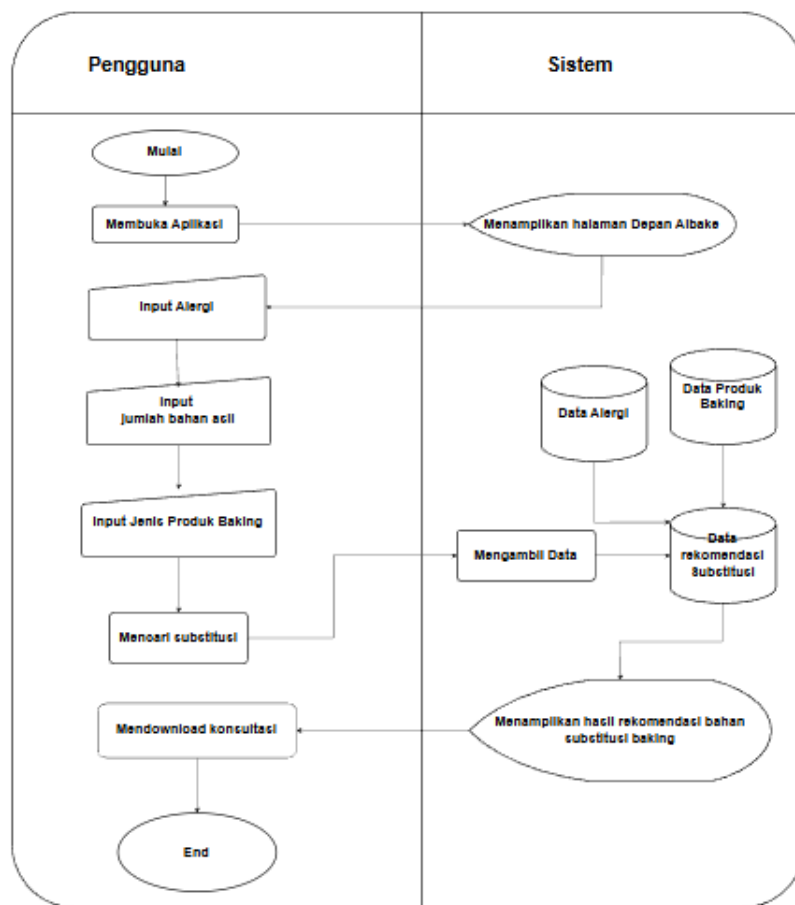
i) Proses admin berakhir.



Gambar 3. 6. Flowchart admin

2) Pengguna

- b) Proses diawali oleh pengguna dengan memulai aplikasi.
- c) Pengguna membuka aplikasi sistem pakar melalui halaman utama.
- d) Sistem menampilkan halaman depan aplikasi sebagai antarmuka awal.
- e) Pengguna melakukan input jenis alergi yang dimiliki.
- f) Pengguna memasukkan jumlah bahan aktif yang akan digunakan.
- g) Pengguna melakukan input jenis produk baking yang akan dibuat.
- h) Berdasarkan data yang dimasukkan, sistem melakukan proses pengambilan data dari basis data alergi dan basis data produk baking.
- i) Sistem memproses data tersebut untuk menghasilkan rekomendasi substitusi bahan baking.
- j) Sistem menampilkan hasil rekomendasi substitusi bahan baking kepada pengguna.
- k) Pengguna dapat mengunduh hasil konsultasi sebagai informasi tambahan.
- l) Proses berakhir setelah hasil rekomendasi ditampilkan dan/atau diunduh oleh pengguna.



Gambar 3. 7. Flowchart pengguna

Desain sistem meliputi:

1. Desain konteks

Desain konteks menggambarkan hubungan antara sistem utama dengan aktor eksternal yang berinteraksi dengannya. Desain konteks menunjukkan bahwa sistem pakar rekomendasi substitusi bahan baking berinteraksi dengan dua aktor utama, yaitu Admin dan Pengguna. Admin berperan dalam mengelola data sistem, meliputi data bahan baking, data alergi, data fungsi bahan, data bahan

pengganti, data subs bahan pengganti, aturan forward chaining. Selain itu, admin juga dapat melihat data konsultasi pengguna.

Pengguna berinteraksi dengan sistem dengan memasukkan jenis alergi dan jenis produk baking yang ingin dibuat. Berdasarkan input tersebut, sistem akan memproses data menggunakan metode forward chaining dan logika fuzzy untuk menghasilkan rekomendasi substitusi bahan baking yang aman dan sesuai bagi pengguna.

Tabel 3. 19. Desain konteks admin

Aktivitas	Input	Output
Login	Memasukkan username dan password (Data Login)	Mendapatkan informasi berhasil login (Info Login)
Mengelola data bahan baking.	Mengelola data bahan baking, seperti nama bahan, fungsi bahan, kategori bahan, potensi allergen. (Data bahan baking)	Admin menerima informasi data bahan baking apa saja. (Info bahan baking).
Mengelola data alergi.	Memasukkan jenis data alergi (Data alergi).	Mendapat informasi data alergi (Info alergi)
Mengelola produk baking	Memasukkan jenis produk baking (Data produk baking)	Menerima informasi data produk baking (info produk baking)

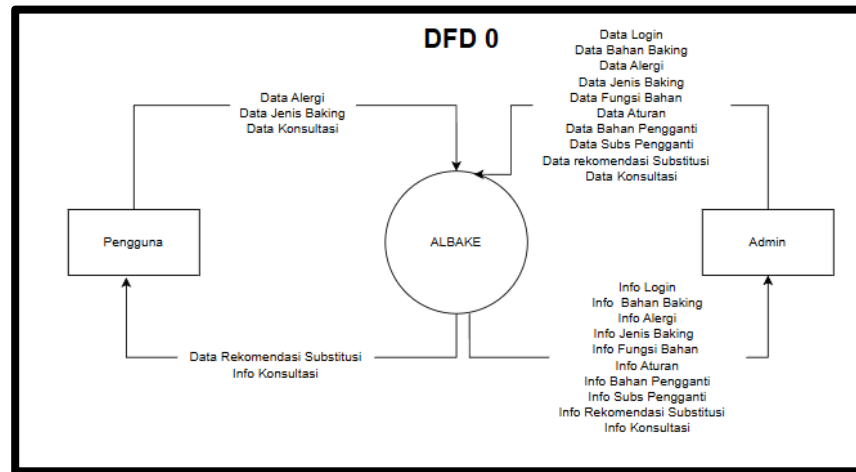
Mengelola fungsi bahan	Memasukkan jenis fungsi bahan (Data fungsi bahan)	Menerima informasi data fungsi bahan (info fungsi bahan)
Mengelola bahan pengganti	Memasukkan jenis bahan pengganti (Data bahan pengganti)	Menerima informasi data bahan pengganti (info bahan pengganti)
Mengelola subs bahan pengganti	Memasukkan jenis subs bahan pengganti (Data subs bahan pengganti)	Menerima informasi data subs bahan pengganti (info subs bahan pengganti)
Mengelola aturan.	Admin memasukkan aturan berdasarkan alergi dan bahan baking (Data aturan)	Mendapat informasi aturan forward chaining (Info aturan)
Mengelola rekomendasi hasil	Admin melihat data rekomendasi (Data hasil rekomendasi)	Admin mendapat informasi mengenai data rekomendasi hasil (Info hasil rekomendasi)
Melihat data konsultasi	Admin mengecek data hasil konsultasi	Mendapat informasi data

	pengguna (Data konsultasi)	konsultasi (Info konsultasi)
--	-------------------------------	---------------------------------

Tabel 3. 20. Desain konteks pengguna

Aktivitas	Input	Output
Menginput bahan alergi	Pengguna memasukkan bahan alergi beserta jumlahnya(Data alergi)	Pnegguna menemukan informasi bahan alergi tersimpan (Info Alergi)
Menginput jenis produk baking	Pengguna memasukkan jenis produk baking (Data produk baking)	Pengguna mendapat informasi jenis produk baking (Data Produk baking)
Melihat rekomendasi substitusi bahan	Data alergi dan data produk baking (Data Rekomendasi Substitusi)	Mendapat rekomendasi substitusi bahan baking (Info rekomendasi Substitusi)

2. DFD



Gambar 3. 8DFD level 0

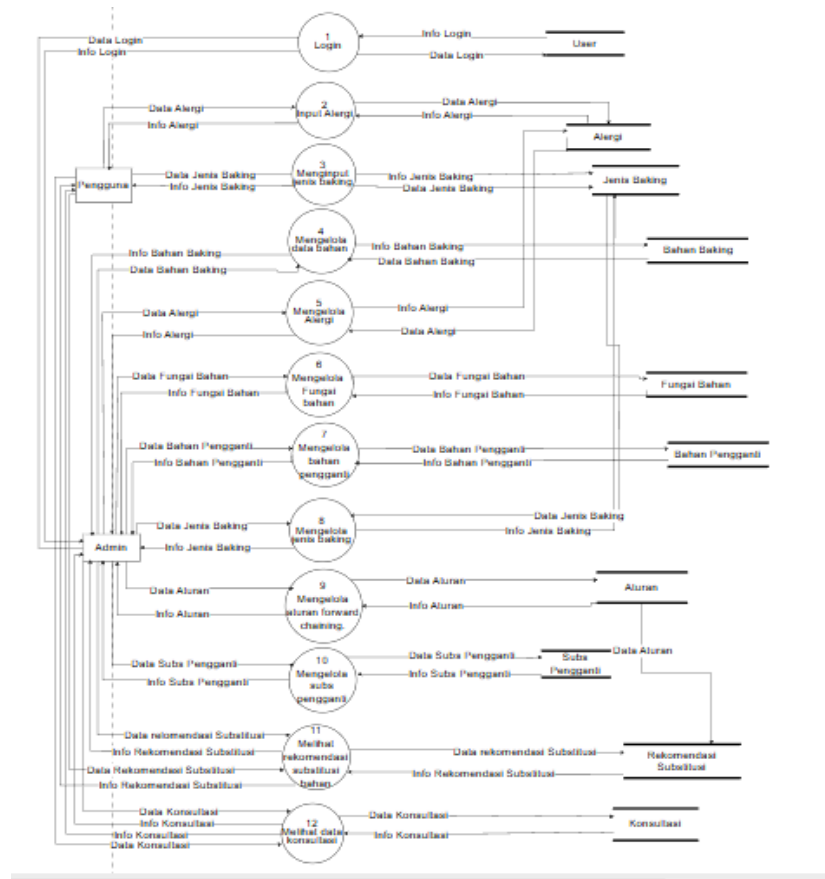
DFD Level 0 menggambarkan alur data utama antara pengguna, admin, dan sistem sebagai sistem pakar rekomendasi substitusi bahan baking. Pada level ini, sistem dipandang sebagai satu proses tunggal yang berinteraksi langsung dengan entitas eksternal.

Pengguna berinteraksi dengan sistem dengan mengirimkan data alergi, data produk *baking*, dan data konsultasi. Data tersebut kemudian diproses oleh sistem untuk menghasilkan rekomendasi substitusi bahan baking yang aman sesuai dengan alergi pengguna. Selain itu, sistem juga menampilkan informasi hasil konsultasi kepada pengguna.

Admin berperan dalam mengelola seluruh data yang digunakan oleh sistem, meliputi data bahan baking, data alergi, data produk baking, data aturan forward chaining, data *fuzzy*, serta data rekomendasi substitusi. Admin juga menerima kembali informasi berupa info login, info data, dan info konsultasi sebagai hasil pengelolaan dan pemantauan sistem.

Dengan demikian, DFD Level 0 menunjukkan bahwa sistem berfungsi sebagai pusat pengolahan data yang menghubungkan

kebutuhan pengguna dengan pengelolaan data oleh admin untuk menghasilkan rekomendasi substitusi bahan baking yang tepat.



Gambar 3. 9. DFD level 1

DFD Level 1 merupakan penguraian lebih detail dari DFD Level 0 pada sistem. Diagram ini menunjukkan proses-proses utama yang terjadi di dalam sistem serta aliran data antara Pengguna, Admin, dan basis data.

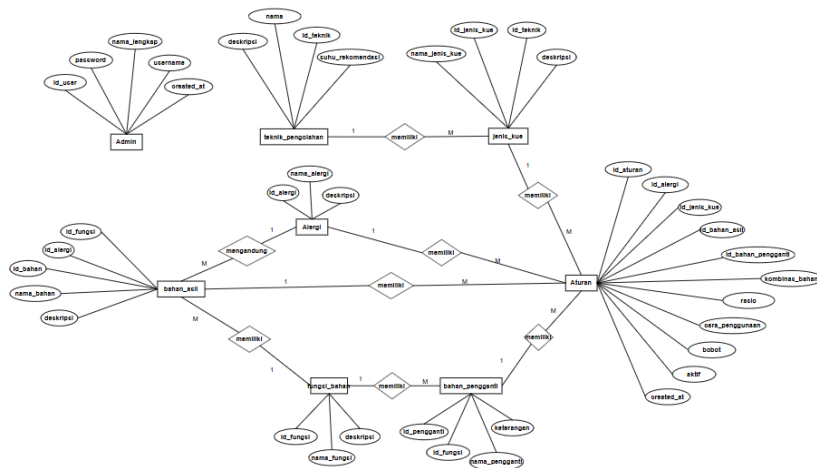
Pengguna dapat melakukan input data alergi dan data produk baking sebagai dasar konsultasi. Data tersebut diproses oleh sistem dan disimpan pada basis data terkait untuk menghasilkan rekomendasi substitusi bahan baking yang sesuai.

Admin berperan dalam mengelola data pendukung sistem, meliputi data bahan baking, data alergi, data produk baking, aturan forward chaining, serta parameter logika fuzzy. Data-data ini digunakan sebagai dasar proses inferensi dalam sistem pakar. Selain itu, admin juga dapat melihat data rekomendasi substitusi dan data konsultasi yang dihasilkan dari interaksi pengguna dengan sistem.

Dengan adanya pemecahan proses pada DFD Level 1, sistem dapat mengelola input, pemrosesan, dan output data secara terstruktur sehingga rekomendasi substitusi bahan baking dapat dihasilkan secara akurat dan sistematis.

b. Perancangan Basis Data

1) ERD (*Entity Relationship Diagram*)



Gambar 3. 10. ERD

Entity Relationship Diagram (ERD) sistem pakar substitusi bahan kue terdiri atas delapan entitas, yaitu Admin, teknik_pengolahan, jenis_kue, Alergi, bahan_asli, fungsi_bahan, bahan_pengganti, dan Aturan, yang saling terhubung melalui delapan relasi dengan kardinalitas satu-ke-banyak (1:M). Entitas teknik_pengolahan memiliki relasi dengan jenis_kue, yang berarti satu teknik pengolahan dapat digunakan pada banyak jenis kue,

namun setiap jenis kue hanya menggunakan satu teknik pengolahan. Entitas Alergi memiliki relasi "mengandung" terhadap bahan_asli, yang berarti satu jenis alergi dapat terkandung dalam banyak bahan asli, sedangkan setiap bahan asli hanya memiliki satu pemicu alergi. Selain itu, entitas fungsi_bahan memiliki relasi terhadap bahan_asli maupun bahan_pengganti, yang berarti satu fungsi bahan dapat dimiliki oleh banyak bahan asli dan banyak bahan pengganti, namun setiap bahan hanya memiliki satu fungsi utama.

Entitas Aturan menjadi pusat logika rekomendasi sistem karena terhubung dengan empat entitas sekaligus melalui kardinalitas 1:M. Satu alergi dapat menjadi kondisi pada banyak aturan, satu jenis kue dapat muncul pada banyak aturan, satu bahan asli dapat disubstitusikan dalam banyak aturan, dan satu bahan pengganti dapat direkomendasikan dalam banyak aturan. Pada entitas Aturan tersimpan informasi penting seperti kombinasi bahan, rasio substitusi, cara penggunaan, bobot, serta status aktif aturan, yang digunakan sistem untuk menentukan bahan pengganti yang aman dan sesuai bagi kombinasi alergi dan jenis kue tertentu.

Sementara itu, entitas Admin berdiri sendiri tanpa relasi terhadap entitas lain karena hanya digunakan untuk autentikasi pengguna dan pengelolaan sistem. Secara keseluruhan, seluruh relasi dalam ERD ini menggunakan kardinalitas 1:M yang konsisten dengan penyimpanan foreign key pada tabel-tabel anak. Dengan struktur tersebut, basis data mampu mendukung proses rekomendasi yang dilakukan sistem, mulai dari penyaringan bahan yang aman berdasarkan alergi hingga penyajian bahan substitusi yang telah diperingkat.

Tabel 3. 21. Tabel admin

Nama <i>Field</i>	Tipe Data	Panjang	Keterangan
<i>id_user</i>	<i>INT</i>	11	<i>Primary key</i>
<i>nama_lengkap</i>	<i>VARCHAR</i>	100	-
<i>username</i>	<i>VARCHAR</i>	50	-
<i>password</i>	<i>VARCHAR</i>	255	-
<i>created_at</i>	<i>TIMESTAMP</i>	-	-

Tabel 3. 22. Tabel Alergi

Nama <i>Field</i>	Tipe Data	Panjang	Keterangan
<i>id_alergi</i>	<i>INT</i>	11	<i>Primary key</i>
<i>nama_alergi</i>	<i>VARCHAR</i>	100	-
<i>deskripsi</i>	<i>TEXT</i>	65535	-

Tabel 3. 23. Tabel bahan asli

Nama <i>Field</i>	Tipe Data	Panjang	Keterangan
<i>id_bahan_asli</i>	<i>INT</i>	11	<i>Primary key</i>
<i>id_alergi</i>	<i>INT</i>	11	<i>Foreign key</i>
<i>id_fungsi</i>	<i>INT</i>	11	<i>Foreign key</i>
<i>nama_bahan</i>	<i>VARCHAR</i>	100	-
<i>deskripsi</i>	<i>TEXT</i>	65535	-

Tabel 3. 24. Tabel teknik pengolahan

Nama <i>Field</i>	Tipe Data	Panjang	Keterangan
<i>id_teknik</i>	<i>INT</i>	11	<i>Primary key</i>
<i>nama</i>	<i>VARCHAR</i>	50	-
<i>deskripsi</i>	<i>TEXT</i>	65535	-
<i>suhu_rekomendasi</i>	<i>VARCHAR</i>	50	-

Tabel 3. 25. Tabel jenis kue

Nama <i>Field</i>	Tipe Data	Panjang	Keterangan
id_jenis_kue	<i>INT</i>	11	<i>Primary key</i>
Id_teknik	<i>INT</i>	11	<i>Foreign key</i>
nama	<i>VARCHAR</i>	100	-
deskripsi	<i>TEXT</i>	65535	-

Tabel 3. 26. Tabel fungsi bahan

Nama <i>Field</i>	Tipe Data	Panjang	Keterangan
id_fungsi	<i>INT</i>	11	<i>Primary key</i>
nama_fungsi	<i>VARCHAR</i>	50	-
deskripsi	<i>TEXT</i>	65535	-

Tabel 3. 27. Tabel bahan pengganti

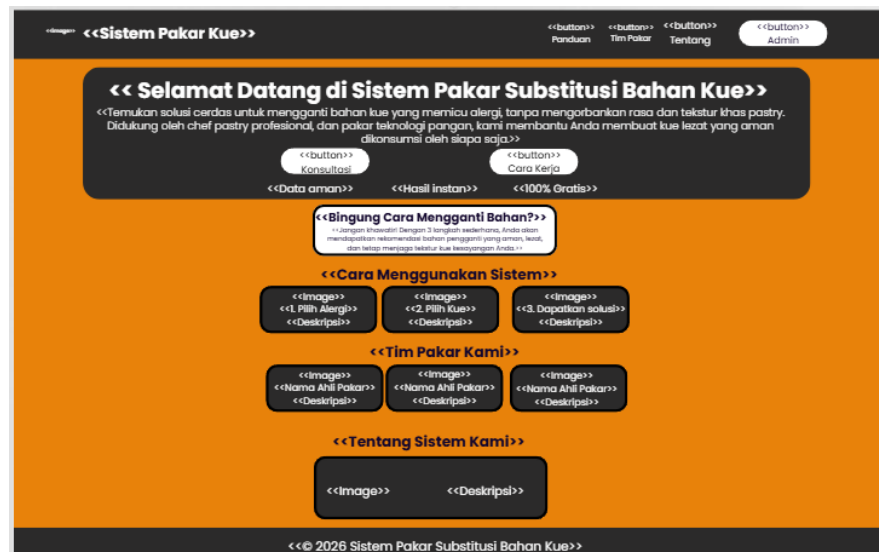
Nama <i>Field</i>	Tipe Data	Panjang	Keterangan
id_pengganti	<i>INT</i>	11	<i>Primary key</i>
id_fungsi	<i>INT</i>	11	<i>Foreign key</i>
nama_pengganti	<i>VARCHAR</i>	100	-
Catatan_umum	<i>TEXT</i>	65535	-

Tabel 3. 28. Tabel aturan

Nama <i>Field</i>	Tipe Data	Panjang	Keterangan
id_aturan	<i>INT</i>	11	<i>Primary key</i>
id_alergi	<i>INT</i>	11	<i>Foreign key</i>
id_jeniskue	<i>INT</i>	11	<i>Foreign key</i>
id_bahan_asli	<i>INT</i>	11	<i>Foreign key</i>
id_bahan_pengganti	<i>INT</i>	11	<i>Foreign key</i>

kombinasi_bahan	<i>VARCHAR</i>	150	-
rasio	<i>VARCHAR</i>	100	-
cara_penggunaan	<i>TEXT</i>	65535	-
bobot	<i>DECIMAL</i>	(5,2)	-
aktif	<i>TINYINT</i>	1	-
created_at	<i>TIMESTAMP</i>	-	-

c. User Interface



Gambar 3. 11. Halaman Dashboard Pengguna

Halaman ini merupakan halaman utama sistem yang dilengkapi *navbar* berisi logo, nama sistem, menu Panduan, Tim Pakar, dan Tentang, serta tombol Admin untuk menuju halaman login. Bagian sambutan menampilkan judul sistem beserta deskripsi singkat tujuannya, tombol “Konsultasi” untuk memulai konsultasi, tombol “Cara Kerja”, dan keunggulan berupa data aman, hasil instan, serta 100% gratis. Di bawahnya terdapat bagian “Cara Menggunakan Sistem” yang menjelaskan tiga langkah penggunaan (Pilih Alergi, Pilih Kue,

Dapatkan Solusi), bagian “Tim Pakar Kami” yang memperkenalkan para ahli penyusun pengetahuan sistem, bagian “Tentang Sistem Kami” berisi informasi umum sistem, dan ditutup dengan *footer* hak cipta di bagian bawah halaman.



Gambar 3. 12. Halaman Pilih Alergi

Halaman ini merupakan tahap awal konsultasi, tempat pengguna memilih alergi yang dimiliki dengan ketentuan boleh memilih lebih dari satu jenis alergi. Setiap pilihan alergi ditampilkan dalam bentuk kartu berisi gambar, nama alergi, dan deskripsi singkat. Tombol “Beranda” digunakan untuk kembali ke halaman utama, sedangkan tombol “Lanjut ke Detail Kue” digunakan untuk melanjutkan ke tahap pemilihan jenis kue setelah alergi dipilih.



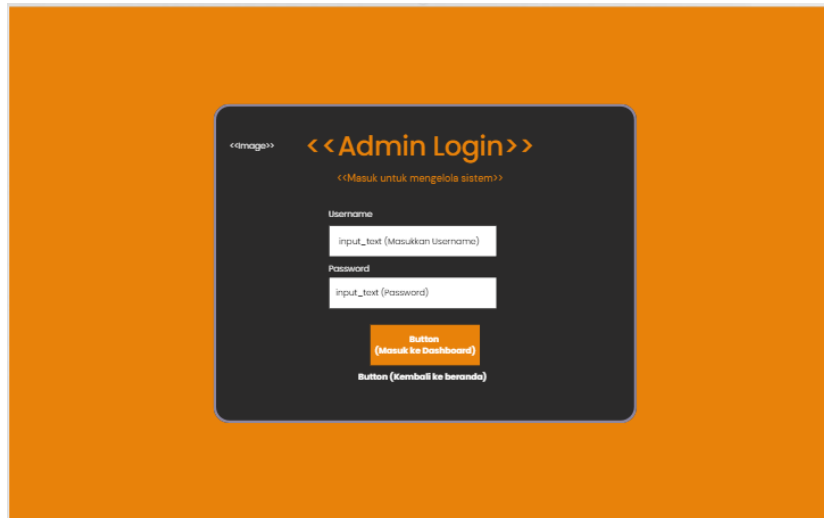
Gambar 3. 13. Halaman Pilih Kue

Halaman ini merupakan tahap kedua alur konsultasi, yang ditandai dengan penanda “2. Pilih Kue” pada navigasi atas. Halaman ini menampilkan nama alergi yang telah dipilih pengguna pada tahap sebelumnya, kemudian meminta pengguna memilih teknik pengolahan dan jenis kue yang akan dibuat. Pilihan teknik pengolahan dan jenis kue ditampilkan dalam bentuk kartu berisi gambar, nama, dan deskripsi. Tombol “Ubah Alergi” digunakan untuk kembali ke langkah pertama, sedangkan tombol “Lihat Rekomendasi” digunakan untuk melanjutkan ke tahap rekomendasi.



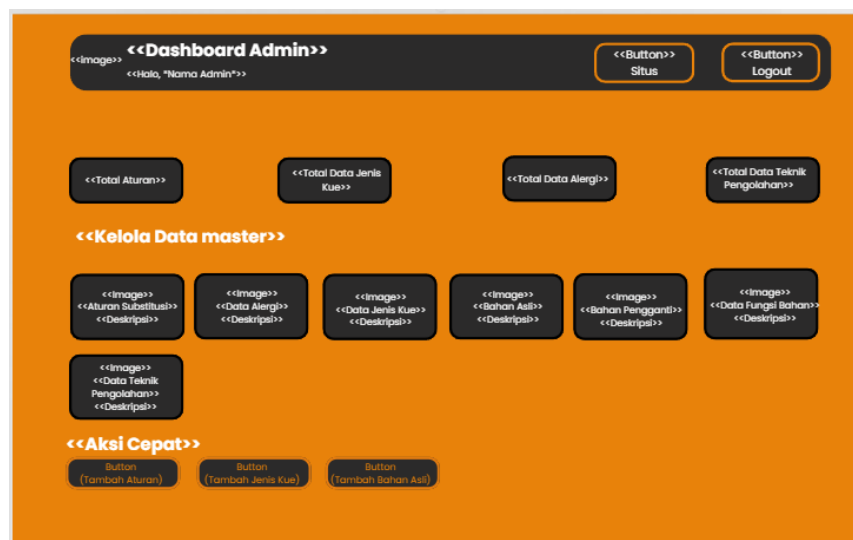
Gambar 3. 14. Halaman Rekomendasi

Halaman ini menampilkan hasil akhir konsultasi pengguna. Bagian “Parameter Konsultasi” memperlihatkan ringkasan alergi dan jenis kue yang dipilih beserta deskripsinya. Bagian “Paket Substitusi yang Direkomendasikan” berisi daftar paket bahan pengganti yang diurutkan berdasarkan skor, dengan setiap kartu menampilkan nomor urut, nama bahan pengganti, alergi yang digantikan, skor akhir, komposisi pengganti, deskripsi, serta rincian penilaian berupa potensi keberhasilan, fungsi bahan, kecocokan tekstur, kecocokan rasa, dan ketersediaan. Tombol “Ubah Pilihan Kue” dan “Konsultasi Baru” memungkinkan pengguna mengubah pilihan kue atau memulai konsultasi ulang dari awal.



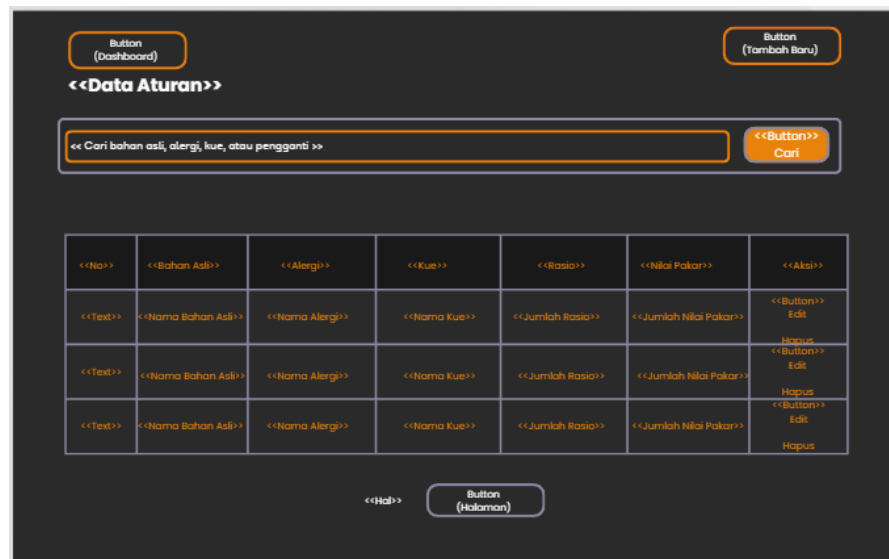
Gambar 3. 15. Halaman Login Admin

Halaman ini merupakan pintu masuk bagi admin untuk mengakses halaman pengelolaan sistem. Pada halaman ini terdapat logo, judul “Admin Login”, serta keterangan “Masuk untuk mengelola sistem”. Admin harus mengisi kolom *username* dan *password*, kemudian menekan tombol “Masuk ke Dashboard” untuk proses autentikasi. Tersedia pula tombol “Kembali ke beranda” bagi pengguna yang ingin kembali ke halaman utama tanpa melakukan login.



Gambar 3. 16. Halaman Dashboard Admin

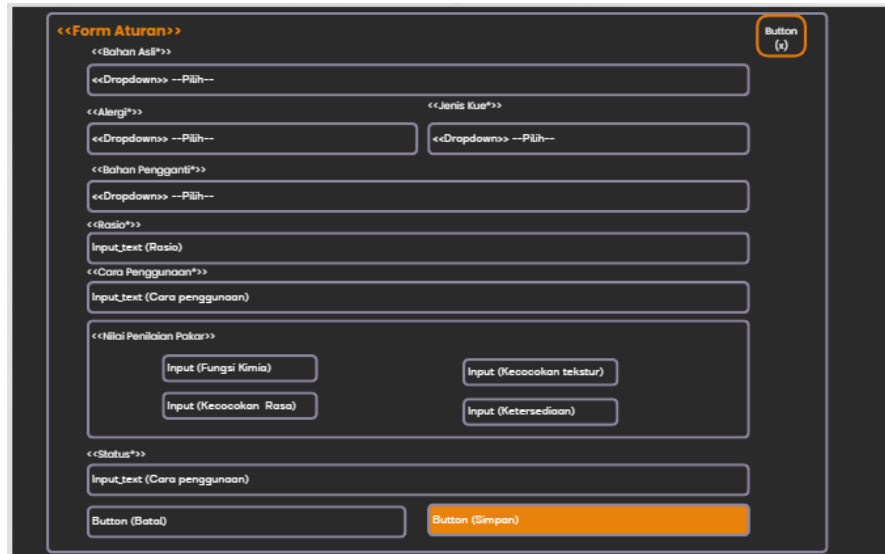
Setelah berhasil *login*, admin diarahkan ke *dashboard* yang menampilkan sapaan nama admin beserta ringkasan data sistem, yaitu total aturan, total data jenis kue, total data alergi, dan total data teknik pengolahan. Pada bagian “Kelola Data Master”, admin dapat mengelola data utama sistem yang ditampilkan berupa kartu berisi gambar dan deskripsi, meliputi aturan substitusi, data alergi, data jenis kue, bahan asli, bahan pengganti, data fungsi bahan, dan data teknik pengolahan. Bagian “Aksi Cepat” menyediakan tombol pintas untuk menambah aturan, jenis kue, dan bahan asli, sedangkan tombol “Situs” dan “Logout” berfungsi untuk melihat halaman pengguna serta keluar dari sistem.



Gambar 3. 17. Halaman Data Aturan

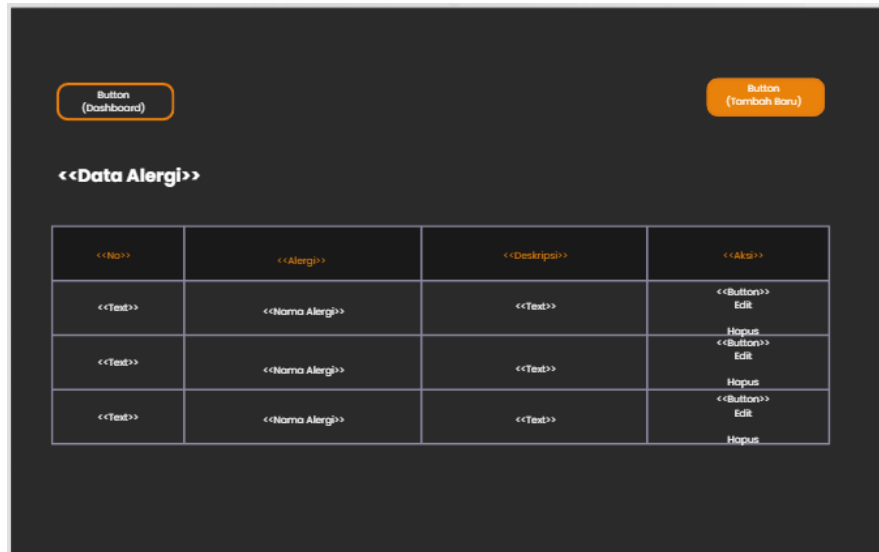
Halaman ini menampilkan daftar seluruh aturan substitusi dalam bentuk tabel dengan kolom nomor, bahan asli, alergi, kue, rasio, nilai pakar, dan aksi. Di bagian atas terdapat kolom pencarian untuk mencari berdasarkan bahan asli, alergi, kue, atau bahan pengganti beserta tombol “Cari”. Setiap baris data memiliki tombol “Edit” dan “Hapus” untuk mengelola aturan, serta tombol halaman (paginasi) di bagian bawah

untuk navigasi antar halaman data. Tombol “Dashboard” digunakan untuk kembali ke dashboard, sedangkan tombol “Tambah Baru” membuka form aturan.



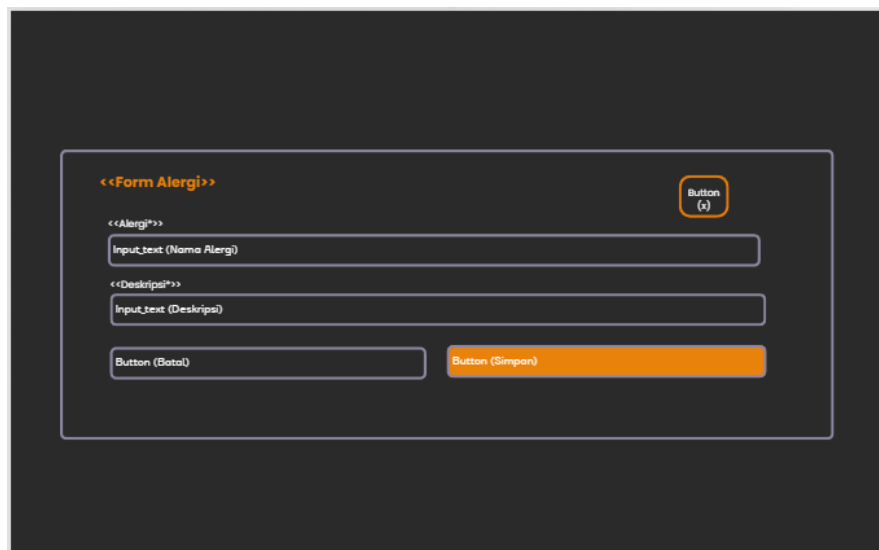
Gambar 3. 18. Halaman tambah dan edit data aturan

Halaman ini merupakan form yang digunakan admin untuk menambahkan atau mengubah data aturan substitusi. Form terdiri dari dropdown pilihan bahan asli, alergi, jenis kue, dan bahan pengganti, serta kolom input untuk rasio dan cara penggunaan. Pada bagian “Nilai Penilaian Pakar” terdapat kolom input untuk nilai fungsi kimia, kecocokan tekstur, kecocokan rasa, dan ketersediaan, ditambah kolom status aturan. Di bagian bawah terdapat tombol “Batal” dan “Simpan”, serta tombol (x) di pojok kanan atas untuk menutup form tanpa menyimpan.



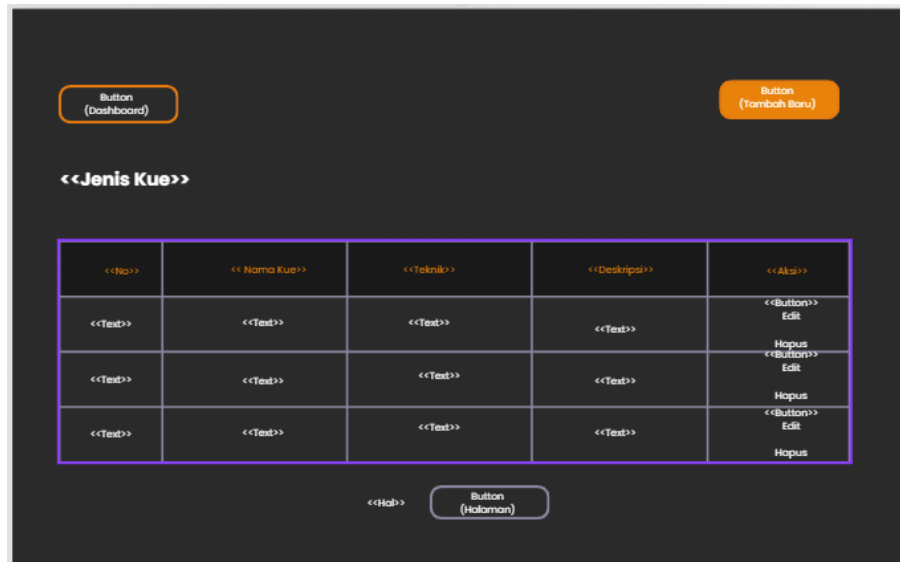
Gambar 3. 19. Halaman Data Alergi

Halaman ini menampilkan daftar data alergi dalam bentuk tabel dengan kolom nomor, nama alergi, deskripsi, dan aksi. Admin dapat mengelola data melalui tombol “Edit” dan “Hapus” yang tersedia pada setiap baris. Tombol “Dashboard” di kiri atas berfungsi untuk kembali ke halaman dashboard, sedangkan tombol "Tambah Baru" di kanan atas digunakan untuk membuka form penambahan data alergi.



Gambar 3. 20. Halaman tambah dan edit alergi

Halaman ini merupakan form sederhana untuk menambahkan atau mengubah data alergi, yang terdiri dari kolom input nama alergi dan kolom input deskripsi. Setelah data diisi, admin dapat menyimpannya melalui tombol "Simpan" atau membatalkan melalui tombol "Batal", serta menutup form menggunakan tombol (x) di pojok kanan atas.



Gambar 3. 21. Halaman Jenis Kue

Halaman ini menampilkan daftar data jenis kue dalam bentuk tabel dengan kolom nomor, nama kue, teknik pengolahan, deskripsi, dan aksi. Setiap baris data dilengkapi tombol "Edit" dan "Hapus" untuk pengelolaan data, serta tombol halaman (paginasi) di bagian bawah untuk berpindah antar halaman data. Tombol "Dashboard" digunakan untuk kembali ke dashboard, sedangkan tombol "Tambah Baru" digunakan untuk menambahkan data jenis kue baru.

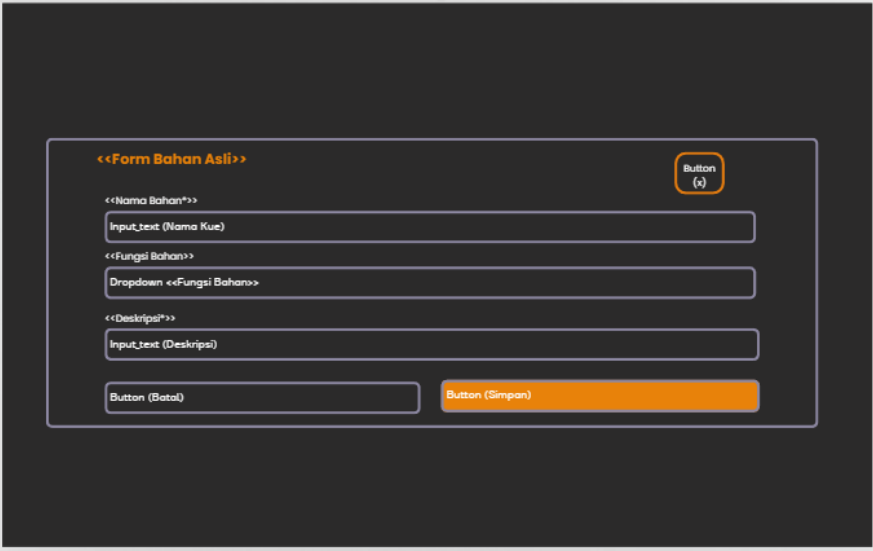
Gambar 3. 22. Halaman Tambah dan Edit Jenis Kue

Halaman ini merupakan form yang digunakan admin untuk menambahkan atau mengubah data jenis kue. Form terdiri dari kolom input nama kue, dropdown pilihan teknik pengolahan, dan kolom input deskripsi. Data yang telah diisi dapat disimpan melalui tombol “Simpan”, dibatalkan melalui tombol “Batal”, atau form dapat ditutup tanpa menyimpan menggunakan tombol (x) di pojok kanan atas.

<<No>>	<< Nama Kue>>	<<Fungsi>>	<<Deskripsi>>	<<Aksi>>
<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus
<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus
<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus

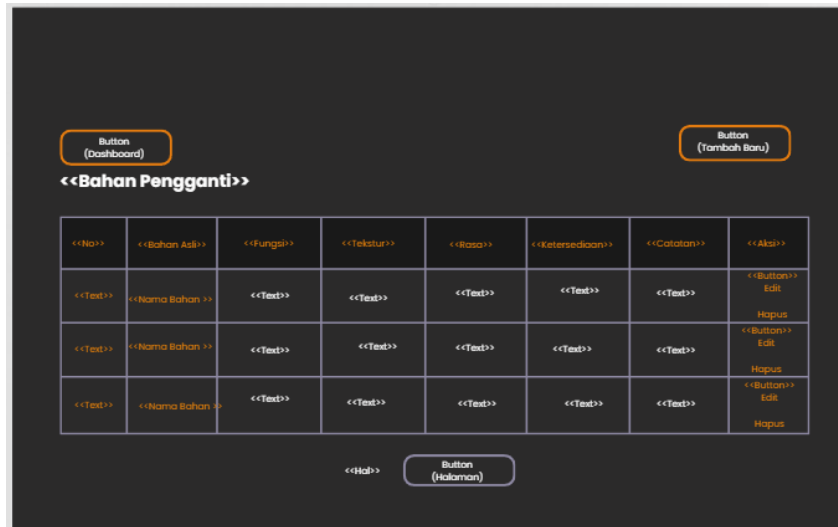
Gambar 3. 23. Halaman Data Bahan Asli

Halaman ini menampilkan daftar data bahan asli dalam bentuk tabel dengan kolom nomor, nama bahan, fungsi, deskripsi, dan aksi. Setiap baris data dilengkapi tombol “Edit” dan “Hapus” untuk pengelolaan data, serta tombol halaman (paginasi) di bagian bawah untuk navigasi antar halaman data. Tombol “*Dashboard*” digunakan untuk kembali ke dashboard, sedangkan tombol “Tambah Baru” digunakan untuk membuka form bahan asli.



Gambar 3. 24. Halaman Tambah dan Edit Bahan Asli

Halaman ini merupakan form untuk menambahkan atau mengubah data bahan asli, yang terdiri dari kolom input nama bahan, dropdown pilihan fungsi bahan, dan kolom input deskripsi. Form dilengkapi tombol “Simpan” untuk menyimpan data, tombol “Batal” untuk membatalkan pengisian, serta tombol (x) di pojok kanan atas untuk menutup form.



Gambar 3. 25. Halaman Bahan Pengganti

Halaman ini menampilkan daftar data bahan pengganti dalam bentuk tabel dengan kolom nomor, bahan asli, fungsi, tekstur, rasa, ketersediaan, catatan, dan aksi. Admin dapat mengelola data melalui tombol “Edit” dan “Hapus” pada setiap baris, serta berpindah antar halaman data menggunakan tombol paginasi di bagian bawah. Tombol “Dashboard” berfungsi untuk kembali ke dashboard, sedangkan tombol “Tambah Baru” membuka form bahan pengganti.

Form fields include:

- Input_text (Nama Kue)
- Dropdown «Fungsi Kimia»
- Dropdown «Kecocokan rasa»
- Input_text (Catatan)
- Dropdown «Kecocokan tekstur»
- Dropdown «Ketersediaan»

Buttons: Button (Batal), Button (Simpan), Button (x)

Gambar 3. 26. Halaman Tambah dan Edit Bahan Pengganti

Halaman ini merupakan form untuk menambahkan atau mengubah data bahan pengganti, yang terdiri dari kolom input nama bahan, dropdown pilihan fungsi kimia, kecocokan tekstur, kecocokan rasa, dan ketersediaan, serta kolom input catatan. Data yang telah diisi dapat disimpan melalui tombol "Simpan", dibatalkan melalui tombol "Batal", atau form ditutup menggunakan tombol (x) di pojok kanan atas.

<<No>>	<<Nama Fungsi>>	<<Deskripsi>>	<<Aksi>>
<<Text>>	<<Nama Fungsi>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus
<<Text>>	<<Nama Fungsi>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus
<<Text>>	<<Nama Fungsi>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus

Gambar 3. 27. Halaman Fungsi Bahan

Halaman ini menampilkan daftar data fungsi bahan dalam bentuk tabel dengan kolom nomor, nama fungsi, deskripsi, dan aksi. Setiap baris data dilengkapi tombol "Edit" dan "Hapus" untuk pengelolaan data, serta tombol halaman (paginasi) di bagian bawah untuk navigasi antar halaman data. Tombol "Dashboard" digunakan untuk kembali ke dashboard, sedangkan tombol "Tambah Baru" digunakan untuk membuka form fungsi bahan.

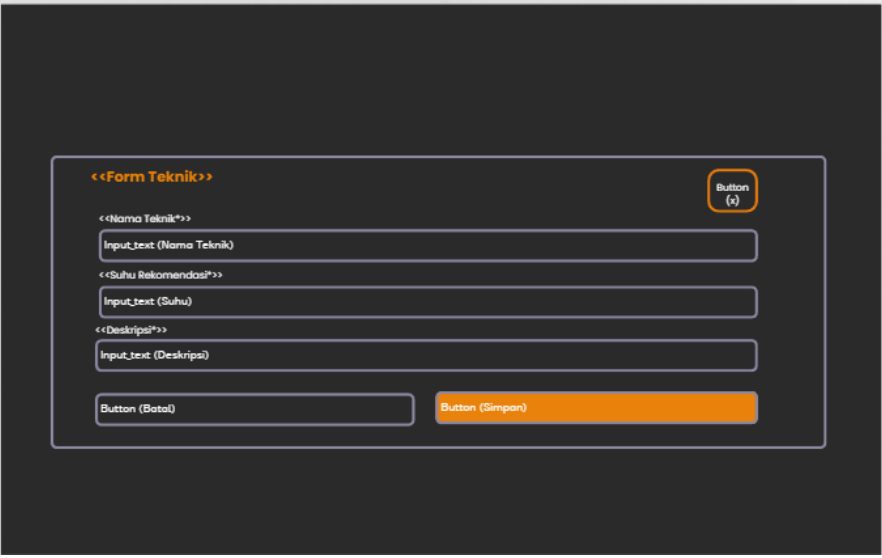
Gambar 3. 28. Halaman Tambah dan Edit Fungsi Bahan

Halaman ini merupakan form yang digunakan admin untuk menambahkan atau mengubah data fungsi bahan. Form terdiri dari kolom input nama fungsi dan kolom input deskripsi. Data yang telah diisi dapat disimpan melalui tombol “Simpan”, dibatalkan melalui tombol “Batal”, atau form dapat ditutup tanpa menyimpan menggunakan tombol (x) di pojok kanan atas.

<<No>>	<< Nama Teknik >>	<<Suhu>>	<<Deskripsi>>	<<Aksi>>
<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus
<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus
<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Text>>	<<Button>> Edit Hapus

Gambar 3. 29. Halaman Teknik Pengolahan

Halaman ini menampilkan daftar data teknik pengolahan dalam bentuk tabel dengan kolom nomor, nama teknik, suhu, deskripsi, dan aksi. Admin dapat mengelola data melalui tombol “Edit” dan “Hapus” pada setiap baris, serta berpindah antar halaman data menggunakan tombol paginasi di bagian bawah. Tombol “Dashboard” berfungsi untuk kembali ke dashboard, sedangkan tombol “Tambah Baru” membuka form teknik pengolahan.



Gambar 3. 30. Halaman Tambah dan Edit Teknik Pengolahan

Halaman ini merupakan form untuk menambahkan atau mengubah data teknik pengolahan, yang terdiri dari kolom input nama teknik, kolom input suhu rekomendasi, dan kolom input deskripsi. Form dilengkapi tombol “Simpan” untuk menyimpan data, tombol “Batal” untuk membatalkan pengisian, serta tombol (x) di pojok kanan atas untuk menutup form.

3.5.Perancangan Basis Pengetahuan

3.5.1. Perancangan Rules Metode Forward Chaining

Perancangan sistem pakar pada penelitian ini bertujuan untuk membangun sebuah sistem berbasis web yang mampu memberikan rekomendasi bahan substitusi baking bagi penderita alergi pangan secara otomatis. Sistem pakar dirancang dengan mengadopsi konsep dasar knowledge-based system, yang terdiri dari basis pengetahuan (knowledge base), mesin inferensi (inference engine), serta antarmuka pengguna (user interface).

Basis pengetahuan sistem diperoleh dari berbagai sumber literatur baking profesional, referensi alergi pangan, serta konsep substitusi bahan yang umum digunakan dalam pembuatan produk panggang. Dalam literatur baking dijelaskan bahwa setiap bahan memiliki fungsi spesifik, seperti pembentuk struktur, pengikat, pengembang, pemberi kelembapan, pelembut tekstur, dan pemberi rasa. Informasi fungsi bahan tersebut menjadi dasar dalam menentukan bahan pengganti yang sesuai ketika suatu bahan harus dihindari karena alergi.

Mesin inferensi dalam sistem ini menggunakan metode forward chaining, yaitu proses penalaran yang dimulai dari fakta yang diberikan pengguna berupa jenis alergi dan jenis produk baking, kemudian sistem menelusuri aturan hingga menghasilkan rekomendasi bahan pengganti. Untuk menentukan tingkat kecocokan terbaik di antara beberapa alternatif bahan pengganti, digunakan logika fuzzy sebagai metode pendukung pengambilan keputusan.

Dengan demikian, sistem pakar yang dirancang tidak hanya mampu memberikan daftar bahan pengganti, tetapi juga menentukan peringkat rekomendasi paling sesuai berdasarkan tingkat kecocokan fungsi bahan dalam

Basis data dirancang untuk mendukung penyimpanan seluruh komponen yang dibutuhkan oleh sistem pakar, meliputi data pengguna, data alergi, jenis baking, bahan baking, fungsi bahan, bahan pengganti, aturan, konsultasi, serta hasil rekomendasi fuzzy. Perancangan basis data dilakukan menggunakan model relasional agar hubungan antarentitas dapat dikelola secara terstruktur.

Tabel alergi menyimpan daftar alergi pangan yang didukung sistem. Tabel jenis_baking menyimpan kategori produk panggang seperti cake, cookies, bread, pastry, cheesecake, dan brownies. Tabel bahan_baking berisi bahan utama yang umum digunakan dalam baking. Tabel fungsi_bahan menyimpan fungsi teknologi setiap bahan dalam produk panggang. Tabel bahan_pengganti menyimpan alternatif substitusi berdasarkan fungsi bahan.

Selanjutnya, tabel aturan berfungsi sebagai penghubung antara alergi, jenis baking, bahan yang dihindari, dan fungsi bahan yang harus digantikan. Tabel konsultasi mencatat input pengguna setiap kali melakukan proses rekomendasi. Tabel hasil_rekomendasi menyimpan keluaran sistem berupa bahan pengganti beserta nilai fuzzy dan peringkatnya.

Metode forward chaining digunakan sebagai mekanisme inferensi utama dalam sistem pakar ini. Forward chaining bekerja dengan pendekatan data-driven, yaitu proses penalaran dimulai dari fakta yang diberikan pengguna.

Tahapan forward chaining dalam sistem:

- 1) Pengguna memilih alergi pangan dan jenis baking.
- 2) Sistem mencocokkan input tersebut dengan aturan dalam rule base.
- 3) Sistem mengambil daftar bahan pengganti berdasarkan rule tersebut.
- 4) Hasil sementara diteruskan ke proses perhitungan logika fuzzy.

Metode forward chaining dipilih karena:

- 1) Sesuai untuk sistem konsultasi berbasis input pengguna
- 2) Proses inferensi sederhana dan sistematis

- 3) Mudah diimplementasikan dalam aplikasi web
- 4) Mampu menghasilkan keputusan secara bertahap hingga mencapai kesimpulan.

Rule based atau basis aturan merupakan inti dari sistem pakar karena berisi pengetahuan pakar dalam bentuk aturan IF–THEN. Aturan dibentuk berdasarkan hubungan antara:

Alergi pangan + jenis baking □ bahan yang dihindari □ bahan
pengganti

Sebagai contoh:

Aturan 1

IF alergi = telur

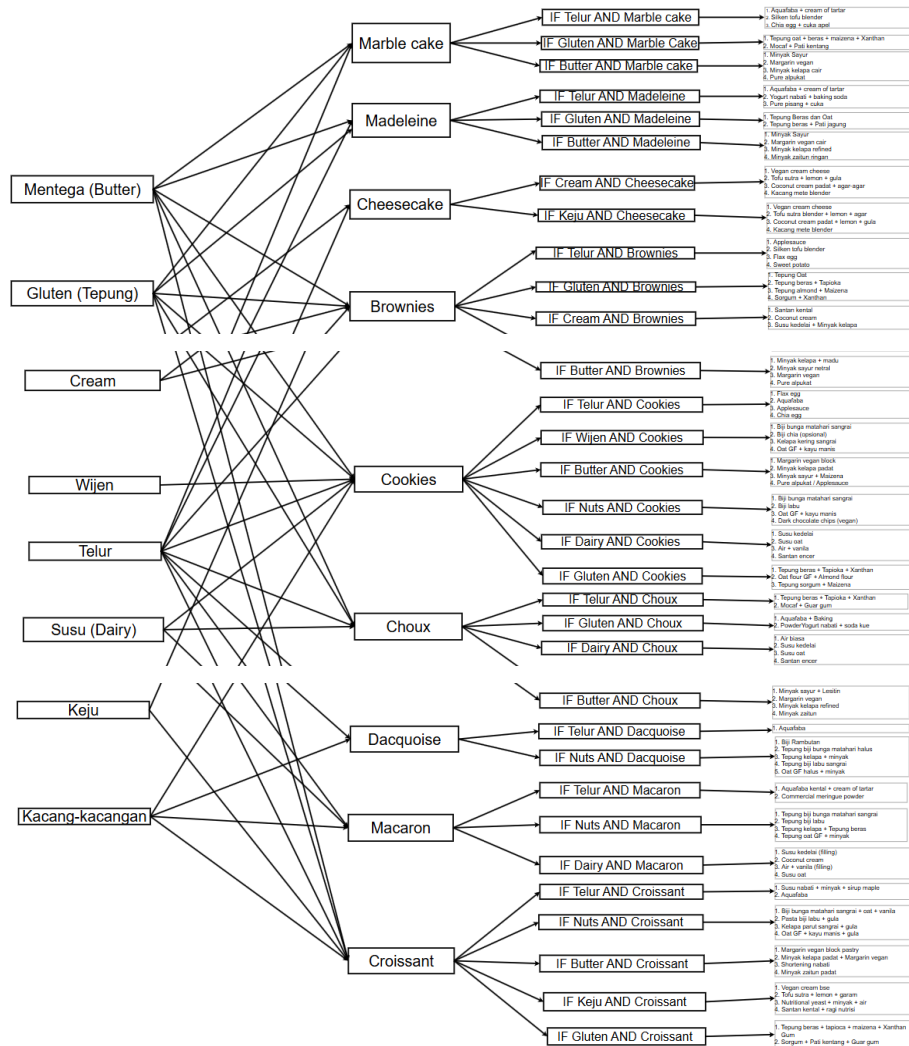
AND jenis_baking = cookies

THEN bahan_pengganti = aquafaba.

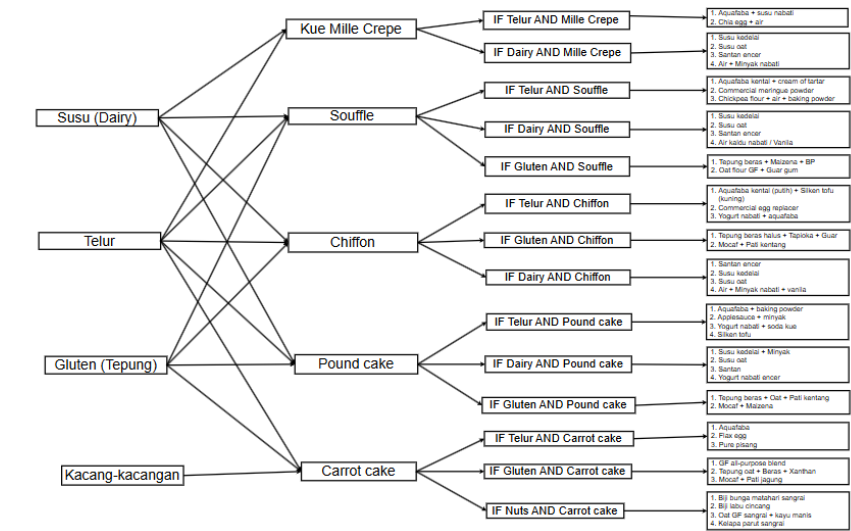
Aturan-aturan tersebut diperoleh dari pengetahuan fungsi bahan dalam literatur baking serta praktik substitusi bahan yang umum digunakan. Struktur rule base dirancang fleksibel sehingga dapat ditambah atau diperbarui tanpa mengubah keseluruhan sistem.

Pakar diminta untuk memberikan pengetahuan mengenai aturan substitusi bahan berdasarkan kombinasi jenis alergi dan jenis kue. Secara spesifik, pakar memberikan penilaian berupa:

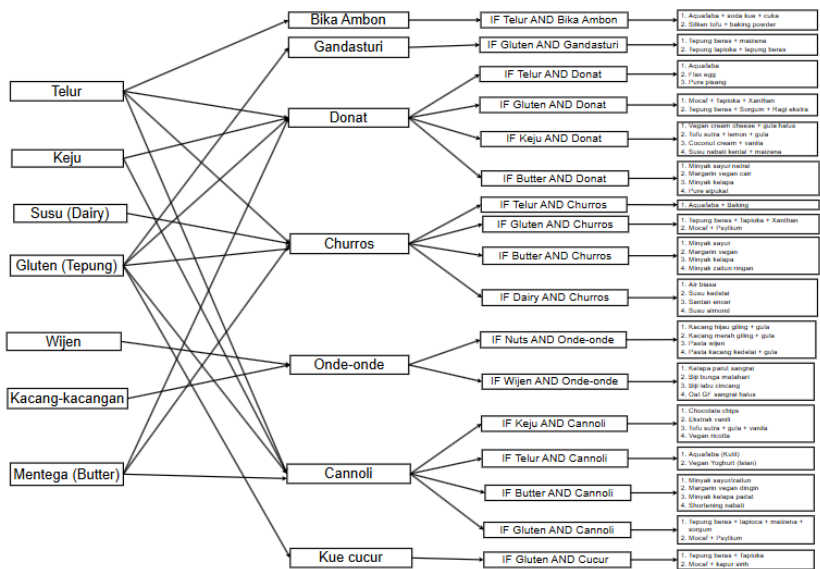
- 1) Identifikasi bahan-bahan yang mengandung alergen tertentu (misalnya telur, susu, kacang, gluten)
- 2) Penentuan bahan pengganti yang aman untuk setiap jenis alergi
- 3) Klasifikasi fungsi teknis setiap bahan dalam adonan kue (sebagai pengembang, pengikat, pelembap, atau pemberi rasa)
- 4) Pemetaan hubungan antara jenis kue (Bika Ambon, bolu, brownies, dll) dengan bahan substitusi yang paling sesuai.



Gambar 3. 31. Rule dari Forward Chaining



Gambar 3. 32. Rule dari Forward Chaining



Gambar 3. 33. Rule dari Forward Chaining

Tabel 3. 29. Tabel forward chaining

R1	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Creme Caramel" THEN Pengganti = ["Aquafaba + agar-agar", "Silken tofu + maizena", "Agar-agar plain + maizena"]
R2	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Bolu kukus" THEN Pengganti = ["Aquafaba", "Flax egg + baking powder", "Applesauce + cuka apel"]
R3	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Kue Putu Ayu" THEN Pengganti = ["Aquafaba + baking soda", "Yogurt nabati + soda kue", "Pure pisang + cuka"]
R4	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Marble cake" THEN Pengganti = ["Aquafaba + cream of tartar", "Silken tofu blender", "Chia egg + cuka apel"]
R5	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Madeleine" THEN Pengganti = ["Aquafaba + cream of tartar", "Yogurt nabati + baking soda", "Pure pisang + cuka"]
R6	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Brownies" THEN Pengganti = ["Applesauce", "Silken tofu blender", "Flax egg", "Sweet potato"]
R7	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Choux" THEN Pengganti = ["Aquafaba + Baking Powder", "Yogurt nabati + soda kue"]
R8	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Dacquoise" THEN Pengganti = ["Aquafaba"]
R9	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Churros" THEN Pengganti = ["Aquafaba + Baking Powder"]

R10	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Cannoli" THEN Pengganti = ["Aquafaba (Kulit)", "Vegan Yoghurt (Isian)"]
R11	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Croissant" THEN Pengganti = ["Susu nabati + minyak + sirup maple", "Aquafaba"]
R12	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Donat" THEN Pengganti = ["Aquafaba", "Flax egg", "Pure pisang"]
R13	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Macaron" THEN Pengganti = ["Aquafaba kental + cream of tartar", "Commercial meringue powder"]
R14	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Bika Ambon" THEN Pengganti = ["Aquafaba + soda kue + cuka", "Silken tofu + baking powder"]
R15	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Mille Crepe" THEN Pengganti = ["Aquafaba + susu nabati", "Chia egg + air"]
R16	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Pound cake" THEN Pengganti = ["Aquafaba + baking powder", "Applesauce + minyak", "Yogurt nabati + soda kue", "Silken tofu"]
R17	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Souffle" THEN Pengganti = ["Aquafaba kental + cream of tartar", "Commercial meringue powder", "Chickpea flour + air + baking powder"]
R18	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Cookies" THEN Pengganti = ["Flax egg", "Aquafaba", "Applesauce", "Chia egg"]
R19	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Chiffon" THEN Pengganti = ["Aquafaba kental (putih) + Silken tofu (kuning)", "Commercial egg replacer", "Yogurt nabati + aquafaba"]
R20	IF Alergi = "Telur" AND Kue = "Carrot cake" THEN Pengganti = ["Aquafaba", "Flax egg", "Pure pisang"]

R21	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Bakpao" THEN Pengganti = ["Tepung Beras + Tepung Tapioka + Xanthan Gum"]
R22	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Apem" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Tepung Tapioka", "Mocaf + Sagu", "Tepung ketan + beras"]
R23	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Bolu Kukus" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Maizena + Baking Powder", "Mocaf + Xanthan gum"]
R24	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Putu Ayu" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Tapioka", "Mocaf + Baking powder"]
R25	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Marble Cake" THEN Pengganti = ["Tepung oat + beras + maizena + Xanthan", "Mocaf + Pati kentang"]
R26	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Madeleine" THEN Pengganti = ["Tepung Beras dan Oat", "Tepung beras + Pati jagung"]
R27	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Brownies" THEN Pengganti = ["Tepung Oat", "Tepung beras + Tapioka", "Tepung almond + Maizena", "Sorgum + Xanthan"]
R28	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Choux" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Tapioka + Xanthan", "Mocaf + Guar gum"]
R29	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Churros" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Tapioka + Xanthan", "Mocaf + Psyllium"]
R30	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Cucur" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Tapioka", "Mocaf + kapur sirih"]

R31	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Gandasturi" THEN Pengganti = ["Tepung beras + maizena", "Tepung tapioka + tepung beras"]
R32	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Cannoli" THEN Pengganti = ["Tepung beras + tapioca + maizena + sorgum", "Mocaf + Psyllium"]
R33	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Croissant" THEN Pengganti = ["Tepung beras + tapioca + maizena + Xanthan Gum", "Sorgum + Pati kentang + Guar gum"]
R34	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Donat" THEN Pengganti = ["Mocaf + Tapioka + Xanthan", "Tepung beras + Sorgum + Ragi ekstra"]
R35	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Pound cake" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Oat + Pati kentang", "Mocaf + Maizena"]
R36	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Carrot cake" THEN Pengganti = ["GF all-purpose blend", "Tepung oat + Beras + Xanthan", "Mocaf + Pati jagung"]
R37	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Souffle" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Maizena + BP", "Oat flour GF + Guar gum"]
R38	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Chiffon" THEN Pengganti = ["Tepung beras halus + Tapioka + Guar", "Mocaf + Pati kentang"]
R39	IF Alergi = "Gluten" AND Kue = "Cookies" THEN Pengganti = ["Tepung beras + Tapioka + Xanthan", "Oat flour GF + Almond flour", "Tepung sorgum + Maizena"]

R40	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Bakpao" THEN Pengganti = ["Susu oat", "Susu kedelai", "Air + minyak + vanila"]
R41	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Creme Caramel" THEN Pengganti = ["Susu kedelai plain", "Susu oat", "Santan encer", "Air kelapa + vanila"]
R42	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Choux" THEN Pengganti = ["Air biasa", "Susu kedelai", "Susu oat", "Santan encer"]
R43	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Churros" THEN Pengganti = ["Air biasa", "Susu kedelai", "Santan encer", "Susu almond"]
R44	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Macaron" THEN Pengganti = ["Susu kedelai (filling)", "Coconut cream", "Air + vanila (filling)", "Susu oat"]
R45	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Mille Crepe" THEN Pengganti = ["Susu kedelai", "Susu oat", "Santan encer", "Air + Minyak nabati"]
R46	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Pound cake" THEN Pengganti = ["Susu kedelai + Minyak", "Susu oat", "Santan", "Yogurt nabati encer"]
R47	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Chiffon" THEN Pengganti = ["Santan encer", "Susu kedelai", "Susu oat", "Air + Minyak nabati + vanila"]
R48	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Cookies" THEN Pengganti = ["Susu kedelai", "Susu oat", "Air + vanila", "Santan encer"]
R49	IF Alergi = "Dairy" AND Kue = "Souffle" THEN Pengganti = ["Susu kedelai", "Susu oat", "Santan encer", "Air kaldu nabati / Vanila"]

R50	IF Alergi = "Cream" AND Kue = "Creme Caramel" THEN Pengganti = ["Santan kental", "Coconut cream", "Susu kedelai kental + minyak", "Susu oat full fat"]
R51	IF Alergi = "Cream" AND Kue = "Cheesecake" THEN Pengganti = ["Vegan cream cheese", "Tofu sutra + lemon + gula", "Coconut cream padat + agar-agar", "Kacang mete blender"]
R52	IF Alergi = "Cream" AND Kue = "Brownies" THEN Pengganti = ["Santan kental", "Coconut cream", "Susu kedelai + Minyak kelapa"]
R53	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Marble cake" THEN Pengganti = ["Minyak Sayur", "Margarin vegan", "Minyak kelapa cair", "Pure alpukat"]
R54	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Madeleine" THEN Pengganti = ["Minyak Sayur", "Margarin vegan cair", "Minyak kelapa refined", "Minyak zaitun ringan"]
R55	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Brownies" THEN Pengganti = ["Minyak kelapa + madu", "Minyak sayur netral", "Margarin vegan", "Pure alpukat"]
R56	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Churros" THEN Pengganti = ["Minyak sayur", "Margarin vegan", "Minyak kelapa", "Minyak zaitun ringan"]
R57	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Cookies" THEN Pengganti = ["Margarin vegan block", "Minyak kelapa padat", "Minyak sayur + Maizena", "Pure alpukat / Applesauce"]
R58	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Choux" THEN Pengganti = ["Minyak sayur + Lesitin", "Margarin vegan", "Minyak kelapa refined", "Minyak zaitun"]

R59	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Donat" THEN Pengganti = ["Minyak sayur netral", "Margarin vegan cair", "Minyak kelapa", "Pure alpukat"]
R60	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Croissant" THEN Pengganti = ["Margarin vegan block pastry", "Minyak kelapa padat + Margarin vegan", "Shortening nabati", "Minyak zaitun padat"]
R61	IF Alergi = "Butter" AND Kue = "Cannoli" THEN Pengganti = ["Minyak sayur/zaitun", "Margarin vegan dingin", "Minyak kelapa padat", "Shortening nabati"]
R62	IF Alergi = "Nuts" AND Kue = "Dacquoise" THEN Pengganti = ["Biji Rambutan", "Tepung biji bunga matahari halus", "Tepung kelapa + minyak", "Tepung biji labu sangrai", "Oat GF halus + minyak"]
R63	IF Alergi = "Nuts" AND Kue = "Macaron" THEN Pengganti = ["Tepung biji bunga matahari sangrai", "Tepung biji labu", "Tepung kelapa + Tepung beras", "Tepung oat GF + minyak"]
R64	IF Alergi = "Nuts" AND Kue = "Onde-onde" THEN Pengganti = ["Kacang hijau giling + gula", "Kacang merah giling + gula", "Pasta wijen", "Pasta kacang kedelai + gula"]
R65	IF Alergi = "Nuts" AND Kue = "Carrot cake" THEN Pengganti = ["Biji bunga matahari sangrai", "Biji labu cincang", "Oat GF sangrai + kayu manis", "Kelapa parut sangrai"]
R66	IF Alergi = "Nuts" AND Kue = "Cookies" THEN Pengganti = ["Biji bunga matahari sangrai", "Biji labu", "Oat GF + kayu manis", "Dark chocolate chips (vegan)"]
R67	IF Alergi = "Nuts" AND Kue = "Croissant" THEN Pengganti = ["Biji bunga matahari sangrai + oat + vanila", "Pasta biji labu"]

	+ gula", "Kelapa parut sangrai + gula", "Oat GF + kayu manis + gula"]
R68	IF Alergi = "Keju" AND Kue = "Cannoli" THEN Pengganti = ["Chocolate chips", "Ekstrak vanili", "Tofu sutra + gula + vanila", "Vegan ricotta"]
R69	IF Alergi = "Keju" AND Kue = "Croissant" THEN Pengganti = ["Vegan cream cheese", "Tofu sutra + lemon + garam", "Nutritional yeast + minyak + air", "Santan kental + ragi nutrisi"]
R70	IF Alergi = "Keju" AND Kue = "Bakpao" THEN Pengganti = ["Vegan cream cheese + gula", "Tofu sutra + vanila", "Coconut cream + maizena", "Pasta kacang putih + gula"]
R71	IF Alergi = "Keju" AND Kue = "Donat" THEN Pengganti = ["Vegan cream cheese + gula halus", "Tofu sutra + lemon + gula", "Coconut cream + vanila", "Susu nabati kental + maizena"]
R72	IF Alergi = "Keju" AND Kue = "Bolu kukus" THEN Pengganti = ["Vegan cream cheese", "Nutritional yeast + santan", "Tofu sutra + vanila + garam", "Susu kedelai kental + ragi nutrisi"]
R73	IF Alergi = "Keju" AND Kue = "Cheesecake" THEN Pengganti = ["Vegan cream cheese", "Tofu sutra blender + lemon + agar", "Coconut cream padat + lemon + gula", "Kacang mete blender"]
R74	IF Alergi = "Wijen" AND Kue = "Onde-onde" THEN Pengganti = ["Kelapa parut sangrai", "Biji bunga matahari", "Biji labu cincang", "Oat GF sangrai halus"]

R75	IF Alergi = "Wijen" AND Kue = "Cookies" THEN Pengganti = ["Biji bunga matahari sangrai", "Biji chia (opsional)", "Kelapa kering sangrai", "Oat GF + kayu manis"]
-----	--

R76	IF Alergi = "Wijen" AND Kue = "Bakpao" THEN Pengganti = ["Kelapa parut sangrai halus", "Biji bunga matahari", "Poppy (jika aman)", "Oat GF halus"]
-----	--

Berdasarkan Tabel 3.18, sistem pakar ini memuat sebanyak 76 aturan Forward Chaining yang mencakup kombinasi spesifik antara jenis alergi dan jenis kue. Jumlah ini tidak mencakup seluruh kemungkinan kombinasi teoretis antara 8 jenis alergi dan 26 jenis kue (total 192 kombinasi), melainkan hanya sekitar 39,6% dari keseluruhan ruang kemungkinan. Pemilihan aturan ini dilakukan secara selektif berdasarkan beberapa pertimbangan teknis dan ilmiah sebagai berikut:

a. Relevansi Teknis dalam Praktik Baking

Tidak setiap bahan alergen digunakan dalam seluruh jenis produk baking. Sebagai contoh, keju umumnya tidak digunakan dalam pembuatan Chiffon Cake atau Soufflé, sehingga kombinasi "Alergi Keju + Chiffon" tidak memiliki justifikasi teknis untuk dimasukkan ke dalam basis pengetahuan. Demikian pula, wijen hanya relevan untuk produk tertentu seperti Onde-onde, Cookies, dan Bakpao, sehingga kombinasi wijen dengan kue lain seperti Brownies atau Mille Crepe tidak dimasukkan.

b. Validasi dan Persetujuan Pakar

Seluruh aturan yang disusun telah melalui proses validasi oleh tiga pakar berlatar belakang Ahli Madya (A.Md.) Pariwisata yang memiliki kompetensi di bidang pastry dan bakery. Pakar hanya menyetujui aturan-aturan yang memiliki justifikasi fungsional dan

keamanan yang jelas, sehingga aturan yang bersifat spekulatif atau belum teruji secara empiris tidak dimasukkan ke dalam basis pengetahuan.

c. Fokus pada Kombinasi yang Umum Dijumpai

Sistem dirancang untuk menangani kasus-kasus yang paling sering dihadapi oleh penderita alergi di Indonesia. Oleh karena itu, prioritas diberikan pada kombinasi alergi dan kue yang umum dijumpai dalam praktik baking sehari-hari, seperti alergi telur pada berbagai jenis kue (20 aturan), alergi gluten pada produk berbasis tepung (19 aturan), serta alergi dairy pada produk yang menggunakan susu (10 aturan).

d. Keterbatasan Ruang Lingkup Penelitian

Sesuai dengan batasan masalah yang ditetapkan, penelitian ini membatasi objek pada produk baking yang umum dikonsumsi di Indonesia dan tidak bermaksud membangun sistem yang menangani seluruh kemungkinan kombinasi alergi-kue secara universal. Pengembangan basis pengetahuan untuk kombinasi lain yang belum tercakup dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya dengan melibatkan pakar tambahan dan literatur yang lebih komprehensif.

Dengan pendekatan selektif ini, sistem tetap mampu memberikan rekomendasi yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan untuk kasus-kasus yang menjadi fokus penelitian, tanpa mengorbankan kualitas dan keandalan basis pengetahuan

3.5.2. Perancangan Logika Fuzzy

Logika fuzzy digunakan untuk menentukan tingkat kecocokan bahan pengganti ketika terdapat lebih dari satu alternatif. Pendekatan fuzzy memungkinkan sistem menilai kecocokan secara bertahap, tidak hanya benar atau salah.

Variabel fuzzy dalam penelitian ini meliputi:

- 1) Kesesuaian fungsi bahan
- 2) Kesesuaian bahan pengganti dengan karakteristik tekstur kue yang diinginkan
- 3) Pengaruh terhadap rasa
- 4) Ketersediaan bahan pengganti

Setiap variabel memiliki himpunan linguistik seperti rendah, sedang, dan tinggi yang direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga atau trapesium.

Tahapan proses fuzzy:

(a) Fuzzifikasi

Mengubah nilai numerik kecocokan menjadi fungsi keanggotaan fuzzy.

(b) Inferensi fuzzy

Menggunakan aturan fuzzy untuk menentukan tingkat kelayakan bahan pengganti.

(c) Defuzzifikasi

Menghasilkan nilai akhir berupa skor kecocokan yang digunakan untuk peringkat rekomendasi.

Dengan penerapan logika fuzzy, sistem mampu memberikan rekomendasi yang lebih adaptif dan realistis, karena mempertimbangkan berbagai tingkat kecocokan, bukan keputusan biner semata.

Hasil penilaian ahli terhadap tingkat kepentingan kriteria (Fungsi, Tekstur, Rasa) yang diperoleh melalui metode Analytic Hierarchy Process (AHP) diintegrasikan ke dalam sistem inferensi fuzzy. Bobot kriteria ini merepresentasikan prioritas teknis dalam formulasi kue, di mana, misalnya, kesesuaian fungsi bahan mungkin memiliki urgensi lebih tinggi dibandingkan pengaruh rasa.

Mekanisme integrasi dilakukan pada tahap akhir setelah proses defuzzifikasi. Skor kecocokan fuzzy untuk setiap bahan pengganti pada masing-masing kriteria dikalikan dengan bobot kriteria hasil AHP menggunakan pendekatan Weighted Sum Model (WSM), sebagaimana diformulasikan berikut:

$$\text{Skor Akhir} = (\text{Skor_Fungsi} \times \text{Bobot_Fungsi}) + (\text{Skor_Tekstur} \times \text{Bobot_Tekstur}) + (\text{Skor_Rasa} \times \text{Bobot_Rasa}) + (\text{Skor_Ketersediaan} \times \text{Bobot_Ketersediaan})$$

Dengan demikian, sistem tidak hanya menilai seberapa cocok suatu bahan secara individual, tetapi juga memperhitungkan seberapa penting setiap aspek penilaian tersebut menurut keahlian formulasi pangan. Nilai akhir berupa skor komposit 0–100 ini kemudian digunakan sebagai dasar pengurutan (ranking) bahan pengganti, menghasilkan rekomendasi yang tidak hanya adaptif terhadap ketidakpastian data, tetapi juga terstruktur berdasarkan prioritas kriteria yang divalidasi pakar.

1. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = "Creme Caramel"

a. Tahap 1: Forward Chaining (Pencocokan Aturan)

- 1) Input Pengguna: Alergi = "Telur" AND Kue = "Creme Caramel".
- 2) Output (Alternatif Kandidat):
 - a) Aquafaba + agar-agar
 - b) Silken tofu + maizena
 - c) Agar-agar plain + maizena

b. Tahap 2: Input Data Penilaian Pakar (Crisp Input)

Tabel 3. 30. Nilai Rata-rata Penilaian Pakar

Alternatif	Variabel	Pakar 1	Pakar 2	Pakar 3	Rata-rata (X)
Aquafaba + agar-agar	Fungsi	5	5	4	4.67
	Tekstur	5	4	4	4.33
	Rasa	5	4	5	4.67
	Ketersediaan	5	5	3	4.33
Silken tofu + maizena	Fungsi	3	4	3	3.33
	Tekstur	3	4	4	3.67
	Rasa	4	3	3	3.33
	Ketersediaan	3	4	2	3.00
Agar-agar plain + maizena	Fungsi	3	5	4	4.00
	Tekstur	3	5	4	4.00
	Rasa	4	3	3	3.33
	Ketersediaan	4	5	5	4.67

c. Tahap 3: Fuzzifikasi (Mengubah Crisp Ke Fuzzy)

1) Rumus Fungsi Keanggotaan Segitiga

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{jika } b \leq x \leq c \end{cases}$$

2) Parameter Himpunan Fuzzy

Sistem menggunakan Fungsi Keanggotaan Segitiga (*Triangular Membership Function*) dengan parameter

Tabel 3. 31. Fungsi Keanggotaan Segitiga

Himpunan Fuzzy	Notasi	Parameter (a, b, c)	Pusat Segitiga
Rendah	R	(1, 1, 2.5)	1.50
Sedang	S	(1.5, 3, 4.5)	3.00
Tinggi	T	(3.5, 5, 5)	4.50

3) Perhitungan Fuzzifikasi

a) Alternatif 1: Aquafaba + agar-agar

(1) Fungsi ($X_1 = 4.67$):

(a) $\mu_R = 0$

(b) $\mu_S = 0$ (karena $4.67 > 4.5$)

(c) $\mu_T = (4.67 - 3.5)/(5 - 3.5) = 1.17/1.5 = 0.780$

(2) Tekstur ($X_2 = 4.33$):

(a) $\mu_R = 0$

(b) $\mu_S = (4.5 - 4.33)/(4.5 - 3) = 0.17/1.5 = 0.113$

(c) $\mu_T = (4.33 - 3.5)/(5 - 3.5) = 0.83/1.5 = 0.553$

(3) Rasa ($X_3 = 4.67$):

(a) $\mu_R = 0, \mu_S = 0$

(b) $\mu_T = (4.67 - 3.5)/1.5 = 0.780$

(4) Ketersediaan ($X_4 = 4.33$):

(a) Sama dengan Tekstur. $\mu_S = 0.113, \mu_T = 0.553$

Tabel 3. 32. Hasil Fuzzifikasi Aquafaba + agar-agar

Variabel	μ_R	μ_S	μ_T
Fungsi	0.000	0.000	0.780
Tekstur	0.000	0.113	0.553
Rasa	0.000	0.000	0.780
Ketersediaan	0.000	0.113	0.553

b) Alternatif 2: Silken tofu + maizena

(1) Fungsi ($X_1 = 3.33$):

(a) $\mu_R = 0$

(b) $\mu_S = (4.5 - 3.33)/1.5 = 0.780$

(c) $\mu_T = 0$

(2) Tekstur ($X_2 = 3.67$):

(a) $\mu_R = 0$

(b) $\mu_S = (4.5 - 3.67)/1.5 = 0.83/1.5 = 0.553$

(c) $\mu_T = (3.67 - 3.5)/1.5 = 0.17/1.5 = 0.113$

(3) Rasa ($X_3 = 3.33$):

(a) $\mu_S = 0.780$

(4) Ketersediaan ($X_4 = 3.00$):

(a) $\mu_S = (3.00 - 1.5)/(4.5 - 1.5) = 1.000$.

Tabel 3. 33. Hasil Fuzzifikasi Silken tofu + maizena

Variabel	μ_R	μ_S	μ_T
Fungsi	0.000	0.780	0.000
Tekstur	0.000	0.553	0.113
Rasa	0.000	0.780	0.000
Ketersediaan	0.000	1.000	0.000

c) Alternatif 3: Agar-agar plain + maizena

(1) Fungsi ($X_1 = 4.00$):

$$(a) \mu_S = (4.5 - 4.0)/1.5 = 0.333$$

$$(b) \mu_T = (4.0 - 3.5)/1.5 = 0.333$$

(2) Tekstur ($X_2 = 4.00$):

$$(a) \text{ Sama dengan Fungsi. } \mu_S = 0.333, \mu_T = 0.333$$

(3) Rasa ($X_3 = 3.33$):

$$(a) \mu_S = 0.780$$

(4) Ketersediaan ($X_4 = 4.67$):

$$(a) \mu_T = (4.67 - 3.5)/1.5 = 0.780$$

Tabel 3. 34. Hasil Fuzzifikasi Agar-agar plain + maizena

Variabel	μ_R	μ_S	μ_T
Fungsi	0.000	0.333	0.333
Tekstur	0.000	0.333	0.333
Rasa	0.000	0.780	0.000
Ketersediaan	0.000	0.000	0.780

d. Tahap 4: Inferensi Fuzzy (Metode Mamdani)

1) Fuzzy Rule Base

Sistem menggunakan 3 aturan inferensi untuk setiap kriteria:

Tabel 3. 35. Aturan inferensi untuk kriteria

Rule	Kondisi	Output
R ₁	IF $\mu_{\text{Tinggi}} > \mu_{\text{Sedang}}$ AND $\mu_{\text{Tinggi}} > \mu_{\text{Rendah}}$	Tinggi
R ₂	IF $\mu_{\text{Sedang}} \geq \mu_{\text{Tinggi}}$ AND $\mu_{\text{Sedang}} > \mu_{\text{Rendah}}$	Sedang

R ₃	IF $\mu_{\text{Rendah}} \geq \mu_{\text{Sedang}}$ AND $\mu_{\text{Rendah}} \geq \mu_{\text{Tinggi}}$	Rendah
----------------	--	--------

Tabel 3. 36. Hasil Inferensi per Kriteria

Alternatif	Variabel	μ_R	μ_S	μ_T	Output Dominan
Aquafaba + agar-agar	Fungsi	0.000	0.000	0.780	Tinggi
	Tekstur	0.000	0.113	0.553	Tinggi
	Rasa	0.000	0.000	0.780	Tinggi
	Ketersediaan	0.000	0.113	0.553	Tinggi
Silken tofu + maizena	Fungsi	0.000	0.780	0.000	Sedang
	Tekstur	0.000	0.553	0.113	Sedang
	Rasa	0.000	0.780	0.000	Sedang
	Ketersediaan	0.000	1.000	0.000	Sedang
Agar-agar plain + maizena	Fungsi	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Tekstur	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Rasa	0.000	0.780	0.000	Sedang
	Ketersediaan	0.000	0.000	0.780	Tinggi

Catatan: Jika $\mu_S = \mu_T$, sistem mengambil nilai rata-rata terbobot pada tahap defuzzifikasi.

e. Tahap 5: Defuzzifikasi (Metode Weighted Average)

1) Rumus Defuzzifikasi

$$Z^* = \frac{\mu_R \times 12.5 + \mu_S \times 50 + \mu_T \times 87.5}{\mu_R + \mu_S + \mu_T}$$

2) Pusat Himpunan Fuzzy Output:

Tabel 3. 37. Fungsi keanggotaan Fuzzy

Himpunan	Pusat Segitiga (skala 1–5)	Konversi ke Skala 0–100
Rendah	$(1 + 1 + 2.5) / 3 = 1.50$	12.50
Sedang	$(1.5 + 3 + 4.5) / 3 = 3.00$	50.00
Tinggi	$(3.5 + 5 + 5) / 3 = 4.50$	87.50

a) Rendah: 12.50

b) Sedang: 50.00

c) Tinggi: 87.50

3) Perhitungan Skor per Kriteria

a) Aquafaba + agar-agar

(1) Fungsi: $(0.780 \times 87.5) / 0.780 = 87.50$

(2) Tekstur:

$$\begin{aligned} & ((0.113 \times 50) + (0.553 \times 87.5)) / (0.113 \\ & \quad + 0.553) \\ & = 54.04 / 0.666 = 81.14 \end{aligned}$$

(3) Rasa: $(0.780 \times 87.5) / 0.780 = 87.50$

(4) Ketersediaan: Sama dengan Tekstur = 81.14

b) Silken tofu + maizena

(1) Fungsi: $(0.780 \times 50) / 0.780 = 50.00$

(2) Tekstur: $((0.553 \times 50) + (0.113 \times 87.5)) / 0.666$

$$= 37.54 / 0.666 = .36$$

(3) Rasa: $(0.780 \times 50) / 0.780 = 50.00$

$$(4) \text{ Ketersediaan: } (1.000 \times 50)/1.000 = 50.00$$

c) Agar-agar plain + maizena

$$(1) \text{ Fungsi: } \frac{((0.333 \times 50) + (0.333 \times 87.5))}{0.666}$$

$$= 45.79/0.666 = 68.75$$

$$(2) \text{ Tekstur: Sama dengan Fungsi} = 68.75$$

$$(3) \text{ Rasa: } (0.780 \times 50)/0.780 = 50.00$$

$$(4) \text{ Ketersediaan: } (0.780 \times 87.5)/0.780 = 87.50$$

f. Tahap 6: Integrasi AHP (Weighted Sum Model)

1) Rumus Perhitungan Skor Akhir

$$\text{Skor Akhir} = \sum_{j=1}^4 (S_j \times W_j)$$

2) Bobot Kriteria:

$$a) \text{ Fungsi } (W_1): 0.553$$

$$b) \text{ Tekstur } (W_2): 0.263$$

$$c) \text{ Rasa } (W_3): 0.11$$

$$d) \text{ Ketersediaan } (W_4): 0.073$$

3) Perhitungan Skor Akhir:

a) Aquafaba + agar-agar

$$\text{Skor} = 81.14 \times 0.553 + 81.14 \times 0.263 + 87.50 \times 0.110 + 81.14 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 44.87 + 21.34 + 9.63 + 5.92 = 81.76$$

b) Silken tofu + maizena

$$\text{Skor} = 56.36 \times 0.553 + 56.36 \times 0.263 + 56.36 \times 0.110 + 50.00 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 31.17 + 14.82 + 6.20 + 3.65 = 55.84$$

c) Agar-agar plain + maizena

$$\text{Skor} = 68.75 \times 0.553 + 68.75 \times 0.263 + 56.36 \times 0.110 + 81.14 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 38.02 + 18.08 + 6.20 + 5.92 = 68.22$$

g. Tahap 7: Perangkingan (Ranking)

Tabel 3. 38. Hasil Perangkingan Akhir

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + agar-agar	85.27	Sangat Direkomendasikan
2	Agar-agar plain + maizena	67.99	Direkomendasikan
3	Silken tofu + maizena	51.63	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Creme Caramel, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + agar-agar yang paling unggul dengan skor 5.27 (Sangat Direkomendasikan), karena kombinasi aquafaba sebagai pengikat dan agar-agar sebagai pembentuk gel meniru fungsi telur dengan sempurna untuk tekstur custard yang lembut. Sementara itu, Silken tofu + maizena hanya mendapat skor 51.63 karena tofu membuat custard terlalu berair dan sulit memadat, sedangkan Agar-agar plain + maizena mendapat skor 67.99, cukup baik tapi kurang memberikan kelembutan khas custard.

2. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Bolu Kukus "

a. Tahap 1: Forward Chaining (Pencocokan Aturan)

1) Input Pengguna: Alergi = "Telur" AND Kue = "Bolu Kukus"

2) Output (Alternatif Kandidat):

a) Aquafaba

b) Flax egg + baking powder

c) Applesauce + cuka apel

b. Tahap 2: Input Data Penilaian Pakar (Crisp Input)

Tabel 3. 39. Nilai Rata-rata Penilaian Pakar

Alternatif	Variabel	Pakar 1	Pakar 2	Pakar 3	Rata- rata (X)
Aquafaba	Fungsi	4	3	4	3.67
	Tekstur	4	3	4	3.67
	Rasa	4	3	5	4.00
	Ketersediaan	4	4	3	3.67
Flax egg + baking	Fungsi	4	3	5	4.00
	Tekstur	4	3	5	4.00
	Rasa	4	3	3	3.33
	Ketersediaan	4	4	4	4.00
Applesauce + cuka	Fungsi	3	4	3	3.33
	Tekstur	3	3	3	3.00
	Rasa	3	4	3	3.33
	Ketersediaan	3	4	2	3.00

c. Tahap 3: Fuzzifikasi (Mengubah Crisp Ke Fuzzy)

1) Parameter Himpunan Fuzzy

- a) Rendah (R): (1, 1, 2.5)
- b) Sedang (S): (1.5, 3, 4.5)
- c) Tinggi (T): (3.5, 5, 5)

2) Perhitungan Fuzzifikasi

a) Alternatif 1: Aquafaba

(1) Fungsi ($X_1 = 3.67$):

(a) $\mu_R(3.67) = 0$

(b) $\mu_S(3.67) = (4.5 - 3.67) / (4.5 - 3) = 0.83 / 1.5 = 0.553$

(c) $\mu_T(3.67) = (3.67 - 3.5) / (5 - 3.5) = 0.17 / 1.5 = 0.113$

(2) Tekstur ($X_2 = 3.67$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 0.553$,
 $\mu_T = 0.113$

(3) Rasa ($X_3 = 4.00$):

(a) $\mu_R(4.00) = 0$

(b) $\mu_S(4.00) = (4.5 - 4.0) / 1.5 = 0.333$

(c) $\mu_T(4.00) = (4.0 - 3.5) / 1.5 = 0.333$

(4) Ketersediaan ($X_4 = 3.67$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 0.553$,
 $\mu_T = 0.113$

Tabel 3. 40. Hasil Fuzzifikasi Aquafaba

Variabel	μ_{Rendah}	μ_{Sedan} g	μ_{Tinggi}
Fungsi	0.000	0.553	0.113
Tekstur	0.000	0.553	0.113
Rasa	0.000	0.333	0.333
Ketersediaan	0.000	0.553	0.113

b) Alternatif 2: Flax egg + baking powder

(1) Fungsi ($X_1 = 4.00$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$

(2) Tekstur ($X_2 = 4.00$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$

(3) Rasa ($X_3 = 3.33$):

(a) $\mu_R(3.33) = 0$

(b) $\mu_S(3.33) = (4.5 - 3.33) / 1.5 = 1.17 / 1.5 = 0.780$

(c) $\mu_T(3.33) = 0$

(4) Ketersediaan ($X_4 = 4.00$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$

Tabel 3. 41. Hasil Fuzzifikasi Flax egg + baking powder

Variabel	μ_{Rendah}	μ_{Sedang}	μ_{Tinggi}
Fungsi	0.000	0.333	0.333
Tekstur	0.000	0.333	0.333
Rasa	0.000	0.780	0.000
Ketersediaan	0.000	0.333	0.333

c) Alternatif 3: Applesauce + cuka apel

(1) Fungsi ($X_1 = 3.33$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 0.780$, $\mu_T = 0$

(2) Tekstur ($X_2 = 3.00$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 1.000$ (pusat segitiga), $\mu_T = 0$

(3) Rasa ($X_3 = 3.33$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 0.780$, $\mu_T = 0$

(4) Ketersediaan ($X_4 = 3.00$): $\mu_R = 0$, $\mu_S = 1.000$,
 $\mu_T = 0$

Tabel 3. 42. Hasil Fuzzifikasi Applesauce + cuka apel

Variabel	μ_{Rendah}	μ_{Sedang}	μ_{Tinggi}
Fungsi	0.000	0.780	0.000
Tekstur	0.000	1.000	0.000
Rasa	0.000	0.780	0.000
Ketersediaan	0.000	1.000	0.000

d. Tahap 4: Inferensi Fuzzy (Metode Mamdani)

Tabel 3. 43. Hasil Inferensi per Kriteria

Alternatif	Variabel	μ_R	μ_S	μ_T	Output Dominan
Aquafaba	Fungsi	0.000	0.553	0.113	Sedang
	Tekstur	0.000	0.553	0.113	Sedang
	Rasa	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi*
	Ketersediaan	0.000	0.553	0.113	Sedang
Flax egg + baking	Fungsi	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi*
	Tekstur	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi*
	Rasa	0.000	0.780	0.000	Sedang
	Ketersediaan	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi*
	Fungsi	0.000	0.780	0.000	Sedang

Applesauce + cuka	Tekstur	0.000	1.000	0.000	Sedang
	Rasa	0.000	0.780	0.000	Sedang
	Ketersediaan	0.000	1.000	0.000	Sedang

e. Tahap 5: Defuzzifikasi (Metode Weighted Average)

1) Perhitungan Skor per Kriteria

a) Aquafaba

Tabel 3. 44. Hasil skor dari aquafaba

Variabel	Perhitungan	Skor (S)
Fungsi	$(0 \times 12.5 + 0.553 \times 50 + 0.113 \times 87.5) / 0.666 = 37.54 / 0.666$	56.36
Tekstur	$(0 \times 12.5 + 0.553 \times 50 + 0.113 \times 87.5) / 0.666 = 37.54 / 0.666$	56.36
Rasa	$(0 \times 12.5 + 0.333 \times 50 + 0.333 \times 87.5) / 0.666 = 45.79 / 0.666$	68.75
Ketersediaan	$(0 \times 12.5 + 0.553 \times 50 + 0.113 \times 87.5) / 0.666 = 37.54 / 0.666$	56.36

b) Flax egg + baking powder

Tabel 3. 45. Hasil skor dari Flax egg + baking powder

Variabel	Perhitungan	Skor (S)
Fungsi	$(0 \times 12.5 + 0.333 \times 50 + 0.333 \times 87.5) / 0.666 = 45.79 / 0.666$	68.75
Tekstur	$(0 \times 12.5 + 0.333 \times 50 + 0.333 \times 87.5) / 0.666 = 45.79 / 0.666$	68.75
Rasa	$(0 \times 12.5 + 0.780 \times 50 + 0 \times 87.5) / 0.780 = 39.00 / 0.780$	50.00
Ketersediaan	$(0 \times 12.5 + 0.333 \times 50 + 0.333 \times 87.5) / 0.666 = 45.79 / 0.666$	68.75

c) Applesauce + cuka apel

Tabel 3. 46. Hasil skor dari Applesouce + cuka apel

Variabel	Perhitungan	Skor (S)
Fungsi	$(0 \times 12.5 + 0.780 \times 50 + 0 \times 87.5) / 0.780 = 39.00 / 0.780$	50.00
Tekstur	$(0 \times 12.5 + 1.000 \times 50 + 0 \times 87.5) / 1.000 = 50.00 / 1.000$	50.00

Rasa	$(0 \times 12.5 + 0.780 \times 50 + 0 \times 87.5) / 0.780 = 39.00 / 0.780$	50.00
Ketersediaan	$(0 \times 12.5 + 1.000 \times 50 + 0 \times 87.5) / 1.000 = 50.00 / 1.000$	50.00

f. Tahap 6: Integrasi AHP (Weighted Sum Model)

1) Bobot Kriteria:

- a) Fungsi=0.553,
- b) Tekstur=0.263,
- c) Rasa=0.11,
- d) Ketersediaan=0.073

2) Perhitungan

a) Aquafaba

$$\text{Skor} = 56.36 \times 0.553 + 56.36 \times 0.263 + 68.75 \times 0.110 + 56.36 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 31.17 + 14.82 + 7.56 + 4.11 = 57.66$$

b) Flax egg + baking powder

$$\text{Skor} = 68.75 \times 0.553 + 68.75 \times 0.263 + 50.00 \times 0.110 + 68.75 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 38.02 + 18.08 + 5.50 + 5.02 = 66.62$$

c) Applesauce + cuka apel

$$\text{Skor} = 50.00 \times 0.553 + 50.00 \times 0.263 + 50.00 \times 0.110 + 50.00 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 27.65 + 13.15 + 5.50 + 3.65 = 49.95$$

g. Tahap 7: Perangkingan (Ranking)

Tabel 3. 47. Hasil Perangkingan Akhir

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Flax egg + baking powder	66.62	Direkomendasikan
2	Aquafaba	57.68	Direkomendasikan
3	Applesauce + cuka apel	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Bolu Kukus, mendapatkan hasil kalau Flax egg + baking powder yang paling unggul dengan skor 66.62 (Direkomendasikan), karena baking powder membantu bolu kukus mekar sempurna yang jadi ciri khas kue ini. Aquafaba mendapat skor 57.68, sebenarnya bagus tapi kurang maksimal tanpa pengembang tambahan, sementara Applesauce + cuka apel hanya mendapat skor 49.95 karena membuat adonan terlalu berat dan bolu kurang mengembang.

3. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Kue Putu Ayu "

a. Tahap 1: Forward Chaining (Pencocokan Aturan)

- 1) Input Pengguna: Alergi = "Telur" AND Kue = "Kue Putu Ayu".
- 2) Output (Alternatif Kandidat):
 - a) Aquafaba + baking soda
 - b) Yogurt nabati + soda kue
 - c) Pure pisang + cuka

b. Tahap 2: Input Data Penilaian Pakar (Crisp Input)

Tabel 3. 48. Nilai Rata-rata Penilaian Pakar

Alternatif	Variabel	Pakar 1	Pakar 2	Pakar 3	Rata-rata (X)
Aquafaba + baking	Fungsi	5	4	4	4.33
	Tekstur	5	3	4	4.00
	Rasa	5	2	5	4.00
	Ketersediaan	5	3	4	4.00
Yogurt nabati + soda	Fungsi	3	4	3	3.33
	Tekstur	3	4	3	3.33
	Rasa	3	4	3	3.33
	Ketersediaan	3	4	3	3.33
Pure pisang + cuka	Fungsi	5	4	4	4.33
	Tekstur	4	3	5	4.00
	Rasa	3	3	3	3.00
	Ketersediaan	5	4	5	4.67

c. Tahap 3: Fuzzifikasi (Mengubah Crisp Ke Fuzzy)

1) Alternatif 1: Aquafaba + baking soda

- a) Fungsi (4.33): $\mu_S = 0.113$, $\mu_T = 0.553$
- b) Tekstur (4.00): $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$
- c) Rasa (4.00): $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$
- d) Ketersediaan (4.00): $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$

2) Alternatif 2: Yogurt nabati + soda kue

- a) Fungsi (3.33): $\mu_S = 0.780$
- b) Tekstur (3.33): $\mu_S = 0.780$
- c) Rasa (3.33): $\mu_S = 0.780$
- d) Ketersediaan (3.33): $\mu_S = 0.780$

3) Alternatif 3: Pure pisang + cuka

a) Fungsi (4.33): $\mu_S = 0.113$, $\mu_T = 0.553$

b) Tekstur (4.00): $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$

c) Rasa (3.00): $\mu_S = 1.000$

d) Ketersediaan (4.67): $\mu_T = 0.780$

d. Tahap 4: Inferensi Fuzzy (Metode Mamdani)

Tabel 3. 49. Inferensi Fuzzy

Alternatif	Variabel	μ_R	μ_S	μ_T	Output Dominan
Aquafaba + Baking powder	Fungsi	0.000	0.113	0.553	Tinggi
	Tekstur	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Rasa	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Ketersediaan	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
Yogurt nabati	Fungsi	0.000	0.780	0.000	Tinggi
	Tekstur	0.000	0.780	0.000	Tinggi
	Rasa	0.000	0.780	0.000	Tinggi
	Ketersediaan	0.000	0.780	0.000	Tinggi
Pure pisang	Fungsi	0.000	0.113	0.553	Tinggi
	Tekstur	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Rasa	0.000	1.000	0.000	Sedang
	Ketersediaan	0.000	0.000	0.780	Sedang

e. Tahap 5: Defuzzifikasi (Metode Weighted Average)

1) Aquafaba + baking soda

a) Fungsi (4.33): $(0.113 \times 50 + 0.553 \times 87.5) / 0.666 = 81.14$

b) Tekstur (4.00): $(0.333 \times 50 + 0.333 \times 87.5) / 0.666 = 68.75$

c) Rasa (4.00): 68.75

d) Ketersediaan (4.00): 68.75

2) Yogurt nabati + soda kue

a) Semua Variabel (3.33): $(0.780 \times 50) / 0.780 = 50.00$

3) Pure pisang + cuka

a) Fungsi (4.33): 81.14

b) Tekstur (4.00): 68.75

c) Rasa (3.00): $(1.000 \times 50) / 1.000 = 50.00$

d) Ketersediaan (4.67): $(0.780 \times 87.5) / 0.780 = 87.50$

f. Tahap 6: Integrasi AHP (Weighted Sum Model)

1) Bobot: Fungsi=0.553, Tekstur=0.263, Rasa=0.11, Ketersediaan=0.073

2) Perhitungan

a) Aquafaba + baking soda

$$\text{Skor} = 81.14 \times 0.553 + 68.75 \times 0.263 + 68.75 \times 0.110 + 68.75 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 44.87 + 18.08 + 7.56 + 5.02 = 75.53$$

b) Yogurt nabati + soda kue

$$\text{Skor} = 50.00 \times 0.553 + 50.00 \times 0.263 + 50.00 \times 0.110 + 50.00 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 27.65 + 13.15 + 5.50 + 3.65 = 49.95$$

c) Pure pisang + cuka

$$\text{Skor} = 81.14 \times 0.553 + 68.75 \times 0.263 + 50.00 \times 0.110 + 87.50 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 44.87 + 18.08 + 5.50 + 6.39 = 74.84$$

g. Tahap 7: Perangkingan (Ranking)

Tabel 3. 50. Hasil perangkingan terakhir

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + baking soda	75.52	Sangat Direkomendasikan
2	Pure pisang + cuka	74.83	Sangat Direkomendasikan
3	Yogurt nabati + soda kue	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Kue Putu Ayu, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + baking soda yang paling unggul dengan skor 75.52 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur pandan yang lembut dengan pengembangan optimal. Pure pisang + cuka mendapat skor 74.83, sebenarnya cukup baik tapi rasa pisang terlalu kuat sehingga mengubah karakter asli putu ayu, sedangkan Yogurt nabati + soda kue hanya mendapat skor 49.95 karena menghasilkan kue yang terlalu padat.

4. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Marble Cake "

a. Tahap: Forward Chaining

1) Input: Alergi = "Telur" AND Kue = "Marble Cake".

2) Alternatif:

a) Aquafaba + cream of tartar,

- b) Silken tofu blender,
- c) Chia egg + cuka apel.

b. Tahap: Nilai Rata-rata Penilaian Pakar

Tabel 3. 51. Nilai rata-rata pakar

Alternatif	Variabel	Pakar 1	Pakar 2	Pakar 3	Rata- rata
Aquafaba + cream	Fungsi	5	3	4	4.00
	Tekstur	5	3	4	4.00
	Rasa	3	4	3	3.33
	Ketersediaan	5	3	5	4.33
Silken tofu blender	Fungsi	4	3	5	4.00
	Tekstur	3	2	4	3.00
	Rasa	2	1	3	2.00
	Ketersediaan	3	3	3	3.00
Chia egg + cuka	Fungsi	4	3	4	3.67
	Tekstur	4	3	4	3.67
	Rasa	4	3	3	3.33
	Ketersediaan	4	3	3	3.33

c. Tahap: Fuzzifikasi

1) Alternatif 1: Aquafaba + cream

- a) Fungsi (4.00): $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$
- b) Tekstur (4.00): $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$
- c) Rasa (3.33): $\mu_S = 0.780$
- d) Ketersediaan (4.33): $\mu_S = 0.113$, $\mu_T = 0.553$

2) Alternatif 2: Silken tofu blender

- a) Fungsi (4.00): $\mu_S = 0.333$, $\mu_T = 0.333$
- b) Tekstur (3.00): $\mu_S = 1.000$
- c) Rasa(2.00):

$$(1) \mu_R = (2.50 - 2.00) / (2.5 - 1) = 0.5 / 1.5 = 0.333$$

$$(2) \mu_S = (2.00 - 1.5) / (4.5 - 3) = 0.5 / 1.5 = 0.333$$

$$d) \text{ Ketersediaan (3.00): } \mu_S = 0.780$$

3) Alternatif 3: Chia egg + cuka

$$a) \text{ Fungsi (3.67): } \mu_S = 0.553, \mu_T = 0.113$$

$$b) \text{ Tekstur (3.67): } \mu_S = 0.553, \mu_T = 0.113$$

$$c) \text{ Rasa (3.33): } \mu_S = 0.780$$

$$d) \text{ Ketersediaan (3.33): } \mu_S = 0.780$$

d. Tahap 4: Inferensi Fuzzy (Metode Mamdani)

Tabel 3. 52. Inferensi Fuzzy

Alternatif	Variabel	μ_R	μ_S	μ_T	Output Dominan
Aquafaba + cream	Fungsi	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Tekstur	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Rasa	0.000	0.780	0.000	Sedang
	Ketersediaan	0.000	0.113	0.553	Tinggi
Silken tofu blender	Fungsi	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Tekstur	0.000	1.000	0.000	Sedang
	Rasa	0.000	0.333	0.333	Sedang/ Tinggi
	Ketersediaan	0.000	0.780	0.000	Sedang

Chia egg + cuka	Fungsi	0.000	0.553	0. 113	Sedang
	Tekstur	0.000	0.553	0. 113	Sedang
	Rasa	0.000	0. 780	0.000	Sedang
	Ketersediaan	0.000	0. 780	0.000	Sedang

e. Tahap: Defuzzifikasi

1) Aquafaba + cream:

- a) Fungsi (4.00→68.75),
- b) Tekstur (4.00→68.75),
- c) Rasa (3.33→50.00),
- d) Ketersediaan (4.33→81.14).

2) Silken tofu blender:

- a) Fungsi (4.00→68.75),
- b) Tekstur (3.00→50.00),
- c) Rasa (2.00→37.51),
- d) Ketersediaan (3.00→50.00).

3) Chia egg + cuka:

- a) Fungsi (3.67→56.36),
- b) Tekstur (3.67→56.36),
- c) Rasa (3.33→50.00),
- d) Ketersediaan (3.33→50.00).

f. Tahap: Integrasi AHP

1) Aquafaba + cream of tartar

$$\text{Skor} = 68.75 \times 0.553 + 68.75 \times 0.263 + 50.00 \times 0.110 + 81.14 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 38.02 + 18.08 + 5.50 + 5.92 = 67.52$$

2) Silken tofu blender

$$\text{Skor} = 68.75 \times 0.553 + 50.00 \times 0.263 + 37.51 \times 0.110 + 50.00 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 38.02 + 13.15 + 4.13 + 3.65 = 58.95$$

3) Chia egg + cuka apel

$$\text{Skor} = 56.36 \times 0.553 + 56.36 \times 0.263 + 50.00 \times 0.110 + 50.00 \times 0.073$$

$$\text{Skor} = 31.17 + 14.82 + 5.50 + 3.65 = 55.14$$

g. Tahap: Perangkingan

Tabel 3. 53. Hasil skor perangkingan

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + cream of tartar	67.52	Direkomendasikan
2	Silken tofu blender	58.26	Direkomendasikan
3	Chia egg + cuka apel	55.15	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Marble Cake, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + cream of tartar yang paling unggul dengan skor 67.52 (Direkomendasikan), karena cream of tartar membantu menjaga pola marmer tetap jelas dan tidak

bercampur. Silken tofu blender mendapat skor 58.26, membuat adonan kurang stabil, sementara Chia egg + cuka apel hanya mendapat skor 55.14 karena kurang memberikan struktur yang kokoh untuk pola marmer.

5. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Madeleine "

Tabel 3. 54. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Madeleine

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + cream of tartar	81.51	Sangat Direkomendasikan
2	Pure pisang + cuka	61.38	Direkomendasikan
3	Yogurt nabati + baking soda	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Madeleine, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + cream of tartar yang paling unggul dengan skor 81.51 (Sangat Direkomendasikan), karena mampu membentuk cangkang madeleine yang sempurna dengan tekstur renyah di luar dan lembut di dalam. Pure pisang + cuka mendapat skor 61.38, cukup baik tapi rasa pisang terlalu dominan, sedangkan Yogurt nabati + baking soda hanya mendapat skor 49.95 karena membuat madeleine kurang renyah.

6. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Brownies "

Tabel 3. 55. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Brownies

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Sweet potato	75.12	Sangat Direkomendasikan
2	Applesauce	70.91	Sangat Direkomendasikan
3	Silken tofu blender	53.94	Direkomendasikan
4	Flax egg	53.48	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Brownies, mendapatkan hasil kalau Sweet potato yang paling unggul dengan skor 75.12 (Sangat Direkomendasikan), karena ubi jalar memberikan tekstur fudgy yang ideal dan kelembapan alami yang sempurna untuk brownies. Applesauce mendapat skor 70.91, menghasilkan brownies moist tapi kurang fudgy, sementara Silken tofu blender (53.94) dan Flax egg (53.48) membuat tekstur brownies terlalu kenyal dan kurang padat.

7. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Choux "

Tabel 3. 56. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Choux

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + Baking Powder	62.59	Direkomendasikan
2	Yogurt nabati + soda kue	53.48	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Choux, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + Baking Powder yang paling unggul dengan skor 62.59 (Direkomendasikan), karena kombinasi ini menghasilkan rongga udara khas choux yang dibutuhkan. Yogurt nabati + soda kue hanya mendapat skor 53.48 karena membuat choux kurang mengembang dengan baik dan rongga udaranya kurang sempurna.

8. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Dacquoise "

Tabel 3. 57. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Dacquoise

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba	82.21	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Dacquoise, mendapatkan hasil kalau Aquafaba yang paling unggul dengan skor 82.21 (Sangat Direkomendasikan), karena aquafaba adalah satu-satunya alternatif yang mampu membuat meringue almond yang stabil dan kokoh. Ini menjadi pilihan mutlak untuk Dacquoise yang sangat bergantung pada stabilitas meringue.

9. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Churros "

Tabel 3. 58. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Churros

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + Baking Powder	87.42	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Churros, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + Baking Powder yang paling unggul dengan skor 87.42 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan kerenyahan dan rongga udara sempurna yang dibutuhkan untuk churros tradisional. Kombinasi ini menghasilkan churros yang renyah di luar tapi tetap lembut di dalam.

10. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Cannoli "

Tabel 3. 59. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Cannoli

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba (Kulit)	81.04	Sangat Direkomendasikan
2	Vegan Yoghurt (Isian)	69.54	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Cannoli, mendapatkan hasil kalau Aquafaba untuk kulit yang paling unggul dengan skor 81.04 (Sangat Direkomendasikan), karena menghasilkan kulit cannoli yang renyah sempurna. Sementara itu, Vegan Yoghurt untuk isian mendapat skor 69.54 (Direkomendasikan), cukup creamy tapi kurang kaya rasa dibanding isian tradisional.

11. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Croissant "

Tabel 3. 60. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Croissant

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba	64.07	Direkomendasikan
2	Susu nabati + minyak + sirup maple	58.41	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Croissant, mendapatkan hasil kalau Aquafaba yang paling unggul dengan skor 64.07 (Direkomendasikan), karena membantu pembentukan lapisan pastry yang tipis dan berlapis. Susu nabati + minyak + sirup maple hanya mendapat skor 58.41 karena membuat adonan kurang elastis untuk proses laminasi.

12. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Donat "

Tabel 3. 61. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Donat

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba	66.42	Direkomendasikan
2	Flax egg	56.67	Direkomendasikan
3	Pure pisang	53.48	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Donat, mendapatkan hasil kalau Aquafaba yang paling unggul dengan skor 66.42 (Direkomendasikan), karena memberikan tekstur empuk yang ideal untuk donat goreng. Pure pisang mendapat skor 53.48, memberikan moist tapi kurang airy, sementara Flax egg hanya mendapat skor 56.67 karena membuat donat terlalu padat.

13. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Macaron "

Tabel 3. 62. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Macaron

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Commercial meringue powder	75.52	Sangat Direkomendasikan
2	Aquafaba kental + cream of tartar	54.84	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Macaron, mendapatkan hasil kalau Commercial meringue powder yang paling unggul dengan skor 75.52 (Sangat Direkomendasikan), karena stabil dan konsisten, dua hal yang penting untuk macaron. Aquafaba kental + cream of tartar mendapat skor 54.84, lebih sulit dikontrol hasilnya dan skin macaron sering tidak terbentuk sempurna.

14. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Bika Ambon "

Tabel 3. 63. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Bika Ambon

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + soda kue + cuka	53.94	Direkomendasikan
2	Silken tofu + baking powder	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Bika Ambon, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + soda kue + cuka yang paling unggul dengan skor 53.94 (Cukup Direkomendasikan), karena reaksi kimia antara soda dan cuka membantu membentuk sarang khas bika. Silken tofu + baking powder hanya mendapat skor 49.95, tidak bisa memberikan struktur sarang yang dibutuhkan. Jujur, semua alternatif kurang memuaskan karena sarang khas bika ambon memang sangat sulit ditiru tanpa telur.

15. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Mille Crepe "

Tabel 3. 64. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Mille Crepe

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + susu nabati	83.52	Sangat Direkomendasikan
2	Chia egg + air	61.38	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Mille Crepe, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + susu nabati yang paling unggul dengan skor 73.52 (Sangat Direkomendasikan), karena menghasilkan crepe tipis yang lentur dan tidak mudah sobek saat ditumpuk. Chia egg + air mendapat skor 61.38, menghasilkan crepe yang lebih mudah sobek dan kurang lentur.

16. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Pound Cake "

Tabel 3. 65. Hasil Perangkingan Akhir Pound Cake

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba + baking powder	81.51	Sangat Direkomendasikan
2	Yogurt nabati + soda kue	62.70	Direkomendasikan
3	Applesauce + minyak	61.02	Direkomendasikan
4	Silken tofu	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Pound Cake, mendapatkan hasil kalau Aquafaba + baking powder yang paling unggul dengan skor 81.51 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur padat moist yang jadi ciri khas pound cake. Applesauce + minyak mendapat skor 61.02, cukup baik, Yogurt nabati + soda kue mendapat skor 62.70, moderat, sementara Silken tofu hanya mendapat skor 49.95 karena membuat pound cake terlalu berat dan padat.

17. Aturan R1: Alergi = "Telur" AND Kue = " Souffle "

Tabel 3. 66. Hasil Perangkingan Akhir Telur and Souffle

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba kental + cream of tartar	81.04	Sangat Direkomendasikan
2	Chickpea flour + air + baking powder	65.72	Direkomendasikan
3	Commercial meringue powder	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Souffle, mendapatkan hasil kalau Aquafaba kental + cream of tartar yang paling unggul dengan skor 81.04 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan pengembangan maksimal tanpa kempes, kunci sukses souffle. Chickpea flour + air + baking powder mendapat skor 65.72, kurang airy, sementara Commercial meringue powder hanya mendapat skor 49.95 karena tidak memberikan struktur yang ideal.

18. Rule : Alergi = "Telur" AND Kue = "Cookies"

Tabel 3. 67. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Cookies

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba	79.68	Sangat Direkomendasikan

2	Flax egg	62.70	Direkomendasikan
3	Chia egg	60.32	Direkomendasikan
4	Applesauce	53.48	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Cookies, mendapatkan hasil kalau Aquafaba yang paling unggul dengan skor 79.68 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan spread normal yang ideal untuk cookies. Flax egg mendapat skor 62.70, membuat cookies lebih chewy tapi kurang renyah, Chia egg mendapat skor 60.32, cukup baik, sementara Applesauce hanya mendapat skor 53.48 karena kurang memberikan tekstur renyah.

19. Rule: Alergi = "Telur" AND Kue = "Chiffon"

Tabel 3. 68. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Chiffon

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba kental + Silken tofu	81.82	Sangat Direkomendasikan
2	Commercial egg replacer	77.02	Sangat Direkomendasikan
3	Yogurt nabati + aquafaba	55.55	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Chiffon, mendapatkan hasil kalau Aquafaba kental + Silken tofu yang paling unggul dengan skor 81.82 (Sangat Direkomendasikan), karena kombinasi aquafaba untuk putih dan tofu untuk kuning telur memberikan tekstur kapas yang lembut khas chiffon. Commercial egg replacer mendapat skor 77.02, cukup baik,

sementara Yogurt nabati + aquafaba hanya mendapat skor 55.55 karena membuat chiffon terlalu basah dan kurang mengembang.

20. Rule: Alergi = "Telur" AND Kue = "Carrot Cake"

Tabel 3. 69. Hasil Perangkingan Akhir Telur dan Carrot Cake

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Aquafaba	80.84	Sangat Direkomendasikan
2	Pure pisang	76.99	Sangat Direkomendasikan
3	Flax egg	68.50	Direkomendasikan

Untuk alergi telur dalam pembuatan Carrot Cake, mendapatkan hasil kalau Aquafaba yang paling unggul dengan skor 80.84 (Sangat Direkomendasikan), karena menjaga kelembapan alami dari wortel parut tanpa mengubah rasa. Pure pisang mendapat skor 76.99, baik tapi mengubah rasa, sementara Flax egg hanya mendapat skor 68.50 karena membuat tekstur kurang lembut

21. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Bakpao"

Tabel 3. 70. Hasil Perangkingan Akhir Gluten Dan Bakpao

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung Beras + Tapioka + Xanthan Gum	86.95	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Bakpao, mendapatkan hasil kalau Tepung Beras + Tepung Tapioka + Xanthan Gum yang paling unggul dengan skor 86.95 (Sangat Direkomendasikan), karena Xanthan Gum meniru elastisitas gluten sehingga bakpao tetap empuk dan lembut. Kombinasi tepung beras dan tapioka memberikan struktur yang sempurna untuk bakpao yang mengembang.

22. Rule : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Apem"

Tabel 3. 71. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Apem

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung ketan + beras	85.03	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Sagu	83.19	Sangat Direkomendasikan
3	Tepung beras + Tepung Tapioka	73.17	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Apem, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Tepung Tapioka dengan skor 73.17 (Sangat Direkomendasikan), karena kombinasi ini ideal untuk fermentasi dan memberikan tekstur kenyal khas apem tradisional. Tepung ketan + beras mendapat skor 85.03, juga sangat baik, sementara Mocaf + Sagu mendapat skor 83.19 karena untuk tekstur apem yang sempurna.

23. Rule : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Bolu Kukus"

Tabel 3. 72. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Bolu Kukus

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung beras + Maizena + Baking Powder	73.53	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Xanthan gum	62.70	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Bolu Kukus, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Tepung maizena + Baking Powder yang paling unggul dengan skor 73.53(Sangat Direkomendasikan), karena kombinasi ini menghasilkan bolu kukus yang mekar sempurna dengan tekstur lembut. Mocaf + Xanthan gum hanya mendapat skor 62.70 karena kurang optimal untuk pengembangan bolu kukus.

24. Rule : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Kue Putu Ayu"

Tabel 3. 73. Hasil Perankingan Akhir Gluten dan Kue Putu Ayu

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung oat + beras + maizena + Xanthan	81.82	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Pati kentang	76.51	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Kue Putu Ayu, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + tepung tapioca yang paling unggul dengan skor 81.82 (Direkomendasikan), karena memberikan tekstur lembut hijau yang khas untuk putu ayu. Mocaf + Baking powder hanya mendapat skor 76.51 karena membuat putu ayu kurang lembut.

25. Rule : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Marble Cake"

Tabel 3. 74. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Marble Cake

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung oat + beras + maizena + Xanthan	74.16	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Pati kentang	65.72	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Marble Cake, mendapatkan hasil kalau Tepung oat + beras + maizena + Xanthan yang paling unggul dengan skor 74.16 (Direkomendasikan), karena Xanthan membantu menjaga pola marmer tetap stabil dan tidak bercampur. Mocaf + Pati kentang hanya mendapat skor 65.72 karena kurang memberikan struktur yang kokoh untuk mempertahankan pola marmer.

26. Rule : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Madeleine"

Tabel 3. 75. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Madeleine

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung beras + Pati jagung	64.07	Direkomendasikan
2	Tepung Beras dan Oat	63.36	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Madeleine, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Pati jagung yang paling unggul dengan skor 64.07 (Direkomendasikan), karena memberikan tekstur renyah khas cangkang madeleine. Tepung Beras dan Oat mendapat skor 63.36, sedikit lebih berat dan kurang renyah dibanding pati jagung.

27. Rule : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Brownies"

Tabel 3. 76. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Brownies

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung Oat	76.79	Sangat Direkomendasikan
2	Tepung almond + Maizena	74.16	Sangat Direkomendasikan
3	Tepung beras + Tapioka	63.36	Direkomendasikan
4	Sorgum + Xanthan	51.63	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Brownies, mendapatkan hasil kalau Tepung Oat yang paling unggul dengan skor 76.79 (Direkomendasikan), karena memberikan tekstur fudgy yang mirip brownies biasa plus tambahan serat sehat. Tepung almond + Maizena mendapat skor 74.16, juga bagus, Tepung beras + Tapioka mendapat skor 63.36, kurang moist, sementara Sorgum + Xanthan hanya mendapat skor 51.63 karena kurang optimal.

28. Rule : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Choux"

Tabel 3. 77. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Choux

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung beras + Tapioka + Xanthan	63.16	Direkomendasikan
2	Mocaf + Guar gum	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Choux, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Tapioka + Xanthan yang paling unggul dengan skor 63.16 (Direkomendasikan), karena Xanthan membantu membentuk rongga udara khas choux. Mocaf + Guar gum hanya mendapat skor 49.95 karena membuat choux kurang mengembang dengan baik.

29. Rule : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Churros"

Tabel 3. 78. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Churros

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung beras + Tapioka + Xanthan	75.07	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Psyllium	70.57	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Churros, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Tapioka + Xanthan yang paling unggul dengan skor 75.07 (Direkomendasikan), karena memberikan kerenyahan sempurna untuk churros. Mocaf + Psyllium mendapat skor 70.57 - alternatif bagus tapi kurang renyah dibanding kombinasi beras dan tapioka.

30. RULE : Alergi = "Gluten" AND Kue = "Kue cucur"

Tabel 3. 79. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Kue Cucur

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor Akhir	Status Rekomendasi
1	Tepung beras + Tapioka	86.95	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + kapur sirih	73.17	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Kue Cucur, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Tapioka yang paling unggul dengan skor 86.95 (Sangat Direkomendasikan), karena kombinasi ini berhasil membuat sarang laba-laba khas cucur yang sempurna. Mocaf + kapur sirih mendapat skor 73.17, cukup

baik tapi sarangnya kurang jelas dan tidak seindah versi tradisional.

31. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Gandasturi"

Tabel 3. 80. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Gandasturi

Peringkat	Bahan Pengganti	Skor	Status
1	Tepung tapioka + tepung beras	85.03	Sangat Direkomendasikan
2	Tepung beras + maizena	83.19	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Gandasturi, mendapatkan hasil kalau Tepung tapioka + tepung beras yang paling unggul dengan skor 85.05 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur renyah khas gandasturi tradisional. Tepung beras + maizena mendapat skor 83.19, juga sangat baik tapi sedikit kurang renyah dibanding tapioka.

32. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Cannoli"

Tabel 3. 81. Hasil Perankingan Akhir Gluten dan Cannoli

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Tepung beras + tapioca + maizena + sorgum	73.53	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Psyllium	62.70	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Cannoli, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + tapioca + maizena + sorgum yang paling unggul dengan skor 73.52 (Direkomendasikan), karena kombinasi empat tepung ini memberikan kulit cannoli yang renyah sempurna. Mocaf +

Psyllium hanya mendapat skor 62.70 karena kulitnya cenderung mudah retak saat digoreng.

33. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Croissant"

Tabel 3. 82. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Croissant

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Sorgum + Pati kentang + Guar gum	69.54	Sangat Direkomendasikan
2	Tepung beras + tapioca + maizena + Xanthan	58.41	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Croissant, mendapatkan hasil kalau Sorgum + Pati kentang + Guar gum yang paling unggul dengan skor 69.54 (Direkomendasikan), karena Guar gum memberikan elastisitas yang dibutuhkan untuk proses laminasi (lipat-melipat adonan). Tepung beras + tapioca + maizena + Xanthan hanya mendapat skor 58.41 karena kurang elastis untuk proses lipatan pastry.

34. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Donat"

Tabel 3. 83. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Donat

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Tepung beras + Sorgum + Ragi ekstra	75.52	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Tapioka + Xanthan	67.31	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Donat, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Sorgum + Ragi ekstra yang paling unggul dengan skor 75.52 (Sangat Direkomendasikan), karena ragi ekstra membantu pengembangan maksimal sehingga donat empuk sempurna. Mocaf + Tapioka + Xanthan mendapat skor 67.31, cukup baik tapi donatnya kurang air.

35. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Pound cake"

Tabel 3. 84. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Pound Cake

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Tepung beras + Oat + Pati kentang	83.98	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Maizena	79.05	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Pound Cake, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Oat + Pati kentang yang paling unggul dengan skor 83.98 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur moist yang ideal untuk pound cake. Mocaf + Maizena mendapat skor 79.05, juga sangat baik, hampir setara dengan pemenang, jadi bisa jadi alternatif yang bagus.

36. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Carrot cake"

Tabel 3. 85. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Carrot Cake

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	GF all-purpose blend	68.68	Direkomendasikan

2	Mocaf + Pati jagung	60.48	Direkomendasikan
3	Tepung oat + Beras + Xanthan	57.68	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Carrot Cake, mendapatkan hasil kalau GF all-purpose blend yang paling unggul dengan skor 60.48 (Direkomendasikan), karena praktis dan stabil - tinggal pakai tanpa perlu mix sendiri. Mocaf + Pati jagung mendapat skor 61.83, cukup baik, sementara Tepung oat + Beras + Xanthan hanya mendapat skor 57.68 karena kurang konsisten hasilnya.

37. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Souffle"

Tabel 3. 86. asil Perangkingan Akhir Gluten dan Souffle

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Tepung beras + Maizena + BP	71.41	Sangat Direkomendasikan
2	Oat flour GF + Guar gum	66.42	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Souffle, mendapatkan hasil kalau Tepung beras + Maizena + BP yang paling unggul dengan skor 71.41 (Sangat Direkomendasikan), karena BP membantu pengembangan ringan yang dibutuhkan souffle. Oat flour GF + Guar gum mendapat skor 66.42, sedikit lebih berat dan kurang airy dibanding tepung beras.

38. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Chiffon"

Tabel 3. 87. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Chiffon

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Tepung beras halus + Tapioka + Guar	81.40	Sangat Direkomendasikan
2	Mocaf + Pati kentang	73.73	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Chiffon, mendapatkan hasil kalau Tepung beras halus + Tapioka + Guar yang paling unggul dengan skor 81.40 (Sangat Direkomendasikan), karena Guar gum membantu membuat chiffon tetap airy dengan tekstur kapas yang lembut. Mocaf + Pati kentang mendapat skor 73.73, sedikit lebih padat dan kurang lembut.

39. Rule: Alergi = "Gluten" AND Kue = "Cookies"

Tabel 3. 88. Hasil Perangkingan Akhir Gluten dan Cookies

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Oat flour GF + Almond flour	80.46	Sangat Direkomendasikan
2	Tepung sorgum + Maizena	78.77	Sangat Direkomendasikan
3	Tepung beras + Tapioka + Xanthan	68.68	Direkomendasikan

Untuk alergi gluten dalam pembuatan Cookies, mendapatkan hasil kalau Oat flour GF + Almond flour yang paling unggul dengan skor 80.46(Sangat Direkomendasikan),

karena memberikan kerenyahan yang sempurna untuk cookies. Tepung sorgum + Maizena mendapat skor 78.77, hampir setara dan juga sangat baik, sementara Tepung beras + Tapioka + Xanthan mendapat skor 68.68, cukup baik tapi kurang renyah.

40. Rule: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Bakpao"

Tabel 3. 89. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Bakpao

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Air + minyak + vanila	83.89	Sangat Direkomendasikan
2	Susu oat	81.04	Sangat Direkomendasikan
3	Susu kedelai	77.79	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Bakpao, mendapatkan hasil kalau Susu kedelai dengan skor 77.79 (Sangat Direkomendasikan), karena protein tinggi dalam susu kedelai membantu membuat bakpao empuk sempurna dengan warna putih yang cantik. Air + minyak + vanila mendapat skor 83.89, juga sangat baik dan lebih sederhana, sementara Susu oat mendapat skor 81.04, bagus tapi proteinnya lebih rendah dari kedelai.

41. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Crème Caramel"

Tabel 3. 90. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Creme Caramel

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Susu oat	83.67	Sangat Direkomendasikan
2	Susu kedelai plain	77.79	Sangat Direkomendasikan
3	Air kelapa + vanila	67.52	Direkomendasikan
4	Santan encer	67.32	Direkomendasikan

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Crème Caramel, mendapatkan hasil kalau Susu oat yang paling unggul dengan skor 83.67 (Sangat Direkomendasikan), karena teksturnya creamy dengan rasa netral yang sempurna untuk custard. Susu kedelai plain mendapat skor 77.79, bagus tapi ada sedikit aftertaste kedelai, Santan encer mendapat skor 67.32, mengubah rasa, sementara Air kelapa + vanila hanya mendapat skor 67.52 karena rasa kelapa terlalu dominan.

42. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Choux"

Tabel 3. 91. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Choux

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Susu kedelai	85.27	Sangat Direkomendasikan
2	Air biasa	81.51	Sangat Direkomendasikan
3	Susu oat	81.19	Sangat Direkomendasikan

4	Santan encer	53.70	Direkomendasikan
---	--------------	-------	------------------

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Choux, mendapatkan hasil kalau Susu kedelai yang paling unggul dengan skor 85.27 (Sangat Direkomendasikan), karena proteinnya membantu struktur choux yang kokoh. Menariknya, Air biasa mendapat skor 81.51, Susu oat mendapat 81.19, karena choux sebenarnya lebih mengandalkan uap air untuk mengembang. Santan encer hanya mendapat skor 53.70 karena terlalu berlemak.

43. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Churros"

Tabel 3. 92. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Churros

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Air biasa	86.25	Sangat Direkomendasikan
2	Susu almond	83.98	Sangat Direkomendasikan
3	Susu kedelai	73.61	Sangat Direkomendasikan
4	Santan encer	58.32	Direkomendasikan

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Churros, mendapatkan hasil kalau Air biasa yang paling unggul dengan skor 86.25 (Sangat Direkomendasikan), dan Susu almond mendapat skor 83.98 karena untuk churros tradisional, alternatif sederhana justru lebih baik. Susu kedelai mendapat skor 74.98, bagus, sementara Santan encer hanya mendapat skor 58.32 karena terlalu berlemak untuk churros.

44. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Macaron"

Tabel 3. 93. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Macaron

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Coconut cream	84.67	Sangat Direkomendasikan
2	Susu kedelai (filling)	80.42	Sangat Direkomendasikan
3	Susu oat	78.78	Sangat Direkomendasikan
4	Air + vanila (filling)	76.70	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Macaron, mendapatkan hasil kalau Coconut cream yang paling unggul dengan skor 84.67 (Sangat Direkomendasikan), karena teksturnya creamy sempurna untuk filling macaron. Susu kedelai (filling) mendapat skor 80.42, Air + vanila (filling) mendapat skor 76.70, dan Susu oat mendapat skor 78.78, semuanya sangat direkomendasikan, jadi tinggal pilih sesuai preferensi rasa.

45. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Mille crepe"

Tabel 3. 94. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Mille Crepe

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Susu oat	79.05	Sangat Direkomendasikan
2	Susu kedelai	75.98	Sangat Direkomendasikan
3	Santan encer	74.16	Sangat Direkomendasikan

4	Air + Minyak nabati	69.22	Sangat Direkomendasikan
---	---------------------	-------	-------------------------

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Mille Crepe, mendapatkan hasil kalau Susu oat yang paling unggul dengan skor 79.05 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur lentur sempurna untuk crepe tipis yang ditumpuk berlapis. Susu kedelai mendapat skor 75.98, Santan encer mendapat skor 74.16, dan Air + Minyak nabati mendapat skor 69.22, semuanya bagus, tinggal pilih sesuai selera.

46. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Pound cake"

Tabel 3. 95. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Pound Cake

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Susu kedelai + Minyak	85.34	Sangat Direkomendasikan
2	Santan	78.96	Sangat Direkomendasikan
3	Susu oat	76.89	Sangat Direkomendasikan
4	Yogurt nabati encer	70.91	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Pound Cake, mendapatkan hasil kalau Susu kedelai + Minyak yang paling unggul dengan skor 85.34 (Sangat Direkomendasikan), karena kombinasi ini memberikan kelembapan (moist) yang sempurna untuk pound cake. Santan mendapat skor 78.96 dan Susu oat mendapat skor 76.89, keduanya juga sangat baik, sementara Yogurt nabati encer hanya mendapat skor 70.91 karena kurang kaya rasa.

47. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Chiffon"

Tabel 3. 96. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Chiffon

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Susu oat	81.31	Sangat Direkomendasikan
2	Susu kedelai	69.58	Direkomendasikan
3	Santan encer	55.75	Direkomendasikan
4	Air + Minyak nabati + vanila	52.22	Direkomendasikan

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Chiffon, mendapatkan hasil kalau Susu oat yang paling unggul dengan skor 81.31 (Sangat Direkomendasikan), karena teksturnya yang ringan membantu chiffon tetap airy dan tidak berat. Susu kedelai mendapat skor 69.58, bagus tapi sedikit lebih berat, Santan encer hanya mendapat skor 55.75, dan Air + Minyak nabati + vanila hanya mendapat skor 52.22, keduanya kurang ideal untuk chiffon.

48. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Cookies"

Tabel 3. 97. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Cookies

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Susu kedelai	80.15	Sangat Direkomendasikan
2	Susu oat	78.96	Sangat Direkomendasikan
3	Air + vanila	73.64	Sangat Direkomendasikan
4	Santan encer	56.95	Direkomendasikan

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Cookies, mendapatkan hasil kalau Susu oat dengan skor 78.96 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur moist yang pas untuk cookies. Susu kedelai mendapat skor 80.15, sangat

direkomendasikan, dan Air + vanila mendapat skor 73.64, sementara Santan encer hanya mendapat skor 56.95 karena kurang renyah.

49. RULE: Alergi = "Dairy" AND Kue = "Souffle"

Tabel 3. 98. Hasil Perangkingan Akhir Dairy dan Souffle

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Susu kedelai	80.15	Sangat Direkomendasikan
2	Susu oat	70.05	Sangat Direkomendasikan
3	Santan encer	67.52	Direkomendasikan
4	Air kaldu nabati / Air + vanila	53.00	Direkomendasikan

Untuk alergi dairy dalam pembuatan Souffle, mendapatkan hasil kalau Susu kedelai yang paling unggul dengan skor 80.15 (Sangat Direkomendasikan), karena proteinnya membantu souffle mengembang dengan airy yang ringan. Susu oat mendapat skor 70.05, bagus, Santan encer mendapat skor 67.52, cukup baik, sementara Air kaldu nabati / Air + vanila hanya mendapat skor 53.00 karena kurang optimal untuk pengembangan souffle.

50. RULE: Alergi = "Cream" AND Kue = "Crème Caramel"

Tabel 3. 99. Hasil Perangkingan Akhir Cream dan Creme Caramel

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Santan kental	73.15	Sangat Direkomendasikan

2	Susu kedelai kental + minyak	70.91	Direkomendasikan
3	Coconut cream	68.68	Direkomendasikan
4	Susu oat full fat	67.86	Direkomendasikan

Untuk alergi cream dalam pembuatan Crème Caramel, mendapatkan hasil kalau Santan kental yang paling unggul dengan skor 73.15 (Direkomendasikan), karena lemak nabati di santan memberikan tekstur creamy yang kaya mirip whipping cream. Coconut cream mendapat skor 68.68, hampir setara, Susu kedelai kental + minyak mendapat skor 70.91, dan Susu oat full fat mendapat skor 67.86, semuanya cukup baik dan bisa jadi alternatif.

51. RULE: Alergi = "Cream" AND Kue = "Cheesecake"

Tabel 3. 100. Hasil Perangkingan Akhir Cream dan Cheesecake

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Vegan cream cheese	86.95	Sangat Direkomendasikan
2	Tofu sutra blender + lemon + gula	71.37	Sangat Direkomendasikan
3	Coconut cream padat + agar-agar	67.78	Direkomendasikan
4	Kacang mete rendam blender	48.94	Direkomendasikan

Untuk alergi cream dalam pembuatan Cheesecake, mendapatkan hasil kalau Vegan cream cheese yang paling unggul dengan skor 86.95 (Sangat Direkomendasikan), karena

teksturnya, rasanya, semuanya mirip cream cheese asli dengan sempurna. Tofu sutra blender + lemon + gula mendapat skor 71.37, bagus tapi kurang "cheesy", Coconut cream padat + agar-agar mendapat skor 67.78, cukup baik, sementara Kacang mete rendam blender hanya mendapat skor 48.94 (Kurang Direkomendasikan) karena teksturnya terlalu grainy.

52. RULE: Alergi = "Cream" AND Kue = "Brownies"

Tabel 3. 101. Hasil Perangkingan Akhir Cream dan Brownies

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Coconut cream	77.42	Sangat Direkomendasikan
2	Santan kental	75.00	Sangat Direkomendasikan
3	Susu kedelai + Minyak kelapa	64.07	Direkomendasikan

Untuk alergi cream dalam pembuatan Brownies, mendapatkan hasil kalau Coconut cream yang paling unggul dengan skor 77.42 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur moist fudgy yang sempurna untuk brownies. Santan kental mendapat skor 75.00, juga sangat baik, sementara Susu kedelai + Minyak kelapa hanya mendapat skor 64.07 karena kurang creamy.

53. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Marble cake"

Tabel 3. 102. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Marble Cake

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Minyak kelapa cair	86.95	Sangat Direkomendasikan
2	Minyak Sayur	86.25	Sangat Direkomendasikan
2	Margarin vegan	86.04	Sangat Direkomendasikan
3	Pure alpukat	50.42	Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Marble Cake, mendapatkan hasil kalau Minyak kelapa cair yang paling unggul dengan skor 86.95 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan kelembapan tanpa membuat kue berat. Minyak Sayur mendapat skor 86.25, dan Margarin vegan mendapat skor 86.04, tiga-tiganya juara dan bisa dipilih sesuai preferensi. Pure alpukat hanya mendapat skor 50.42 karena rasanya terlalu kuat dan mengubah karakter marble cake.

54. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Madeleine"

Tabel 3. 103. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Madeleine

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Margarin vegan cair	83.67	Sangat Direkomendasikan
2	Minyak kelapa refined	77.69	Sangat Direkomendasikan

3	Minyak Sayur	69.90	Sangat Direkomendasikan
4	Minyak zaitun ringan	68.53	Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Madeleine, mendapatkan hasil kalau Margarin vegan cair yang paling unggul dengan skor 83.67 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur renyah khas cangkang madeleine. Minyak kelapa refined mendapat skor 77.69, juga sangat baik, Minyak Sayur mendapat skor 69.90, dan Minyak zaitun ringan mendapat skor 68.53, keduanya cukup baik tapi kurang renyah.

55. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Brownies"

Tabel 3. 104. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Brownies

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Margarin vegan	82.71	Sangat Direkomendasikan
2	Minyak sayur netral	81.04	Sangat Direkomendasikan
3	Minyak kelapa + madu	64.65	Direkomendasikan
4	Pure alpukat	54.84	Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Brownies, mendapatkan hasil kalau Margarin vegan yang paling unggul dengan skor seri 81.53 (Sangat Direkomendasikan), Minyak sayur netral mendapat skor 81.04, karena memberikan tekstur fudgy yang sempurna untuk brownies. Minyak kelapa + madu mendapat skor 64.65, bagus tapi madu membuat brownies

terlalu chewy, sementara Pure alpukat hanya mendapat skor 54.84 karena kurang optimal.

56. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Churros"

Tabel 3. 105. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Churros

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Minyak kelapa	81.78	Sangat Direkomendasikan
2	Margarin vegan	80.41	Sangat Direkomendasikan
3	Minyak zaitun ringan	71.81	Sangat Direkomendasikan
4	Minyak sayur	68.69	Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Churros, mendapatkan hasil kalau Minyak kelapa yang paling unggul dengan skor 81.78 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan kerenyahan sempurna untuk churros. Margarin vegan mendapat skor 80.41, hampir setara, Minyak zaitun ringan mendapat skor 71.81, sangat baik, sementara Minyak sayur hanya mendapat skor 68.69 karena kurang renyah.

57. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Cookies"

Tabel 3. 106. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Cookies

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Minyak kelapa padat	84.57	Sangat Direkomendasikan
2	Margarin vegan block	83.67	Sangat Direkomendasikan

3	Minyak sayur + Sedikit maizena	64.73	Direkomendasikan
4	Pure alpukat / Applesauce	50.42	Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Cookies, mendapatkan hasil kalau Minyak kelapa padat yang paling unggul dengan skor 84.57 (Sangat Direkomendasikan), karena bisa dikocok seperti mentega sehingga cookies jadi renyah sempurna. Margarin vegan block mendapat skor 83.67, juga sangat baik, Minyak sayur + Sedikit maizena mendapat skor 64.73, cukup baik, sementara Pure alpukat / Applesauce hanya mendapat skor 50.42 karena kurang renyah.

58. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Choux"

Tabel 3. 107. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Choux

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Margarin vegan	74.62	Sangat Direkomendasikan
2	Minyak sayur + Lesitin	68.68	Direkomendasikan
3	Minyak kelapa refined	67.32	Sangat Direkomendasikan
4	Minyak zaitun	62.00	Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Choux, mendapatkan hasil kalau Margarin vegan yang paling unggul dengan skor 74.62 (Sangat Direkomendasikan), karena membantu pembentukan rongga udara khas choux. Minyak

kelapa refined mendapat skor 67.32, bagus, Minyak sayur + Lesitin mendapat skor 68.68, cukup baik, sementara Minyak zaitun hanya mendapat skor 63.15 karena rasanya terlalu kuat untuk choux.

59. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Donat"

Tabel 3. 108. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Donat

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Margarin vegan cair	76.25	Sangat Direkomendasikan
2	Minyak kelapa	75.91	Sangat Direkomendasikan
3	Minyak sayur netral	75.48	Sangat Direkomendasikan
4	Pure alpukat	44.85	Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Donat, mendapatkan hasil kalau Minyak kelapa yang paling unggul dengan skor 75.91 (Sangat Direkomendasikan), karena membuat donat empuk dan tidak berminyak saat digoreng. Margarin vegan cair mendapat skor 76.25 dan Minyak sayur netral mendapat skor 75.48, keduanya juga sangat baik. Pure alpukat hanya mendapat skor 44.85 (Kurang Direkomendasikan) karena membuat donat terlalu berat.

60. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Croissant"

Tabel 3. 109. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Croissant

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Margarin vegan block khusus pastry	84.44	Sangat Direkomendasikan
2	Minyak kelapa padat + Margarin vegan	62.46	Sangat Direkomendasikan
3	Shortening nabati	61.02	Direkomendasikan
4	Minyak zaitun padat (dingin)	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Croissant, mendapatkan hasil kalau Margarin vegan block khusus pastry yang paling unggul dengan skor 84.44 (Sangat Direkomendasikan), karena hanya margarin khusus pastry yang bisa memberikan lapisan sempurna untuk proses laminasi. Minyak kelapa padat + Margarin vegan mendapat skor 62.46, cukup baik, Shortening nabati mendapat skor 61.02, moderat, sementara Minyak zaitun padat (dingin) hanya mendapat skor 49.95 (Kurang Direkomendasikan) - jangan dipakai untuk croissant.

61. RULE: Alergi = "Butter" AND Kue = "Cannoli"

Tabel 3. 110. Hasil Perangkingan Akhir Butter dan Cannoli

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Minyak sayur/zaitun	76.89	Sangat Direkomendasikan
2	Shortening nabati	76.79	Sangat Direkomendasikan
3	Minyak kelapa padat	68.84	Sangat Direkomendasikan
4	Margarin vegan dingin	63.16	Sangat Direkomendasikan

Untuk alergi butter dalam pembuatan Cannoli, mendapatkan hasil kalau Minyak sayur/zaitun yang paling unggul dengan skor 76.89 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan kulit cannoli yang renyah sempurna. Shortening nabati mendapat skor 76.79, juga sangat baik, Margarin vegan dingin mendapat skor 63.16, dan Minyak kelapa padat mendapat skor 68.84, keduanya cukup baik.

62. RULE: Alergi = "Nuts" AND Kue = "Dacquoise"

Tabel 3. 111. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Dacquoise

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Biji Rambutan	87.41	Sangat Direkomendasikan
2	Tepung biji bunga matahari halus	83.21	Sangat Direkomendasikan

3	Tepung biji labu sangrai	68.53	Sangat Direkomendasikan
4	Tepung kelapa + minyak	53.94	Direkomendasikan
5	Oat GF halus + Sedikit minyak	54.88	Direkomendasikan

Untuk alergi nuts dalam pembuatan Dacquoise, mendapatkan hasil kalau Biji Rambutan yang paling unggul dengan skor 87.41 (Sangat Direkomendasikan), karena setelah disangrai dan dihaluskan, teksturnya mirip almond flour dan rasanya netral, alternatif eksotis yang keren banget! Tepung biji bunga matahari halus mendapat skor 83.21, juga sangat baik, Tepung biji labu sangrai mendapat skor 68.53, cukup baik, sementara Tepung kelapa + minyak (53.94) dan Oat GF halus + Sedikit minyak (52.33) kurang cocok untuk Dacquoise.

63. RULE: Alergi = "Nuts" AND Kue = "Macaron"

Tabel 3. 112. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Macaron

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Tepung biji bunga matahari sangrai (halus)	70.91	Sangat Direkomendasikan
2	Tepung biji labu	68.68	Direkomendasikan
3	Tepung oat GF + minyak	53.48	Direkomendasikan
4	Tepung kelapa + Tepung beras	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi nuts dalam pembuatan Macaron, mendapatkan hasil kalau Tepung biji bunga matahari sangrai (halus) yang paling unggul dengan skor 70.91 (Direkomendasikan), karena mampu memberikan tekstur renyah untuk kulit macaron. Tepung biji labu mendapat skor 68.68, hampir setara, sementara Tepung oat GF + minyak (53.48) dan Tepung kelapa + Tepung beras (49.95) kurang optimal karena membuat macaron kurang renyah.

64. RULE: Alergi = "Nuts" AND Kue = "Onde-onde"

Tabel 3. 113. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Onde-onde

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Kacang hijau giling + gula	87.41	Sangat Direkomendasikan
2	Kacang merah giling + gula	86.95	Sangat Direkomendasikan
3	Pasta kacang kedelai + gula	84.37	Sangat Direkomendasikan
4	Pasta wijen	51.32	Direkomendasikan

Untuk alergi nuts dalam pembuatan Onde-onde, mendapatkan hasil kalau Kacang hijau giling + gula yang paling unggul dengan skor 87.41 (Sangat Direkomendasikan), karena memang ini adalah isian tradisional onde-onde yang sudah terbukti enak dan sempurna. Pasta kacang kedelai + gula mendapat skor 86.95 dan Kacang merah giling + gula mendapat skor 84.37, keduanya juga sangat baik, sementara Pasta wijen hanya mendapat skor 51.32 karena rasanya kurang khas.

65. RULE: Alergi = "Nuts" AND Kue = "Carrot cake"

Tabel 3. 114. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Carrot Cake

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Biji bunga matahari sangrai	82.76	Sangat Direkomendasikan
2	Oat GF sangrai + kayu manis	75.62	Sangat Direkomendasikan
3	Biji labu cincang	71.03	Sangat Direkomendasikan
4	Kelapa parut sangrai	46.99	Direkomendasikan

Untuk alergi nuts dalam pembuatan Carrot Cake, mendapatkan hasil kalau Biji bunga matahari sangrai yang paling unggul dengan skor 82.76 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan topping renyah tanpa mengganggu rasa wortel. Biji labu cincang mendapat skor 71.03, juga sangat baik, Oat GF sangrai + kayu manis mendapat skor 75.62, cukup baik, sementara Kelapa parut sangrai hanya mendapat skor 46.99 karena rasanya terlalu kuat dan mengganggu rasa wortel.

66. RULE: Alergi = "Nuts" AND Kue = "Cookies"

Tabel 3. 115. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Cookies

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Biji bunga matahari sangrai	79.55	Sangat Direkomendasikan
2	Biji labu	76.43	Sangat Direkomendasikan

3	Dark chocolate chips (vegan)	58.87	Direkomendasikan
4	Oat GF + kayu manis	50.65	Direkomendasikan

Untuk alergi nuts dalam pembuatan Cookies, mendapatkan hasil kalau Biji bunga matahari sangrai yang paling unggul dengan skor 79.55 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur dan rasa yang sempurna sebagai mix-in cookies. Biji labu mendapat skor 76.43, juga sangat baik, Dark chocolate chips (vegan) mendapat skor 58.87, cukup baik, sementara Oat GF + kayu manis hanya mendapat skor 50.65.

67. RULE: Alergi = "Nuts" AND Kue = "Croissant"

Tabel 3. 116. Hasil Perangkingan Akhir Nuts dan Croissant

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Biji bunga matahari sangrai + tepung oat + vanila	69.69	Sangat Direkomendasikan
2	Oat GF + kayu manis + gula	60.32	Direkomendasikan
3	Pasta biji labu + gula	49.95	Direkomendasikan
4	Kelapa parut sangrai + gula	47.09	Direkomendasikan

Untuk alergi nuts dalam pembuatan Croissant, mendapatkan hasil kalau Biji bunga matahari sangrai + tepung oat + vanila yang paling unggul dengan skor 69.69 (Direkomendasikan), karena memberikan topping renyah dengan rasa yang pas. Oat GF + kayu manis + gula mendapat skor 60.32, cukup baik, sementara Pasta biji labu + gula (49.95) dan Kelapa parut sangrai + gula (47.09) kurang direkomendasikan karena kurang cocok untuk croissant.

68. RULE: Alergi = "Keju" AND Kue = "Cannoli"

Tabel 3. 117. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Cannoli

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Vegan ricotta (kacang mete/tahu)	67.78	Direkomendasikan
2	Ekstrak vanili	65.43	Direkomendasikan
3	Tofu sutra blender + gula + vanila	64.19	Direkomendasikan
4	Chocolate chips	51.32	Direkomendasikan

Untuk alergi keju dalam pembuatan Cannoli, mendapatkan hasil kalau Ekstrak vanili dengan skor 65.43 (Direkomendasikan), karena untuk filling manis cannoli, rasa vanila yang creamy lebih cocok daripada alternatif keju vegan. Vegan ricotta (kacang mete/tahu) mendapat skor 67.78, cukup baik, Tofu sutra blender + gula + vanila mendapat skor 64.19, moderat, sementara Chocolate chips hanya mendapat skor 51.32 karena kurang cocok sebagai pengganti ricotta.

69. RULE: Alergi = "Keju" AND Kue = "Croissant"

Tabel 3. 118. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Croissant

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Vegan cream cheese	77.16	Sangat Direkomendasikan
2	Nutritional yeast + minyak + air (gurih)	53.48	Direkomendasikan
3	Sutra + lemon + garam Santan kental + ragi nutrisi	51.32	Direkomendasikan
4	Sutra + lemon + garam	50.65	Direkomendasikan

Untuk alergi keju dalam pembuatan Croissant, mendapatkan hasil kalau Vegan cream cheese yang paling unggul dengan skor 77.16 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan rasa keju yang otentik untuk croissant. Nutritional yeast + minyak + air (gurih) mendapat skor 53.48, cukup baik, Sutra + lemon + garam mendapat skor 50.65, moderat, sementara Santan kental + ragi nutrisi hanya mendapat skor 51.32 (Direkomendasikan) karena rasanya aneh.

70. RULE: Alergi = "Keju" AND Kue = "Bakpao"

Tabel 3. 119. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Bakpao

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Vegan cream cheese + gula	77.69	Sangat Direkomendasikan

2	Pasta kacang putih + gula	60.32	Direkomendasikan
3	Coconut cream + maizena	58.58	Direkomendasikan
4	Tofu sutra + vanila	49.95	Direkomendasikan

Untuk alergi keju dalam pembuatan Bakpao, mendapatkan hasil kalau Vegan cream cheese + gula yang paling unggul dengan skor 77.69 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan isian manis creamy yang sempurna untuk bakpao. Pasta kacang putih + gula mendapat skor 60.32 dan Coconut cream + maizena mendapat skor 58.58, keduanya cukup baik, sementara Tofu sutra + vanila hanya mendapat skor 49.95 karena kurang creamy.

71. RULE: Alergi = "Keju" AND Kue = "Donat"

Tabel 3. 120. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Donat

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Vegan cream cheese + gula halus	86.71	Sangat Direkomendasikan
2	Coconut cream + vanila	70.95	Sangat Direkomendasikan
3	Susu nabati kental + maizena	66.33	Sangat Direkomendasikan

4	Tofu sutra + lemon + gula	52.79	Direkomendasikan
---	------------------------------	-------	------------------

Untuk alergi keju dalam pembuatan Donat, mendapatkan hasil kalau Vegan cream cheese + gula halus yang paling unggul dengan skor 86.71 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan frosting donat yang creamy dan lezat. Coconut cream + vanila mendapat skor 70.95, direkomendasikan, dan Susu nabati kental + maizena mendapat skor 66.33, sementara Tofu sutra + lemon + gula hanya mendapat skor 52.79 karena kurang creamy.

72. RULE: Alergi = "Keju" AND Kue = "Bolu kukus"

Tabel 3. 121. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Bolu Kukus

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Susu kedelai kental + ragi nutrisi	60.78	Direkomendasikan
2	Tofu sutra + vanila + Sedikit garam	51.32	Direkomendasikan
3	Vegan cream cheese	49.95	Direkomendasikan
4	Yeast + santan	42.69	Kurang Direkomendasikan

Untuk alergi keju dalam pembuatan Bolu Kukus, mendapatkan hasil kalau Susu kedelai kental + ragi nutrisi yang paling unggul dengan skor 60.78 (Direkomendasikan), karena memberikan rasa gurih yang pas untuk bolu kukus. Tofu sutra + vanila + Sedikit garam mendapat skor 51.32, cukup baik, Vegan

cream cheese mendapat skor 49.95, moderat, sementara Yeast + santan hanya mendapat skor 42.69 (Kurang Direkomendasikan) karena kombinasi ini membuat rasa aneh dan tekstur tidak karuan.

73. RULE: Alergi = "Keju" AND Kue = "Cheesecake"

Tabel 3. 122. Hasil Perangkingan Akhir Keju dan Cheesecake

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Vegan cream cheese	79.51	Sangat Direkomendasikan
2	Coconut cream padat + lemon + gula	56.90	Direkomendasikan
3	Sutra blender + lemon + agar-agar	52.22	Direkomendasikan
4	Kacang mete rendam blender	50.42	Direkomendasikan

Untuk alergi keju dalam pembuatan Cheesecake, mendapatkan hasil kalau Vegan cream cheese yang paling unggul dengan skor 79.51 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan tekstur creamy yang sempurna untuk cheesecake. Coconut cream padat + lemon + gula mendapat skor 56.90, cukup baik, Sutra blender + lemon + agar-agar mendapat skor 52.22, moderat, sementara Kacang mete rendam blender hanya mendapat skor 50.42 karena teksturnya kurang halus.

74. RULE: Alergi = "Wijen" AND Kue = "Onde-onde"

Tabel 3. 123. Hasil Perangkingan Akhir Wijen dan Onde-onde

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Biji labu cincang	68.68	Direkomendasikan
2	Biji bunga matahari	66.79	Direkomendasikan
3	Oat GF sangrai halus	62.45	Direkomendasikan
4	Kelapa parut sangrai	50.24	Direkomendasikan

Untuk alergi wijen dalam pembuatan Onde-onde, mendapatkan hasil kalau Biji labu cincang yang paling unggul dengan skor 68.68 (Direkomendasikan), karena memberikan coating renyah yang mirip wijen sangrai. Biji bunga matahari mendapat skor 66.79, hampir setara, Oat GF sangrai halus mendapat skor 62.45, cukup baik, sementara Kelapa parut sangrai hanya mendapat skor 50.24 karena kurang renyah.

75. RULE: Alergi = "Wijen" AND Kue = "Cookies"

Tabel 3. 124. Hasil Perangkingan Akhir Wijen dan Cookies

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Biji chia (opsional)	70.91	Sangat Direkomendasikan
2	GF + kayu manis	68.16	Sangat Direkomendasikan
3	Kelapa kering sangrai	66.33	Sangat Direkomendasikan

4	Biji bunga matahari sangrai	66.33	Direkomendasikan
---	-----------------------------	-------	------------------

Untuk alergi wijen dalam pembuatan Cookies, mendapatkan hasil kalau Kelapa kering sangrai dengan skor 66.33 (Direkomendasikan), karena memberikan aroma dan tekstur yang mirip wijen dengan harga yang lebih terjangkau. Biji chia (opsional) mendapat skor 70.91, GF + kayu manis dan Biji bunga matahari sangrai mendapat skor seri, yaitu 66.33 keduanya juga bagus.

76. RULE: Alergi = "Wijen" AND Kue = "Bakpao"

Tabel 3. 125. Hasil Perangkingan Akhir Wijen dan Bakpao

Peringkat	Bahan	Skor	Status
1	Biji bunga matahari	80.41	Sangat Direkomendasikan
2	Kelapa parut sangrai halus	69.43	Sangat Direkomendasikan
3	Oat GF halus	54.64	Direkomendasikan
4	Poppy	55.62	Direkomendasikan

Untuk alergi wijen dalam pembuatan Bakpao, mendapatkan hasil kalau Biji bunga matahari yang paling unggul dengan skor 80.41 (Sangat Direkomendasikan), karena memberikan topping renyah yang sempurna untuk bakpao. Kelapa parut sangrai halus mendapat skor 69.43, juga sangat baik, Oat GF halus mendapat skor 54.64, cukup baik, sementara Poppy (jika aman) hanya mendapat skor 55.62.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menerangkan tentang rangkaian hasil uji coba yang telah dilakukan serta berisi tentang pembahasan Sistem Pakar Penentuan Substitusi Bahan Kue bagi Penderita Alergi Menggunakan Metode *Forward Chaining* dan *Fuzzy Logic* Berbasis Web yang sudah dirancang dan dibangun. Uji coba memiliki fungsi untuk memeriksa sistem yang telah dibangun agar diharapkan dapat berfungsi semestinya, baik dari sisi kelengkapan fitur antarmuka maupun keakuratan metode dalam merekomendasikan bahan pengganti yang aman dan optimal.

4.1. Pengumpulan Data

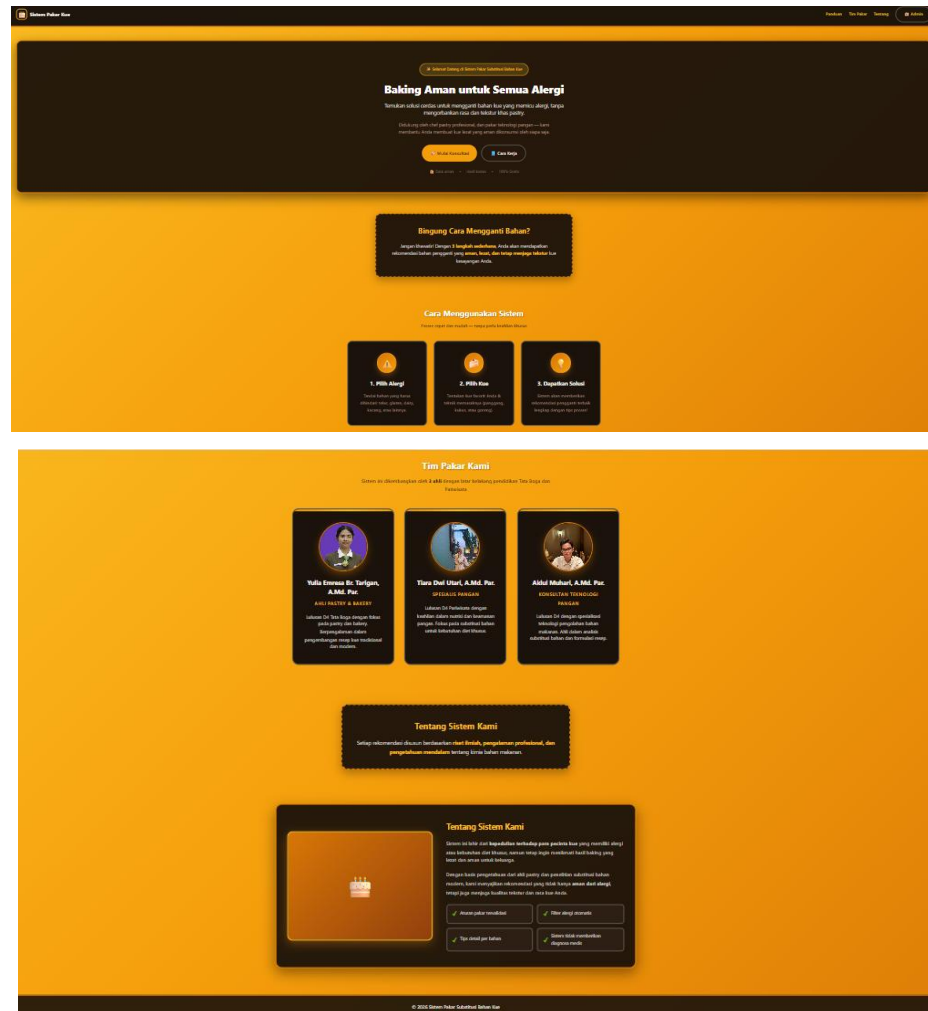
4.1.1. Data Basis Pengetahuan (*Knowledge Base*)

Data basis pengetahuan yang diimplementasikan ke dalam sistem merupakan hasil validasi pakar yang mencakup empat komponen utama: data alergi pangan (8 jenis alergi yang diadaptasi dari standar *Minnesota Department of Agriculture*), data jenis kue (26 jenis produk *baking* berdasarkan teknik pengolahan), data bahan pengganti (69 alternatif substitusi yang dipetakan ke dalam 11 fungsi kimiawi), dan aturan *Forward Chaining*. Keempat komponen ini diintegrasikan ke dalam bentuk himpunan aturan *IF-THEN* yang berfungsi menyaring kombinasi input alergi dan jenis kue, sehingga menghasilkan daftar kandidat bahan pengganti yang terjamin keamanannya sebelum dievaluasi lebih lanjut menggunakan metode *Fuzzy Mamdani* dan *AHP*.

4.2. Implementasi

4.2.1. Implementasi Sistem

a. Halaman Awal



Gambar 4. 1. Halaman Awal

Halaman awal merupakan antarmuka pertama yang ditampilkan ketika pengguna mengakses sistem. Halaman ini berisi informasi singkat mengenai tujuan sistem, fitur utama, serta tombol navigasi untuk memulai proses konsultasi substitusi bahan kue.

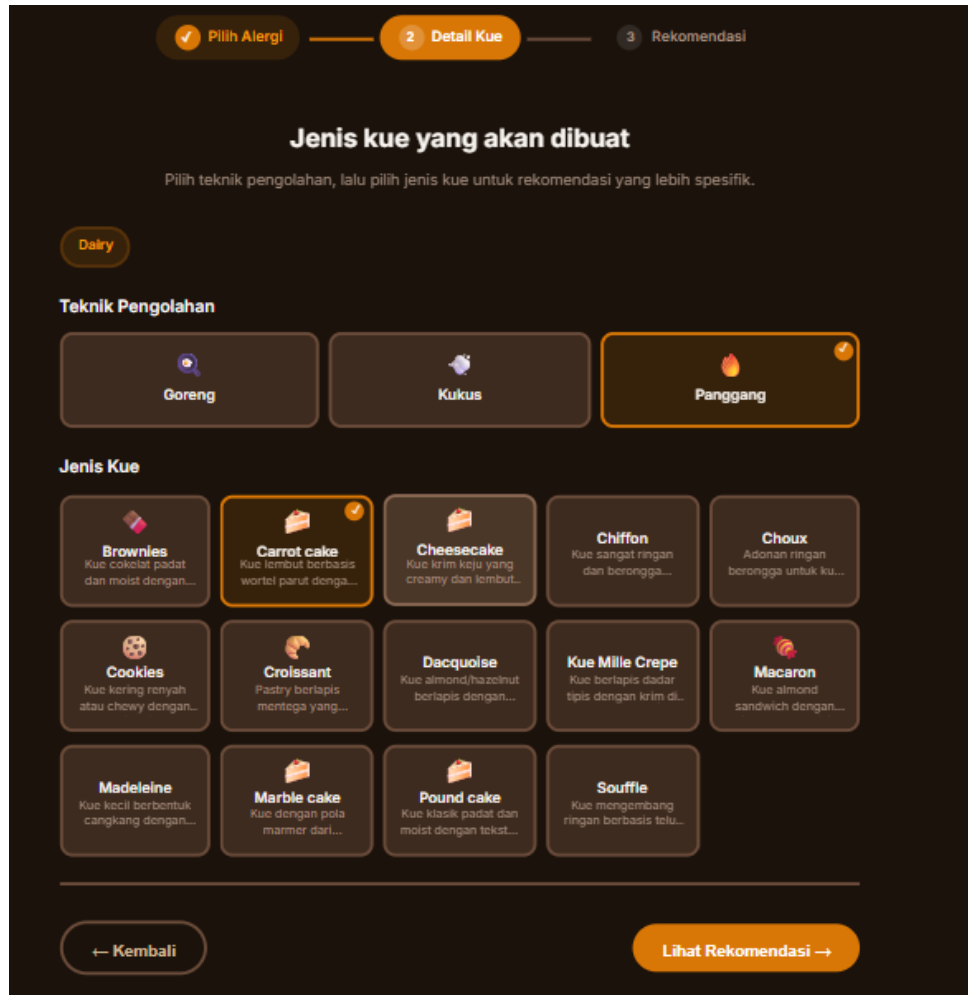
b. Halaman Pilih Alergi



Gambar 4. 2. Halaman Pilih Alergi

Pada halaman ini, pengguna diminta untuk memilih jenis alergi pangan yang dimiliki (seperti telur, gluten, susu, kacang, dll). Data yang dipilih akan menjadi input utama bagi mesin inferensi *Forward Chaining* untuk menyaring bahan pengganti yang aman.

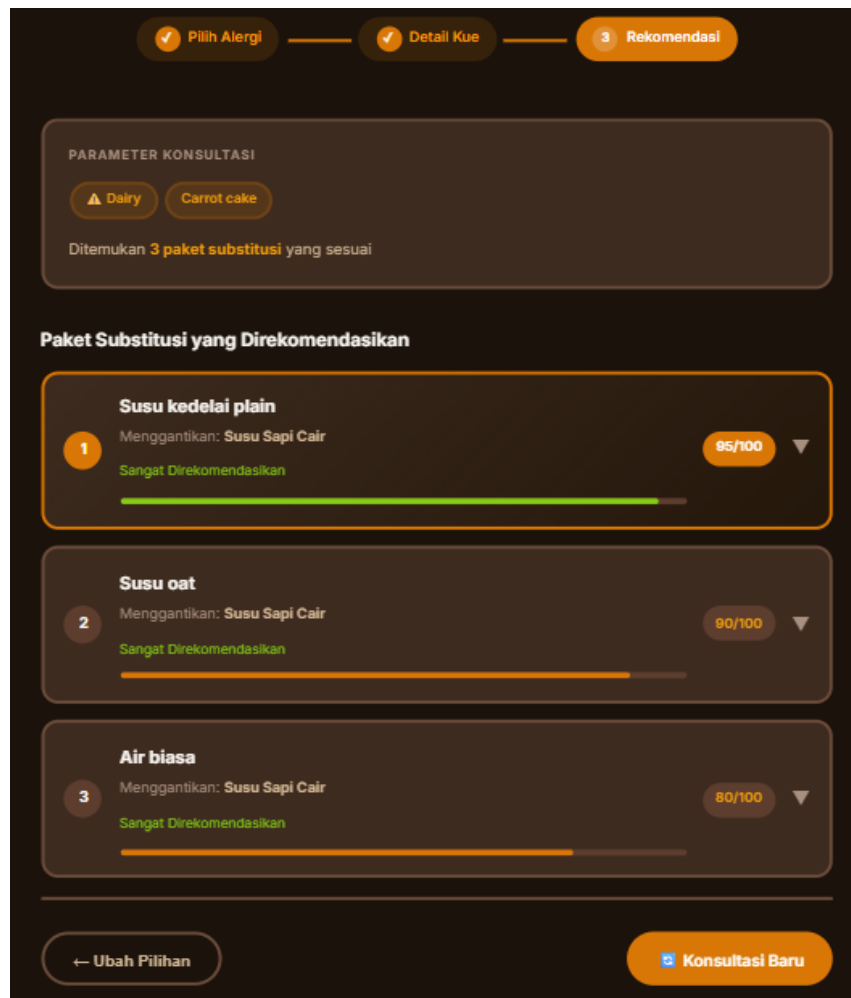
c. Pilih Jenis Kue



Gambar 4. 3. Pilih Jenis Kue

Setelah memilih alergi, pengguna melanjutkan dengan memilih jenis kue yang ingin dibuat (misalnya *Brownies*, *Croissant*, *Bolu Kukus*). Kombinasi input alergi dan jenis kue ini akan diteruskan ke sistem untuk diproses menggunakan metode *Fuzzy Mamdani* dan *AHP*.

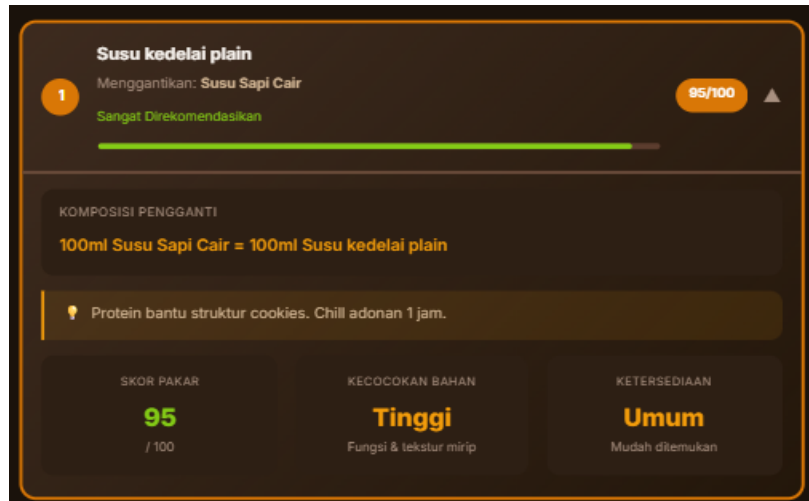
d. Halaman Hasil Rekomendasi



Gambar 4. 4. Halaman Hasil Rekomendasi

Halaman ini menampilkan daftar bahan pengganti yang telah diurutkan berdasarkan skor akhir (*ranking*). Sistem menampilkan beberapa alternatif bahan substitusi yang aman dan layak, lengkap dengan status rekomendasi (Sangat Direkomendasikan, Direkomendasikan, atau Cukup Direkomendasikan).

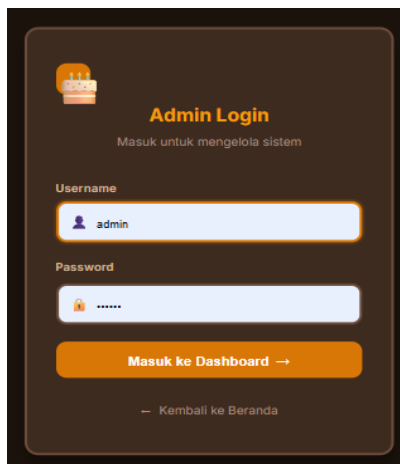
e. Halaman Detail Rekomendasi



Gambar 4. 5. Halaman Detail Rekomendasi

Pada halaman detail, pengguna dapat melihat informasi lebih lengkap mengenai bahan pengganti peringkat pertama, meliputi rasio takaran otomatis, fungsi bahan, serta tips teknis pengolahan agar hasil kue tetap optimal.

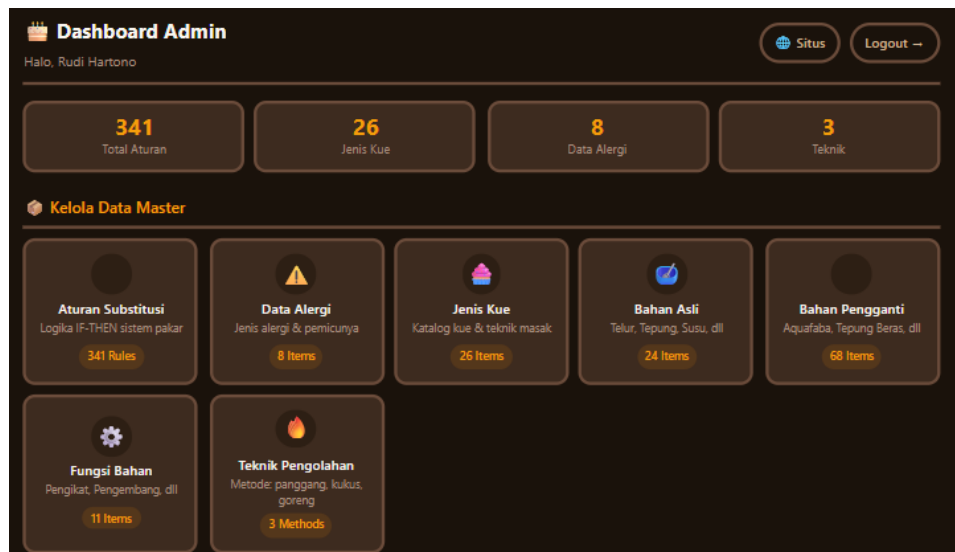
f. Login Admin



Gambar 4. 6. Login Admin

Halaman ini merupakan gerbang autentikasi bagi admin untuk masuk ke dalam dashboard pengelolaan sistem. Admin harus memasukkan *username* dan *password* yang telah terdaftar untuk dapat mengelola basis pengetahuan.

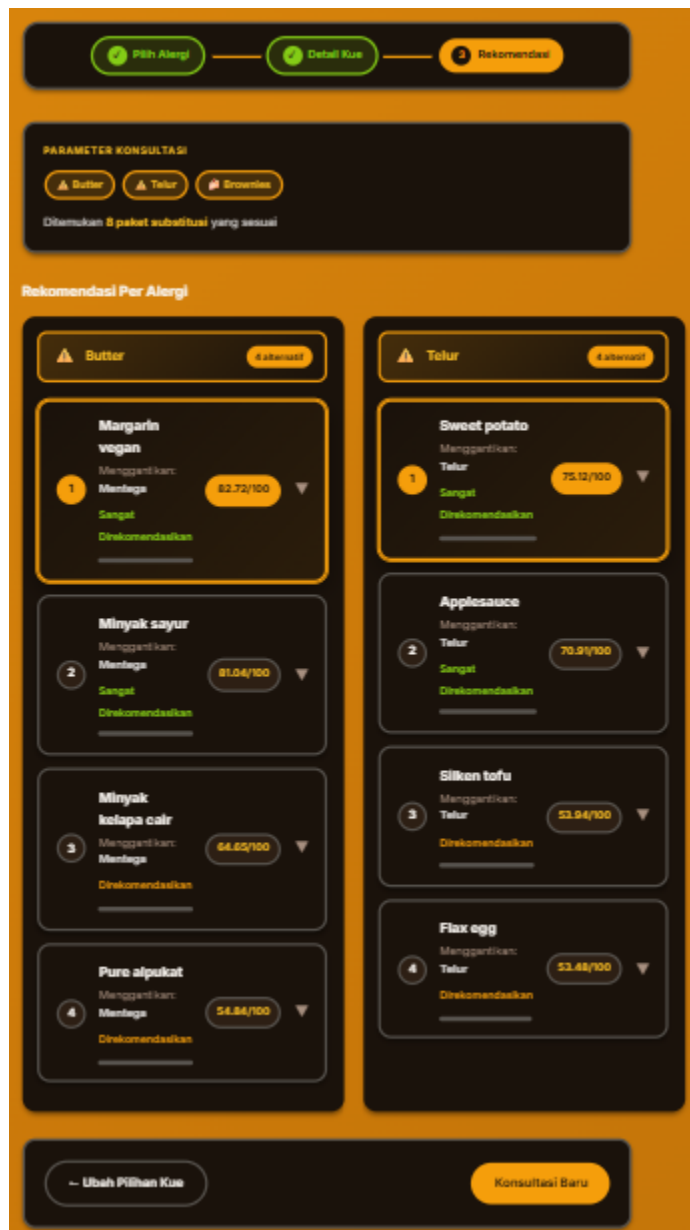
g. Dashboard Admin



Gambar 4. 7. Dashboard Admin

Dashboard admin merupakan pusat kendali sistem yang memungkinkan admin untuk mengelola seluruh data master (data alergi, jenis kue, bahan *baking*, fungsi bahan, bahan pengganti), mengatur aturan *Forward Chaining*, serta memantau riwayat konsultasi pengguna.

h. Tampilan Hasil Rekomendasi Multi-Alergi



Gambar 4. 8. Hasil Rekomendasi Multi-Alergi

Gambar di atas menampilkan antarmuka halaman hasil rekomendasi yang dirancang khusus untuk mengakomodasi pengguna dengan kondisi multi-alergi.

Secara logika pemrosesan, sistem akan melakukan inferensi forward chaining secara independen untuk setiap alergen yang dipilih. Hasil rekomendasi kemudian ditampilkan dalam bentuk segmen terpisah berdasarkan kategori alerginya. Hal ini bertujuan untuk:

1. Mencegah kebingungan pengguna dalam membedakan bahan pengganti untuk alergen A vs alergen B.
2. Memudahkan pengguna mengidentifikasi bahan pengganti mana yang aman untuk kedua alergennya (irisan himpunan) dan mana yang hanya aman untuk salah satunya.
3. Memberikan transparansi alasan substitusi bagi setiap bahan yang direkomendasikan.

Pada bagian atas, terdapat ringkasan parameter konsultasi yang menunjukkan bahwa pengguna telah memilih kombinasi alergi Butter dan Telur untuk jenis kue Brownies, dengan sistem berhasil menemukan total 8 paket substitusi yang sesuai. Fitur utama dari tampilan ini adalah penyajian 'Rekomendasi Per Alergi' menggunakan layout dua kolom terpisah. Kolom sebelah kiri khusus menampilkan alternatif pengganti Butter (seperti Margarin vegan dan Minyak sayur), sedangkan kolom sebelah kanan menyajikan opsi pengganti Telur (seperti Sweet potato dan Applesauce). Pemisahan visual ini bertujuan agar pengguna dapat dengan jelas membedakan bahan substitusi berdasarkan jenis alerginya masing-masing, sehingga memudahkan identifikasi dan mencegah kesalahan penggunaan bahan saat proses baking.

4.2.2. Implementasi Metode Pengambilan Keputusan

Pengambilan keputusan dalam sistem ini diimplementasikan melalui dua tahap yang berurutan. Pertama, Forward Chaining bekerja menyaring kandidat bahan substitusi dengan mencocokkan fakta awal

pengguna (jenis alergi dan jenis kue) terhadap aturan IF-THEN pada basis pengetahuan; aturan yang terpenuhi menghasilkan fakta baru berupa daftar kandidat bahan yang aman dan bebas alergen. Kedua, logika fuzzy menilai kualitas setiap kandidat dengan mengonversi nilai penilaian pakar pada tiap variabel melalui fuzzifikasi, mengolahnya dengan inferensi fuzzy, lalu mengembalikannya menjadi skor tegas (crisp) melalui defuzzifikasi, yang kemudian dipadukan dengan bobot AHP untuk menghasilkan peringkat rekomendasi akhir. Dengan kombinasi ini, keputusan sistem tidak hanya logis dan aman dari alergen, tetapi juga mempertimbangkan fungsi bahan, kecocokan tekstur, kecocokan rasa, dan ketersediaan bahan substitusi.

Untuk menentukan bobot prioritas kriteria pada metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan memvalidasi parameter himpunan *Fuzzy Mamdani*, penelitian ini melibatkan tiga orang pakar berlatar belakang Ahli Madya (A.Md.) Pariwisata yang memiliki kompetensi di bidang *pastry* dan *bakery*. Ketiga pakar tersebut adalah:

1. Yulia Emresa Br Tarigan, A.Md. Par.
2. Aklul Muhari, A.Md. Par.
3. Tiara Dwi Utari, A.Md. Par.

Data yang diperoleh dari para pakar berupa lembar kuesioner perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) untuk empat kriteria evaluasi (Fungsi Bahan, Tekstur, Rasa, dan Ketersediaan). Penilaian dari ketiga pakar kemudian diagregasikan menggunakan metode *geometric mean* untuk menghasilkan bobot prioritas final (Fungsi: 55,25%, Tekstur: 26,33%, Rasa: 10,83%, Ketersediaan: 7,63%) dengan nilai *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,036 (konsisten).

Tabel 4. 1. Hasil akhir Bahan pengganti

No	Alergi	Jenis Kue	Fungsi Bahannya	Bahan Pengganti (Urutan Ranking)
001	Telur	Crème Caramel	Pengikat, Pembentuk tekstur	1. Aquafaba + agar-agar 2. Agar-agar plain + maizena 3. Silken tofu + maizena
002		Bolu kukus	Pengembang, Pengikat, Volume	1. Flax egg + baking powder 2. Aquafaba 3. Applesauce + cuka apel
003		Kue Putu Ayu	Pengembang, Pelembut	1. Aquafaba + baking soda 2. Pure pisang + cuka 3. Yogurt nabati + soda kue
004		Marble cake	Pengikat, Pengembang, Emulsi	1. Aquafaba + cream of tartar 2. Silken tofu blender 3. Chia egg + cuka apel
005		Madeleine	Pengembang, Struktur	1. Aquafaba + cream of tartar 2. Pure pisang + cuka 3. Yogurt nabati + baking soda
006		Brownies	Pengikat, Kelembapan, Emulsi	1. Sweet potato 2. Applesauce 3. Silken tofu blender 4. Flax egg
007		Choux	Pengembang, Emulsi (pembentuk rongga)	1. Aquafaba + Baking Powder

				2. Yogurt nabati + soda kue
008		Dacquoise	Pengembang, Struktur	1. Aquafaba
009		Churros	Pengikat, Emulsi, Struktur	1. Aquafaba + Baking Powder
010		Cannoli	Pengikat (kulit), Pengikat (isian)	1. Aquafaba (Kulit) 2. Vegan Yoghurt (Isian)
011		Croissant	Pengikat, Pelembut	1. Aquafaba 2. Susu nabati + minyak + sirup maple
012		Donat	Pengikat, Pengembang, Pelembut	1. Aquafaba 2. Flax egg 3. Pure pisang
013		Macaron	Pengembang, Struktur	1. Commercial meringue powder 2. Aquafaba kental + cream of tartar
014		Bika Ambon	Pengikat, Pengembang (Sarang)	1. Aquafaba + soda kue + cuka 2. Silken tofu + baking powder
015		Kue Mille crepe	Pengikat, Kelembapan	1. Aquafaba + susu nabati 2. Chia egg + air
016		Pound cake	Pengikat, Pengembang, Pelembut	1. Aquafaba + baking powder 2. Yogurt nabati + soda kue 3. Applesauce +

				minyak 4. Silken tofu
017		Souffle	Pengembang, Struktur utama	1. Aquafaba kental + cream of tartar 2. Chickpea flour + air + baking powder 3. Commercial meringue powder
018		Cookies	Pengikat, Pengembang, Pelembut	1. Aquafaba 2. Flax egg 3. Chia egg 4. Applesauce
019		Chiffon	Pengembang (meringue), Pengikat/Emulsi	1. Aquafaba kental + Silken tofu 2. Commercial egg replacer 3. Yogurt nabati + aquafaba
020		Carrot cake	Pengikat, Kelembapan, Pelembut	1. Aquafaba 2. Pure pisang 3. Flax egg
021		Bakpao	Struktur, Elastisitas, Volume	1. Tepung Beras + Tapioka + Xanthan Gum
022	Gluten	Apem	Struktur, Kelembapan	1. Tepung ketan + beras 2. Mocaf + Sagu 3. Tepung beras + Tepung Tapioka
023		Bolu Kukus	Struktur, Volume, Pengembang	1. Tepung beras + Maizena + Baking Powder

				2. Mocaf + Xanthan gum
024		Kue Putu Ayu	Struktur, Pengikat	1. Tepung oat + beras + maizena + Xanthan 2. Mocaf + Pati kentang
025		Marble Cake	Struktur, Volume, Emulsi	1. Tepung oat + beras + maizena + Xanthan 2. Mocaf + Pati kentang
026		Madeleine	Struktur, Volume, Pengembang	1. Tepung beras + Pati jagung 2. Tepung Beras dan Oat
027		Brownies	Struktur, Pengikat, Kelembapan	1. Tepung Oat 2. Tepung almond + Maizena 3. Tepung beras + Tapioka 4. Sorgum + Xanthan
028		Choux	Struktur, Elastisitas	1. Tepung beras + Tapioka + Xanthan 2. Mocaf + Guar gum
029		Churros	Struktur, Volume, Kerenyahan	1. Tepung beras + Tapioka + Xanthan 2. Mocaf + Psyllium
030		Kue cucur	Struktur, Kerenyahan	1. Tepung beras + Tapioka 2. Mocaf + kapur sirih
031		Gandasturi	Struktur, Kerenyahan	1. Tepung tapioka + tepung beras

				2. Tepung beras + maizena
032		Cannoli	Struktur, Kerenyahan	1. Tepung beras + tapioca + maizena + sorgum 2. Mocaf + Psyllium
033		Croissant	Struktur, Elastisitas	1. Sorgum + Pati kentang + Guar gum 2. Tepung beras + tapioca + maizena + Xanthan Gum
034		Donat	Struktur, Elastisitas	1. Tepung beras + Sorgum + Ragi ekstra 2. Mocaf + Tapioka + Xanthan
035		Pound cake	Struktur, Volume	1. Tepung beras + Oat + Pati kentang 2. Mocaf + Maizena
036		Carrot cake	Struktur, Pengikat	1. GF all-purpose blend 2. Mocaf + Pati jagung 3. Tepung oat + Beras + Xanthan
037		Souffle	Struktur, Elastisitas	1. Tepung beras + Maizena + BP 2. Oat flour GF + Guar gum
038		Chiffon	Struktur, Elastisitas	1. Tepung beras halus + Tapioka + Guar 2. Mocaf + Pati kentang
039		Cookies	Struktur	1. Oat flour GF + Almond flour

				2. Tepung sorgum + Maizena 3. Tepung beras + Tapioka + Xanthan
040	Dairy	Bakpao	Kelembapan, Aktivasi ragi, Rasa	1. Air + minyak + vanila 2. Susu oat 3. Susu kedelai
041		Crème Caramel	Kelembapan, Rasa, Pelembut	1. Susu oat 2. Susu kedelai plain 3. Air kelapa + vanila 4. Santan encer
042		Choux	Kelembapan, Emulsi	1. Susu kedelai 2. Air biasa 3. Susu oat 4. Santan encer
043		Churros	Kelembapan, Rasa	1. Air biasa 2. Susu almond 3. Susu kedelai 4. Santan encer
044		Macaron	Kelembapan & Kekayaan rasa	1. Coconut cream 2. Susu kedelai (filling) 3. Susu oat 4. Air + vanila (filling)
045		Mille crepe	Kelembapan, Struktur crepe	1. Susu oat 2. Susu kedelai 3. Santan encer 4. Air + Minyak nabati
046		Pound cake	Kelembapan, Pelembut, Rasa	1. Susu kedelai + Minyak 2. Santan

				3. Susu oat 4. Yogurt nabati encer
047		Chiffon	Kelembapan, Emulsi, Aktivasi ragi	1. Susu oat 2. Susu kedelai 3. Santan encer 4. Air + Minyak nabati + vanila
048		Cookies	Kelembapan, Rasa, Pelembut	1. Susu kedelai 2. Susu oat 3. Air + vanila 4. Santan encer
049		Souffle	Kelembapan, Rasa, Pelembut	1. Susu kedelai 2. Susu oat 3. Santan encer 4. Air kaldu nabati / Air + vanila
050		Crème Caramel	Kelembapan, Kekayaan rasa, Pelembut	1. Santan kental 2. Susu kedelai kental + minyak 3. Coconut cream 4. Susu oat full fat
051	Cream	Cheesecake	Struktur, Kelembapan, Rasa	1. Vegan cream cheese 2. Tofu sutra blender + lemon + gula 3. Coconut cream padat + agar-agar 4. Kacang mete rendam blender
052		Brownies	Kelembapan, Pelembut, Emulsi	1. Coconut cream 2. Santan kental 3. Susu kedelai + Minyak kelapa

053	Butter	Marble cake	Pelembut, Rasa, Emulsi	1. Minyak kelapa cair 2. Minyak Sayur 3. Margarin vegan 4. Pure alpukat
054		Madeleine	Pelembut, Rasa khas, Struktur	1. Margarin vegan cair 2. Minyak kelapa refined 3. Minyak Sayur 4. Minyak zaitun ringan
055		Brownies	Pelembut, Rasa, Kelembapan	1. Margarin vegan 2. Minyak sayur netral 3. Minyak kelapa + madu 4. Pure alpukat
056		Churros	Pelembut, Rasa, Kelembapan	1. Minyak kelapa 2. Margarin vegan 3. Minyak zaitun ringan 4. Minyak sayur
057		Cookies	Pelembut, Rasa, Struktur, Kerenyahan	1. Minyak kelapa padat 2. Margarin vegan block 3. Minyak sayur + Sedikit maizena 4. Pure alpukat / Applesauce
058		Choux	Pelembut, Emulsi, Kelembapan	1. Margarin vegan 2. Minyak sayur + Lesitin 3. Minyak kelapa refined 4. Minyak zaitun

059		Donat	Pelembut, Kelembapan, Rasa	1. Margarin vegan cair 2. Minyak kelapa 3. Minyak sayur netral 4. Pure alpukat
060		Croissant	Struktur lapisan, rasa	1. Margarin vegan block khusus pastry 2. Minyak kelapa padat + Margarin vegan 3. Shortening nabati 4. Minyak zaitun padat (dingin)
061		Cannoli	Pelembut, Kelembapan, Rasa (kulit)	1. Minyak sayur/zaitun 2. Shortening nabati 3. Minyak kelapa padat 4. Margarin vegan dingin
062	Nuts	Dacquoise	Struktur, Rasa	1. Biji Rambutan 2. Tepung biji bunga matahari halus 3. Tepung biji labu sangrai 4. Tepung kelapa + minyak 5. Oat GF halus + Sedikit minyak
063		Macaron	Struktur, Rasa	1. Tepung biji bunga matahari sangrai (halus) 2. Tepung biji labu 3. Tepung oat GF + minyak 4. Tepung kelapa + Tepung beras

064		Onde-onde	Rasa, Tekstur isian	1. Kacang hijau giling + gula 2. Kacang merah giling + gula 3. Pasta kacang kedelai + gula 4. Pasta wijen
065		Carrot cake	Topping, Tekstur	1. Biji bunga matahari sangrai 2. Oat GF sangrai + kayu manis 3. Biji labu cincang 4. Kelapa parut sangrai
066		Cookies	Topping, Mix-in, Rasa	1. Biji bunga matahari sangrai 2. Biji labu 3. Dark chocolate chips (vegan) 4. Oat GF + kayu manis
067		Croissant	Rasa, Tekstur	1. Biji bunga matahari sangrai + tepung oat + vanila 2. Oat GF + kayu manis + gula 3. Pasta biji labu + gula 4. Kelapa parut sangrai + gula
068	Keju	Cannoli	Struktur, Rasa krim isian, Kelembapan	1. Vegan ricotta (kacang mete/tahu) 2. Ekstrak vanili 3. Tofu sutra blender + gula + vanila 4. Chocolate chips

069		Croissant	Rasa, Kelembapan (isian)	1. Vegan cream cheese 2. Nutritional yeast + minyak + air (gurih) 3. Santan kental + ragi nutrisi 4. Sutra + lemon + garam
070		Bakpao	Rasa, Kelembapan (isian)	1. Vegan cream cheese + gula 2. Pasta kacang putih + gula 3. Coconut cream + maizena 4. Tofu sutra + vanila
071		Donat	Rasa, Kelembapan	1. Vegan cream cheese + gula halus 2. Coconut cream + vanila 3. Susu nabati kental + maizena 4. Tofu sutra + lemon + gula
072		Bolu kukus	Rasa, Kelembapan	1. Susu kedelai kental + ragi nutrisi 2. Tofu sutra + vanila + Sedikit garam 3. Vegan cream cheese 4. Yeast + santan
073		Cheesecake	Struktur utama, Rasa, Kelembapan, Pelembut	1. Vegan cream cheese 2. Coconut cream padat + lemon + gula 3. Sutra blender + lemon + agar-agar

				4. Kacang mete rendam blender
074	Wijen	Onde-onde	Topping, Aroma, Tekstur renyah	1. Biji labu cincang 2. Biji bunga matahari 3. Oat GF sangrai halus 4. Kelapa parut sangrai
075		Cookies	Topping, Aroma, Tekstur	1. Biji chia (opsional) 2. GF + kayu manis 3. Kelapa kering sangrai 4. Biji bunga matahari sangrai
076		Bakpao	Topping, Aroma	1. Biji bunga matahari 2. Kelapa parut sangrai halus 3. Poppy (jika aman) 4. Oat GF halus

4.3. Data Skenario Pengujian

Data skenario uji disusun untuk membandingkan output sistem dengan rekomendasi konsensus pakar (Gold Standard). Skenario uji terdiri dari berbagai kombinasi input jenis alergi dan jenis kue (misalnya: kasus alergi telur untuk kue Creme Caramel, kasus alergi gluten untuk Brownies, kasus alergi susu untuk Choux, dan lain-lain).

Setiap skenario kasus diinputkan ke dalam sistem, kemudian hasil bahan pengganti peringkat pertama yang diproduksi oleh sistem akan dicocokkan dengan rekomendasi mayoritas dari ketiga pakar menggunakan metode Majority Voting. Data perbandingan ini selanjutnya digunakan untuk menghitung persentase tingkat akurasi sistem dalam merekomendasikan substitusi bahan kue.

Berdasarkan batasan masalah yang telah ditetapkan, skenario pengujian pada penelitian ini dibagi menjadi dua jenis, yaitu pengujian fungsional

menggunakan metode Black Box Testing dan pengujian akurasi metode untuk memvalidasi logika Forward Chaining, Fuzzy Mamdani, dan AHP.

4.3.1. Skenario Pengujian Akurasi Metode

Pengujian akurasi dilakukan untuk mengukur sejauh mana keandalan sistem dalam merekomendasikan bahan pengganti kue yang aman dan optimal. Pengujian ini memvalidasi integrasi metode *Forward Chaining* (sebagai penyaring alergen) serta *Fuzzy Mamdani* dan *AHP* (sebagai evaluator kelayakan dan pembobotan).

Skenario pengujian akurasi dilaksanakan melalui tahapan berikut:

- a. Penentuan Kasus Uji: Menyusun sejumlah skenario kasus uji yang berupa kombinasi acak antara jenis alergi (misal: telur, gluten, susu, dll) dan jenis produk *baking* (misal: *Brownies*, *Donat*, *Croissant*, dll).
- b. Penetapan *Gold Standard*: Setiap kasus uji yang sama juga diberikan kepada tiga orang pakar (berlatar belakang A.Md. Par) untuk dimintai rekomendasi bahan pengganti terbaiknya. Rekomendasi final dari pakar ditetapkan sebagai *Gold Standard* (acuan kebenaran mutlak) menggunakan metode *Majority Voting* (kesepakatan mayoritas).
- c. Eksekusi Sistem: Kasus uji yang sama diinputkan ke dalam sistem pakar berbasis web. Sistem akan memproses data tersebut dan menghasilkan daftar bahan pengganti yang diurutkan berdasarkan skor akhir (*ranking*).
- d. Komparasi dan Perhitungan: Bahan pengganti yang berada di peringkat pertama dari output sistem akan dicocokkan dengan rekomendasi *Gold Standard* dari pakar. Tingkat akurasi sistem kemudian dihitung menggunakan rumus persentase kesesuaian:

$$Akurasi = \frac{Jumlah\ Kasus\ Sesuai}{Total\ Kasus\ Uji} \times 100\%$$

Keterangan:

- a. Kasus Sesuai: Kondisi di mana rekomendasi peringkat pertama dari sistem sama persis dengan rekomendasi konsensus pakar.
- b. Total Kasus Uji: Jumlah keseluruhan skenario kasus yang berhasil diuji dan memiliki konsensus pakar.

Melalui kedua skenario pengujian di atas, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang komprehensif mengenai kualitas sistem, baik dari segi keandalan operasional antarmuka maupun keakuratan logika inferensi dalam membantu penderita alergi menentukan substitusi bahan kue yang tepat.

Tabel 4. 2. Rekapitulasi Penentuan Gold Standard dan Pengujian Akurasi Sistem

No	Kasus Uji (Alergi + Jenis Kue)	Pakar 1 (Yulia)	Pakar 2 (Aklul)	Pakar 3 (Tiara)	Gold Standard	Output Sistem (Rank 1)	Status
1	Telur + Crème Caramel	Aquafaba +agar- agar	Aquafaba +agar- agar	Aquafaba +agar- agar	Aquafaba +agar- agar (3/3)	Aquafaba +agar- agar	Sesuai
2	Telur + Bolu Kukus	Aquafaba	Aquafaba	Flax egg + baking powder	Flax egg + baking powder (1/3)	Flax egg + baking powder	Tidak Sesuai
3	Telur + Kue Putu Ayu	Aquafaba + baking soda	Aquafaba + baking soda	Aquafaba + baking soda	Aquafaba + baking soda (3/3)	Aquafaba + baking soda	Sesuai
4	Telur + Marble Cake	Aquafaba + cream of tartar	Aquafaba + cream of tartar	Silken tofu blender	Aquafaba + cream of tartar (2/3)	Aquafaba + cream of tartar	Sesuai
5	Telur + Madeleine	Aquafaba + cream of tartar	Aquafaba + cream of tartar	Aquafaba +	Aquafaba + cream	Aquafaba + cream of tartar	Sesuai

				cream of tartar	of tartar (3/3)		
6	Telur + Brownies	Sweet potato	Sweet potato	Sweet potato	Sweet potato (3/3)	Sweet potato	Sesuai
7	Telur + Choux	Aquafaba + baking powder	Aquafaba + baking powder	Yogurt nabati + soda kue	Aquafaba + baking powder (2/3)	Aquafaba + baking powder	Sesuai
8	Telur + Dacquoise	Aquafaba	Aquafaba	Aquafaba	Aquafaba (3/3)	Aquafaba	Sesuai
9	Telur + Churros	Aquafaba + baking powder	Aquafaba + baking powder	Aquafaba + baking powder	Aquafaba + baking powder (3/3)	Aquafaba + baking powder	Sesuai
10	Telur + Cannoli	Aquafaba (Kulit)	Aquafaba (Kulit)	Vegan Yoghurt (Isian)	Aquafaba (Kulit) (2/3)	Aquafaba (Kulit)	Sesuai
11	Telur + Croissant	Aquafaba	Aquafaba	Susu nabati + minyak + sirup maple	Aquafaba (2/3)	Aquafaba	Sesuai
12	Telur + Donat	Aquafaba	Aquafaba	Pure pisang	Aquafaba (2/3)	Aquafaba	Sesuai
13	Telur + Macaron	Commercial meringue powder	Commercial meringue powder	Aquafaba kental + cream of tartar	Commercial meringue powder (2/3)	Commercial meringue powder	Sesuai
14	Telur + Bika Ambon	Aquafaba + soda kue + cuka	Aquafaba + soda kue + cuka	Silken tofu + baking powder	Aquafaba + soda kue + cuka (2/3)	Aquafaba + soda kue + cuka	Sesuai

15	Telur + Mille Crepe	Aquafaba + susu nabati	Aquafaba + susu nabati	Chia egg + air	Aquafaba + susu nabati (2/3)	Aquafaba + susu nabati	Sesuai
16	Telur + Pound Cake	Aquafaba + baking powder	Aquafaba + baking powder	Applesauce + minyak	Aquafaba + baking powder (2/3)	Aquafaba + baking powder	Sesuai
17	Gluten + Bakpao	Tepung Beras + Tapioka + Xanthan	Tepung Beras + Tapioka + Xanthan	Mocaf + Sagu	Tepung Beras + Tapioka + Xanthan (2/3)	Tepung Beras + Tapioka + Xanthan	Sesuai
18	Gluten + Brownies	Tepung Oat	Tepung beras + Tapioka	Tepung almond + Maizena	Dibuang (Deadlock 1-1-1)	Tepung Oat	– (Tidak Dihitung)
19	Gluten + Donat	Mocaf + Tapioka + Xanthan	Mocaf + Tapioka + Xanthan	Tepung beras + Sorgum + Ragi	Mocaf + Tapioka + Xanthan (2/3)	Mocaf + Tapioka + Xanthan	Sesuai
20	Susu (Dairy) + Crème Caramel	Susu kedelai plain	Susu oat	Santan encer	Dibuang (Deadlock 1-1-1)	Susu kedelai plain	– (Tidak Dihitung)
21	Susu (Dairy) + Choux	Air biasa	Susu kedelai	Air biasa	Air biasa (2/3) → Diskusi pakar sepakat	Air biasa	Sesuai
22	Cream + Cheesecake	Vegan cream cheese	Vegan cream cheese	Coconut cream + agar	Vegan cream cheese (2/3) → Diskusi pakar sepakat	Vegan cream cheese	Sesuai

23	Mentega (Butter) + Marble Cake	Minyak kelapa cair	Margarin vegan	Minyak kelapa cair	Minyak Kelapa cair(2/3) → Diskusi pakar sepakat	Minyak Kelapa cair	Sesuai
24	Mentega (Butter) + Croissant	Margarin vegan block pastry	Minyak kelapa padat	Margarin vegan block pastry	Margarin vegan block pastry (2/3) → Diskusi pakar sepakat	Margarin vegan block pastry	Sesuai
25	Kacang (Nuts) + Macaron	Tepung biji bunga matahari	Tepung biji bunga matahari	Tepung kelapa + beras	Tepung biji bunga matahari (2/3) → Diskusi pakar sepakat	Tepung biji bunga matahari	Sesuai

1) Perhitungan Akurasi

Berdasarkan Tabel di atas, dari 25 skenario kasus uji yang diberikan kepada ketiga pakar:

- a) 2 kasus mengalami deadlock (pola suara 1-1-1) yaitu Kasus No. 18 (Gluten + Brownies) dan No. 20 (Susu + Crème Caramel), sehingga dikeluarkan dari perhitungan untuk menjaga objektivitas.
- b) 23 kasus valid yang memiliki konsensus *Gold Standard*.

Dari 23 kasus valid tersebut:

- a) 22 kasus sistem berhasil merekomendasikan bahan pengganti yang sama persis dengan pakar.
- b) 1 kasus sistem tidak sesuai, yaitu Kasus No. 2 (Telur + Bolu Kukus), di mana sistem merekomendasikan *Flax egg + baking powder* (skor 64,24) sedangkan pakar merekomendasikan *Aquafaba*.

$$Akurasi = \frac{22}{23} \times 100\% = 95,65\%$$

4.3.2. Skenario Pengujian Fungsional (*Black Box Testing*)

Pengujian fungsional dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh fitur dan antarmuka pada sistem berjalan sesuai dengan kebutuhan fungsional dan non-fungsional yang telah dianalisis. Metode *Black Box Testing* dipilih karena berfokus pada spesifikasi kebutuhan perangkat lunak tanpa memeriksa struktur kode program secara internal.

Skenario pengujian ini dirancang dengan memberikan perlakuan (*input*) tertentu pada sistem, baik dari sisi Pengguna maupun Admin, kemudian mengamati keluaran (*output*) yang dihasilkan. Indikator keberhasilan pengujian ini adalah apabila keluaran yang dihasilkan sistem sama persis dengan hasil yang diharapkan (*expected result*). Beberapa skenario utama yang akan diujikan meliputi:

- a. Sisi Pengguna: Mengakses halaman beranda, melakukan input data jenis alergi dan jenis kue, memicu proses inferensi sistem, serta memastikan halaman hasil rekomendasi substitusi bahan (berserta rasio dan tips) tampil dengan urutan *ranking* yang benar.
- b. Sisi Admin: Melakukan autentikasi (*login/logout*), serta menguji fitur *Create*, *Read*, *Update*, dan *Delete* (CRUD) pada seluruh manajemen data master (data alergi, jenis kue, bahan *baking*, fungsi bahan, bahan pengganti, dan aturan *Forward Chaining*).

c. Pengujian Fungsional Antarmuka Pengguna

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa pengguna (penderita alergi atau pelaku UMKM) dapat melakukan konsultasi dan mendapatkan rekomendasi substitusi bahan dengan mudah dan akurat.

Tabel 4. 3. Pengujian Fungsional Antarmuka Pengguna

No	Skenario Pengujian (Test Case)	Hasil yang Diharapkan (Expected Result)	Hasil Penguji 1	Hasil Penguji 2	Hasil Penguji 3	Kesimpulan
1	Memilih menu konsultasi untuk memulai proses	Sistem menampilkan halaman pemilihan jenis alergi (8 jenis alergi: telur, gluten, susu, mentega, cream, keju, yogurt, kacang-kacangan)	Berhasil	Berhasil	Berhasil	Valid
2	Memilih salah satu jenis alergi, lalu	Sistem menampilkan halaman pemilihan	Berhasil	Berhasil	Berhasil	Valid

	menekan tombol "Lanjut"	teknik pengolahan (panggang, kukus, goreng)				
3	Memilih teknik pengolahan (misal: "Panggang")	Sistem menampilkan daftar jenis kue yang sesuai dengan teknik pengolahan tersebut (misal: Marble Cake, Brownies, Cookies, dll)	Berhasil	Berhasil	Berhasil	Valid
4	Memilih teknik pengolahan, lalu mencoba memilih jenis kue tanpa klik teknik pengolahan	Daftar jenis kue tidak muncul atau tombol "Lanjut" tidak aktif	Berhasil	Berhasil	Berhasil	Valid

	n terlebih dahulu					
5	Memilih teknik pengolahan dan jenis kue, lalu menekan tombol "Proses"	Sistem menampilkan halaman hasil rekomendasi berupa daftar bahan pengganti yang diurutkan berdasarkan ranking skor tertinggi	Berhasil	Berhasil	Berhasil	Valid
6	Mengklik detail pada hasil rekomendasi peringkat pertama (Rank 1)	Sistem menampilkan halaman detail berupa nama bahan pengganti, rasio takaran otomatis, dan tips teknis pengolahan	Berhasil	Berhasil	Berhasil	Valid
7	Memilih kombinasi alergi dan jenis kue	Sistem menampilkan pesan bahwa kombinasi	Berhasil	Berhasil	Berhasil	Valid

	yang tidak ada dalam basis pengetahu an	tersebut belum tersedia dalam sistem				
--	---	---	--	--	--	--

Kesimpulan Pengujian Pengguna: Berdasarkan Tabel 4.2, seluruh 7 skenario pengujian pada antarmuka pengguna menghasilkan keluaran yang sesuai dengan harapan. Sistem berhasil menerapkan alur konsultasi bertahap (Alergi → Teknik Pengolahan → Jenis Kue → Hasil Rekomendasi) dengan validasi input yang ketat di setiap tahap, sehingga mencegah kesalahan input dari pengguna

d. Pengujian Fungsional Dashboard Admin

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa admin dapat mengelola basis pengetahuan (*knowledge base*) sistem, yang merupakan inti dari metode *Forward Chaining* dan parameter *Fuzzy-AHP*.

Tabel 4. 4. Pengujian Fungsional Dashboard Admin

No	Skenario Pengujian (Test Case)	Hasil yang Diharapkan (Expected Result)	Hasil Pengujian	Kesimpulan
1	Melakukan login dengan username dan password yang benar	Admin berhasil masuk ke halaman dashboard utama	Admin berhasil mengakses dashboard dengan	Sesuai

			tampilan ringkasan data	
2	Melakukan login dengan username atau password yang salah	Sistem menampilkan pesan error "Login Gagal"	Muncul notifikasi "Username atau password salah" dan sistem tetap di halaman login	Sesuai
3	Menambah data Alergi baru melalui menu Kelola Alergi	Data alergi baru berhasil tersimpan di database	Data alergi baru (misal: "Wijen") berhasil ditambahkan dan langsung muncul di daftar	Sesuai
4	Mengubah data Jenis Kue yang sudah ada	Data jenis kue berhasil diperbarui	Data jenis kue (misal: deskripsi "Marble Cake") berhasil diubah dan tersimpan	Sesuai
5	Menghapus data Bahan Pengganti	Data bahan pengganti berhasil	Data bahan pengganti berhasil	Sesuai

		dihapus dari database	dihapus dengan konfirmasi pop-up "Yakin hapus data ini?"	
6	Menambah Aturan Forward Chaining baru	Aturan IF-THEN baru berhasil disimpan dan aktif di mesin inferensi	Aturan baru (misal: Alergi Telur + Kue Baru → Kandidat) berhasil disimpan dan langsung dapat diuji di sisi pengguna	Sesuai
7	Mengelola data Fungsi Bahan (tambah/edit/hapus)	Data fungsi bahan berhasil dikelola (CRUD berjalan normal)	Seluruh operasi CRUD pada data fungsi bahan berjalan normal tanpa error	Sesuai
8	Mengelola data Subs Bahan Pengganti	Data subs bahan pengganti berhasil dikelola	Data subs bahan pengganti berhasil ditambahkan,	Sesuai

			diubah, dan dihapus sesuai kebutuhan	
9	Melihat Data Riwayat Konsultasi pengguna	Sistem menampilkan daftar riwayat konsultasi beserta hasil rekomendasi	Tabel riwayat konsultasi tampil lengkap dengan informasi tanggal, alergi, jenis kue, dan hasil rekomendasi	Sesuai
10	Melakukan logout dari sistem	Admin berhasil keluar dan kembali ke halaman login	Admin berhasil logout dan sistem mengarahkan kembali ke halaman login	Sesuai

Kesimpulan Pengujian Admin: Berdasarkan Tabel 4.3, seluruh 10 skenario pengujian pada dashboard admin menghasilkan keluaran yang sesuai dengan harapan. Fitur CRUD (Create, Read, Update, Delete) pada seluruh data master (alergi, jenis kue, bahan baking, fungsi bahan, bahan pengganti, subs pengganti, dan aturan Forward Chaining) berjalan dengan baik, sehingga admin dapat mengelola basis pengetahuan secara dinamis tanpa memerlukan intervensi teknis dari pengembang.

Tabel 4. 5. Ringkasan Hasil Pengujian

Jenis Pengujian	Jumlah Skenario	Sesuai	Tidak Sesuai	Persentase
Pengujian Akurasi Metode	23 kasus valid	22	1	95,65%
Black Box – Antarmuka Pengguna	7 skenario	7	0	100%
Black Box – Dashboard Admin	10 skenario	10	0	100%

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Keberhasilan Pembangunan Sistem: Sistem pakar penentuan substitusi bahan kue bagi penderita alergi berbasis web telah berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman PHP *native* dan basis data MySQL. Sistem ini berhasil mengintegrasikan metode *Forward Chaining* sebagai mesin inferensi untuk penyaringan keamanan bahan (bebas alergen) dan metode *Fuzzy Mamdani* yang dipadukan dengan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk mengevaluasi kelayakan serta peringkat (*ranking*) bahan pengganti.
2. Basis Pengetahuan dan Aturan: Sistem telah memuat basis pengetahuan yang divalidasi oleh tiga orang pakar *pastry* dan *bakery* (A.Md. Par), yang mencakup 8 jenis alergi pangan, 26 jenis produk *baking*, 69 alternatif bahan pengganti, dan 76 aturan *Forward Chaining*. Bobot prioritas kriteria yang dihasilkan dari agregasi *geometric mean* ketiga pakar menunjukkan bahwa Fungsi Bahan memiliki pengaruh paling dominan (55,25%), diikuti oleh Tekstur (26,33%), Rasa (10,83%), dan Ketersediaan (7,63%) dengan nilai *Consistency Ratio* (CR) 0,036 (konsisten).
3. Hasil Pengujian Fungsional (*Black Box Testing*): Berdasarkan pengujian *Black Box Testing* pada antarmuka pengguna dan *dashboard admin*, seluruh skenario pengujian menghasilkan keluaran yang 100% Sesuai. Sistem berhasil menerapkan alur konsultasi bertahap (Pemilihan Alergi → Teknik Pengolahan → Jenis Kue → Hasil Rekomendasi) dengan validasi input yang ketat serta

mampu menampilkan *output* berupa nama bahan pengganti, rasio takaran, dan tips teknis pengolahan.

4. Hasil Pengujian Akurasi Metode: Pengujian akurasi sistem yang dilakukan terhadap 25 skenario kasus uji (dengan 2 kasus *deadlock* sehingga tersisa 23 kasus valid) menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan rekomendasi yang sama persis dengan konsensus pakar (*Gold Standard*) pada 22 kasus. Hal ini menghasilkan tingkat akurasi sistem sebesar 95,65%. Satu kasus yang tidak sesuai (Alergi Telur + Bolu Kukus) terjadi karena perbedaan perspektif bobot ketersediaan antar-pakar, namun sistem tetap memberikan alternatif yang secara teknis sangat layak (skor 64,24).

5.2. Saran

Guna penyempurnaan dan pengembangan sistem di masa mendatang, peneliti mengajukan beberapa saran sebagai berikut:

1. Penambahan Cakupan Basis Pengetahuan: Saat ini sistem memuat 76 aturan *Forward Chaining* (mencakup sekitar 39,6% dari 192 kombinasi teoretis). Disarankan bagi peneliti selanjutnya untuk memperluas basis pengetahuan dengan menambahkan kombinasi alergi dan jenis kue lainnya, serta memperkaya database bahan pengganti merujuk pada literatur teknologi pangan internasional agar sistem dapat menangani kasus yang lebih kompleks dan beragam.
2. Fitur Kalkulator Rasio Takaran Dinamis: Meskipun sistem telah menyediakan informasi rasio takaran, disarankan untuk mengembangkan fitur kalkulator dinamis. Misalnya, jika pengguna memasukkan input "Saya ingin mengganti 200 gram tepung terigu", sistem dapat secara otomatis menghitung dan menampilkan berapa gram tepung beras atau mocaf yang dibutuhkan secara presisi.

3. Peringatan Kontaminasi Silang (*Cross-Contamination*): Mengingat risiko fatal bagi penderita alergi parah (anafilaksis), disarankan untuk menambahkan modul edukasi atau fitur *warning* pada antarmuka pengguna mengenai prosedur pencegahan kontaminasi silang di dapur (seperti pemisahan alat *baking*) yang tidak hanya berfokus pada substitusi bahan saja.
4. Pengembangan basis pengetahuan dengan menambahkan parameter evaluasi sensorik pada setiap bahan pengganti. Saat ini, sistem hanya merekomendasikan substitusi berdasarkan fungsi teknis dan keamanan alergi. Ke depannya, diharapkan sistem dapat memberikan informasi komparatif mengenai tingkat kemiripan rasa, tekstur, aroma, dan warna antara bahan asli dan bahan pengganti. Hal ini bertujuan agar pengguna tidak hanya mendapatkan rekomendasi yang aman, tetapi juga memiliki ekspektasi yang realistis terhadap hasil akhir produk baking.
5. Pengembangan Platform *Mobile*: Untuk meningkatkan aksesibilitas dan kenyamanan pengguna saat berada di dapur, sistem ini dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi aplikasi berbasis *mobile* (Android/iOS) atau *Progressive Web App* (PWA) sehingga lebih responsif dan mudah diakses melalui *smartphone*.

DAFTAR PUSTAKA

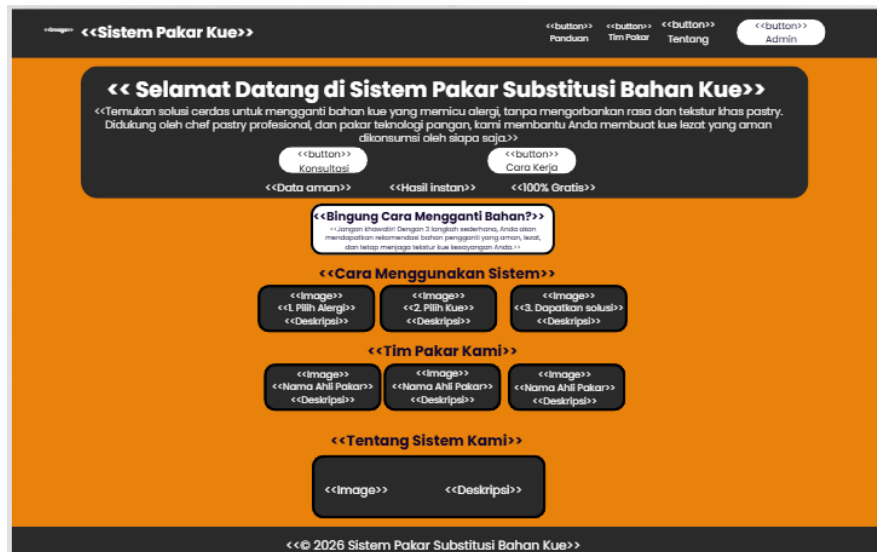
- Agriculture, M. D. of. (2024). *Food Ingredients that May Cause Allergies*.
<https://www.mda.state.mn.us/food-feed/food-ingredients-may-cause-allergies>
- Aji, A., Ferdinandus, F., & Bayu, M. (2019). *Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Handphone Dengan Metode Simple Additive Weighting Berbasis WEB*. 8(2).
- Alhamri, R. Z., Izzah, A., & Eliyen, K. (2021). *Pengembangan Sistem Pakar Berbasis Android Untuk Menentukan Obat Generik Pada Penyakit Kulit Menggunakan Metode Forward Chaining*. 1–11.
- Antoni, I. D., Sidoarjo, U. M., B, J. M. N., & Sidoarjo, K. (2024). *Implementasi Logika Fuzzy Untuk Menentukan Jumlah Produksi Roti Menggunakan Metode Tsukamoto*. 14(1), 61–70.
- Arasi, S., Nurmatov, U., Dunn-Galvin, A., Roberts, G., Turner, P. J., Shinder, S. B., Gupta, R., Eigenmann, P., Nowak-Wegrzyn, A., & Ansotegui, I. J. (2023). *WAO consensus on Definition of Food Allergy Severity (DEFASE)*. 0–23.
- Athiyah, U., Handayani, A. P., Aldean, M. Y., Putra, N. P., & Rafian. (2021). *Sistem Inferensi Fuzzy : Pengertian, Penerapan, dan Manfaatnya*. 1(2), 73–76.
- Aulia, R., Achmady, S., Razi, Z., Informatika, T., & Ghafur, U. J. (2024). *PENGEMBANGAN WEB PENCARIAN RESEP MASAKAN DENGAN FITUR REKOMENDASI BERBASIS ALGORITMA MACHINE*.
- Dr. Erli Mutiara, M. S., & Ajeng Inggir Anugerah, S.Pd., M. P. (2022). *Kue-kue Indonesia Berbasis Kearifan Lokal*.
- Elghoudi, A., & Narchi, H. (2022). *Food allergy in children — the current status and the way forward*. 11(3), 253–270. <https://doi.org/10.5409/wjcp.v11.i3.253>
- Eluis, Y., Mawartika, B., Guntur, M., Informasi, S., Makanan, M., & Pakar, S. (2021). *Aplikasi Sistem Pakar Pemilihan Makanan Berdasarkan Kebutuhan Gizi Menggunakan Metode Forward Chaining*. 7(1), 96–110.
- Esko. (2026). *Food allergen labeling requirements in 2026: FDA guide*.

<https://www.esko>.

- FARADINA, F. (2017). *RANCANG BANGUN APLIKASI SISTEM PAKAR PENENTUAN REKOMENDASI RESEP MASAKAN BERDASARKAN KETERSEDIAAN BAHAN MAKANAN SKRIPSIRANCANG BANGUN APLIKASI SISTEM PAKAR PENENTUAN REKOMENDASI RESEP MASAKAN BERDASARKAN KETERSEDIAAN BAHAN MAKANAN SKRIPSI*.
- Halm, J., Sahin, A. W., Nyhan, L., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2024). *Commercial Egg Replacers in Pound Cake Systems : A Comprehensive Analysis of Market Trends and Application*.
- Iqbal, M. (1965). *SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN POLA MAKAN UNTUK PENDERITA DIABETES TIPE-2 BERDASARKAN PREFERENSI DENGAN MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY* Muhammad. 1–9.
- Jenalabdurrohman, & Saprudin. (2023). *Sistem Pakar Diagnosa Penyakit Gigi Berbasis Web Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani*. 1(3), 334–340.
- Kuncoro, D. F., Juniarti, U., Syahputra, J., Sumantri, R. B. B., & Suryani, R. (2022). *Rancang Bangun Sistem Pengaduan Masyarakat Berbasis Web Dengan Metode Waterfall*. 3(2), 14–19.
- Kurniawan, R., Hasibuan, S., & Nugroho, R. E. (2017). *Analisis kriteria dan proses seleksi kontraktor chemical sektor hulu migas: Aplikasi metode Delphi-AHP*. MIX: Jurnal Ilmiah Manajemen, 7(2), 252–266.
- Maulia, A., & Kusuma, B. A. (2026). *Rule-Based Expert System for Personalized GERD Food Recommendations Using Forward Chaining and Certainty Factor in Indonesia*. 7(2), 1468–1482.
- NAYANA, L. H. (2021). *IMPLEMENTASI FUZZY EXPERT SYSTEM DAN FORWARD CHAINING UNTUK DIAGNOSA PENYAKIT KUCING BERBASIS ANDROID*.
- Saefudin, Y., Triayudi, A., & Sholihati, I. D. (2021). *Forward chaining and fuzzy logic tsukamoto methods for decision Forward chaining and fuzzy logic tsukamoto methods for decision*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1088/1/012018>

- SAKTI, D. D. (2021). *SISTEM PAKAR DIAGNOSA PENYAKIT HEMOFILIA BERBASIS WEBSITE MENGGUNAKAN METODE FORWARD CHAINING*.
- Sangaji, M. S. J., & Irianto, J. (2025). *Transformasi Inovasi Pelayanan Publik menuju Pemerintahan Digital Public Service Innovation Transformation towards Digital Government*. 17(c), 54–70. <https://doi.org/10.20473/jap.v17i1.72708>
- Setiyani, L., & Tjandra, E. (2022). *Jurnal E-Komtek System Design : Data Flow Diagrams of Sales Process , a Case Study of CV . Jatayu Catra Internusa*. 6(1), 82–88.
- Sutiari, A. (2020). *Layanan Diagnosa Deteksi Penyakit Jantung Dengan Forward Chaining Dan Fuzzy Logic Mamdani Berbasis Mobile*. 08, 12–18.
- Tampubolon, S. (2022). *Sistem Pakar Diagnosa Penyakit Skistosomiasis Menggunakan Kombinasi Forward Chaining Dan Fuzzy Logic Takagi Sugeno Kang*. 2(3), 128–131.
- Waserman, S., Bégin, P., & Watson, W. (2018). IgE - mediated food allergy. *Allergy, Asthma & Clinical Immunology*, 14(s2), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13223-018-0284-3>
- Wijaya, Y. D., & Astuti, M. W. (2021). *PENGUJIAN BLACKBOX SISTEM INFORMASI PENILAIAN KINERJA KARYAWAN PT INKA (PERSERO) BERBASIS EQUIVALENCE PARTITIONS BLACKBOX TESTING OF PT INKA (PERSERO) EMPLOYEE PERFORMANCE ASSESSMENT INFORMATION SYSTEM BASED ON teknik Equivalence Partitions melakukan*. 4, 22–26.
- Zilasar, R. A., Pranoto, Y. A., Ariwibisono, F. X., Industri, F. T., Tinggal, R., Produk, P., Peringkat, P., & Keputusan, S. P. (2026). *Sistem pendukung keputusan pemilihan produk kaca dan cermin menggunakan metode fuzzy ahp*. 9, 21–2

LAMPIRAN



Gambar 1. Halaman Dashboard Pengguna



Gambar 2. Halaman Pilih Alergi

<<✓ Pilih Alergi>> <<2. Pilih Kue>> <<3. Rekomendasi>>

<<Jenis kue yang akan dibuat>>
<<Pilih teknik pengolahan, lalu pilih jenis kue.>>

<Nama Alergi yang sudah dipilih>

<<Teknik Pengolahan>>

<Image>
<Nama Teknik Pengolahan>
<Deskripsi>

<Image>
<Nama Teknik Pengolahan>
<Deskripsi>

<Image>
<Nama Teknik Pengolahan>
<Deskripsi>

<<Jenis Kue>>

<Image>
<Nama Jenis Kue>
<Deskripsi>

<Image>
<Nama Jenis Kue>
<Deskripsi>

<Image>
<Nama Jenis Kue>
<Deskripsi>

<Image>
<Nama Jenis Kue>
<Deskripsi>

<Image>
<Nama Jenis Kue>
<Deskripsi>

<<Button>>
<<Ubah Alergi>>

<<Button>>
Lihat Rekomendasi->

Gambar 3. Halaman Pilih Kue

<<Pilih Alergi>>

<<Pilih Kue>>

<<3. Rekomendasi>>

<<Parameter Konsultasi>>

<<Nama Alergi yang sudah dipilih>>

<<Nama Jenis Kue yang sudah dipilih>>

<<Deskripsi>>

<<Paket Substitusi yang Direkomendasikan>>

<<No>>

<<Nama Bahan Pengganti>>

<<Menggantikan : Alergi>>

<<Store>>

<<Komposisi Pengganti>>

<<Deskripsi>>

<<Potensi Keberhasilan>>

<<Fungsi Bahan>>

<<Kecocokan Tekstur>>

<<Kecocokan Rasa>>

<<Ketersediaan>>

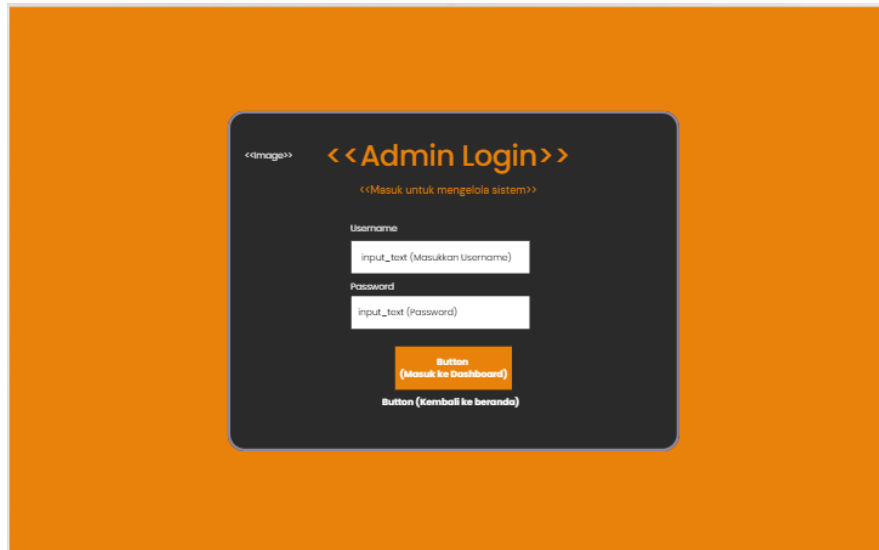
<<Button>>

← Ubah Pilihan Kue

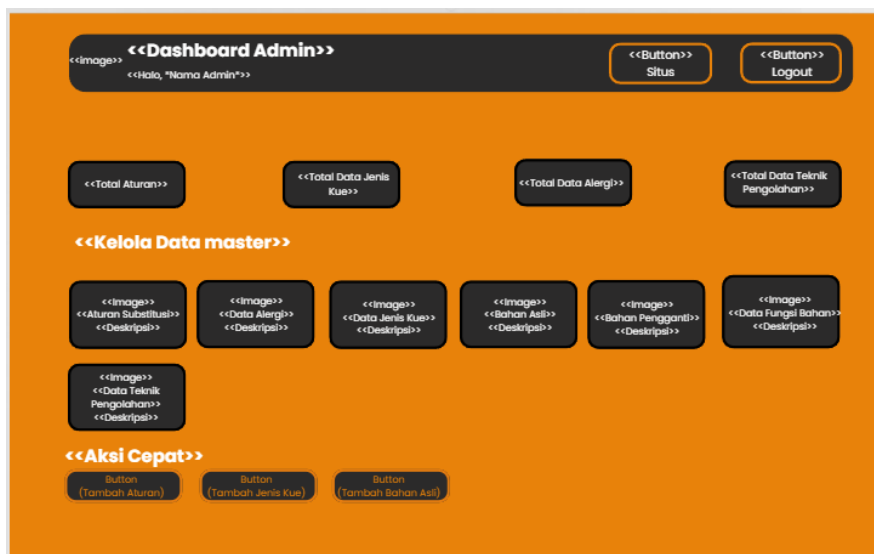
<<Button>>

Konsultasi Baru →

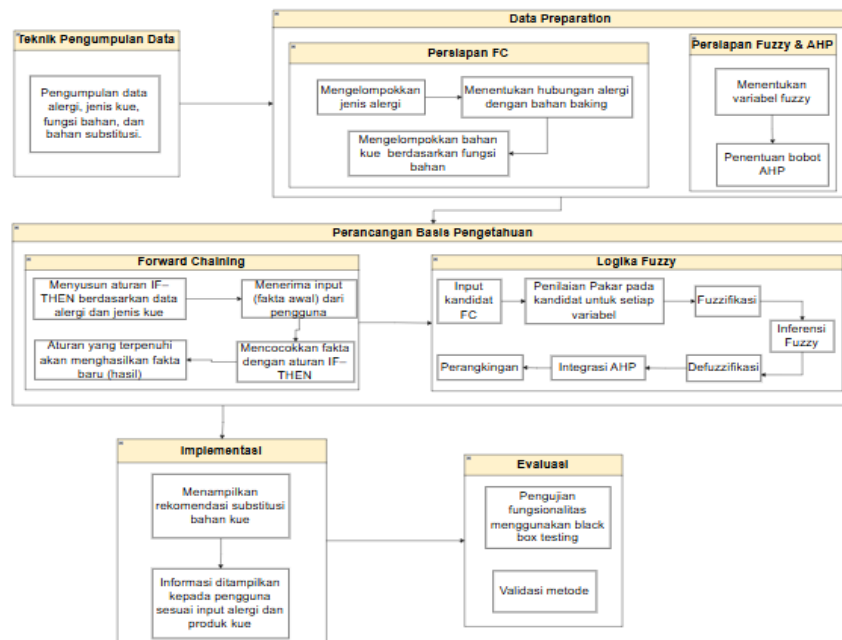
Gambar 4. Halaman Rekomendasi



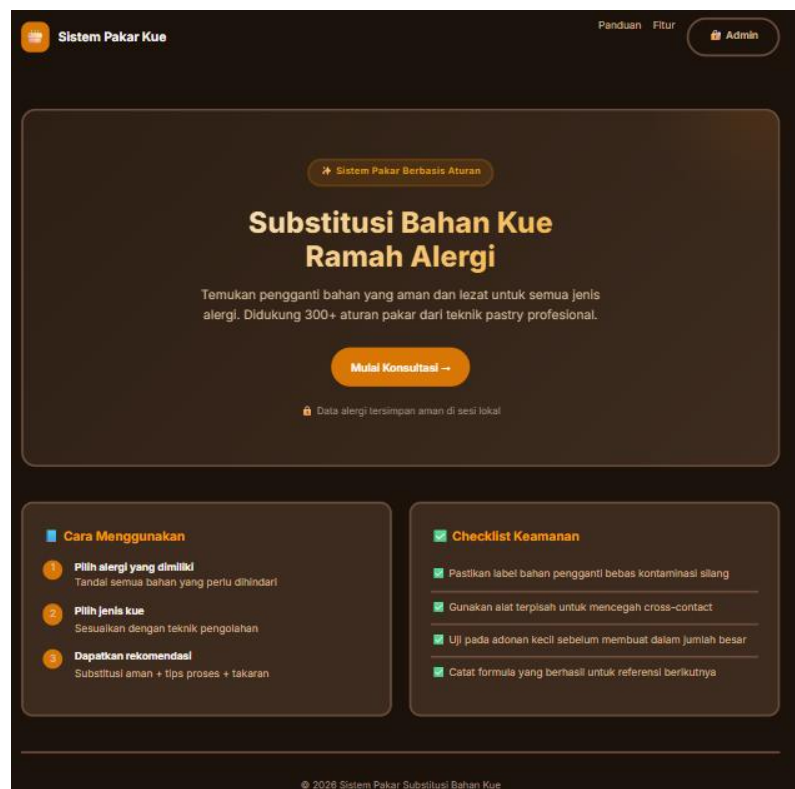
Gambar 5. Halaman Login Admin



Gambar 6. Halaman UI Dashboard Admin



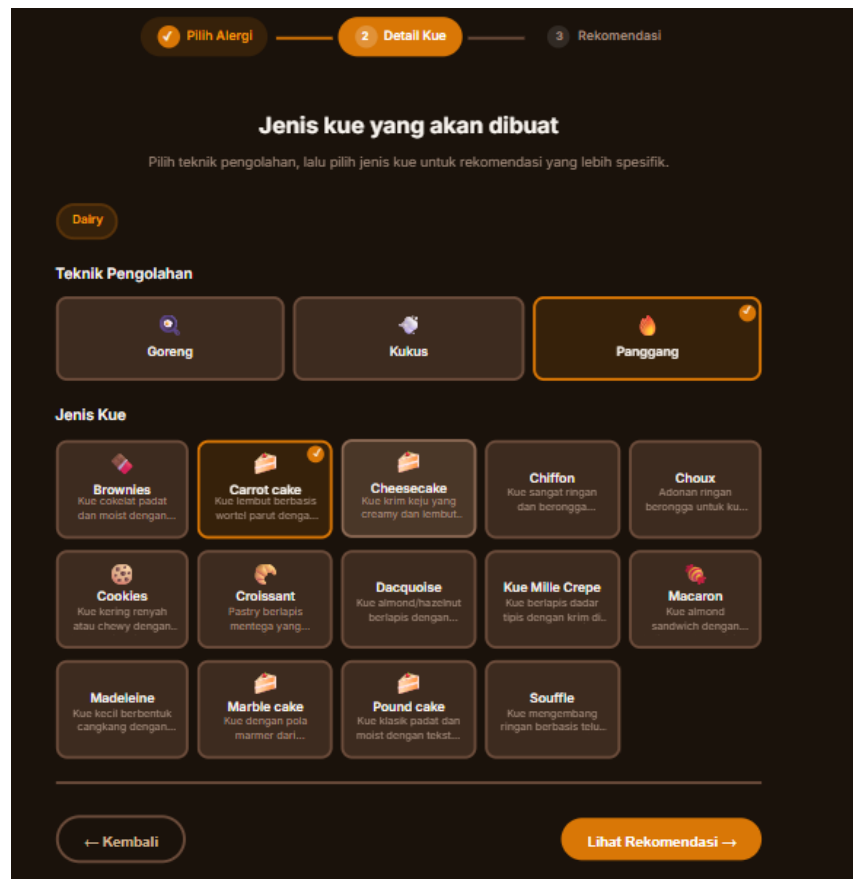
Gambar 7. Alur penelitian



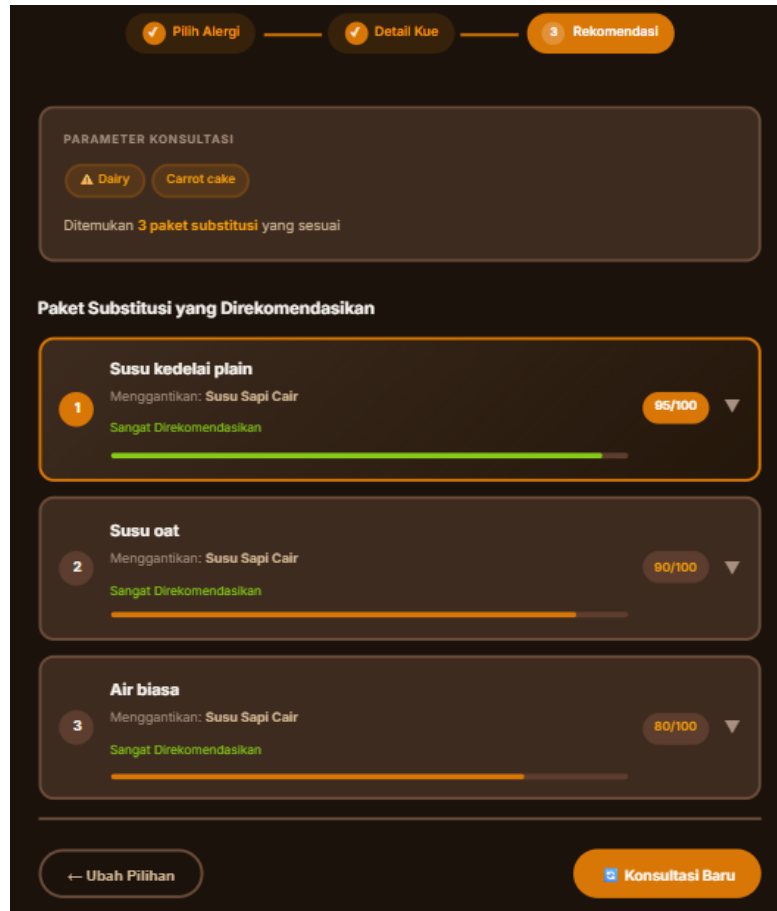
Gambar 8. Halaman Awal



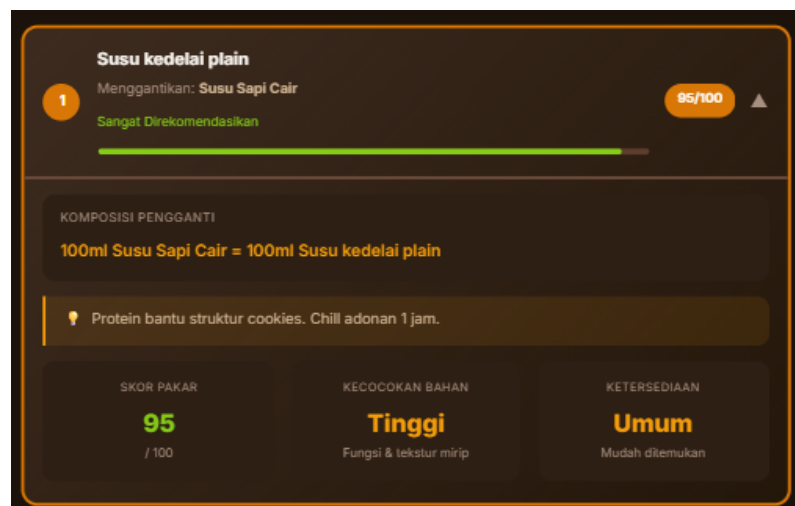
Gambar 9. Halaman Pilih Alergi



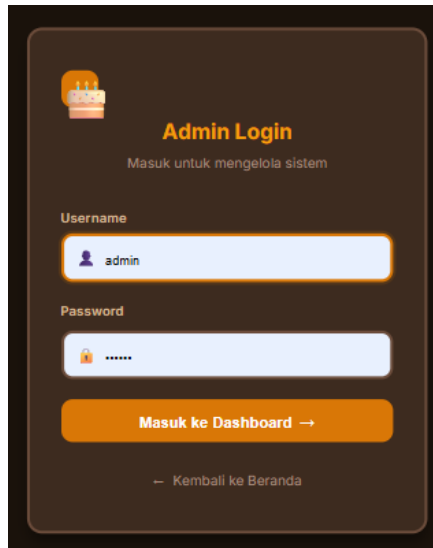
Gambar 10. Pilih Jenis Kue



Gambar 11. Halaman Hasil Rekomendasi



Gambar 12. Halaman Detail Rekomendasi



Admin Login
Masuk untuk mengelola sistem

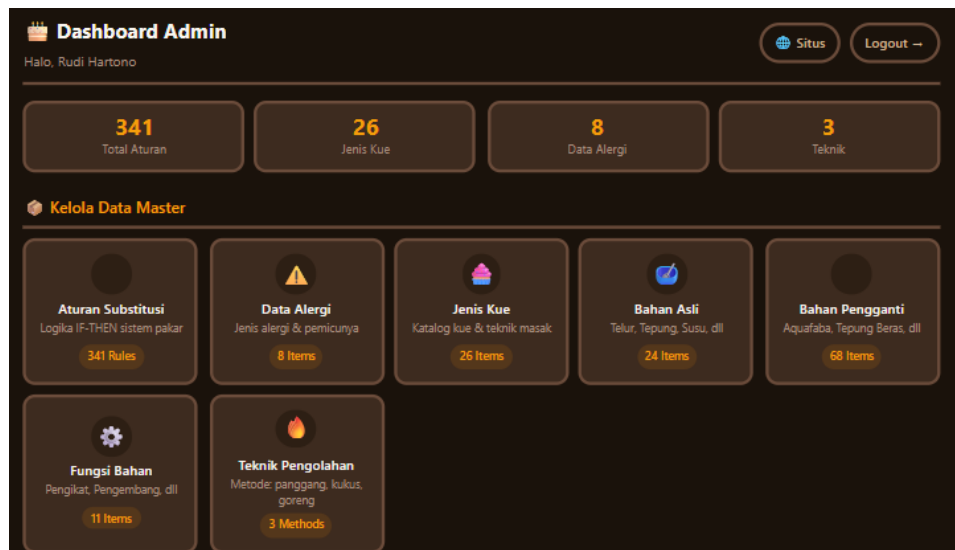
Username

Password

Masuk ke Dashboard →

[← Kembali ke Beranda](#)

Gambar 13. Login Admin



Dashboard Admin
Halo, Rudi Hartono

[Situs](#) [Logout →](#)

341 Total Aturan	26 Jenis Kue	8 Data Alergi	3 Teknik
----------------------------	------------------------	-------------------------	--------------------

Kelola Data Master

Aturan Substitusi Logika IF-THEN sistem pakar 341 Rules	Data Alergi Jenis alergi & pemicunya 8 Items	Jenis Kue Katalog kue & teknik masak 26 Items	Bahan Asli Telur, Tepung, Susu, dll 24 Items	Bahan Pengganti Aquafaba, Tepung Beras, dll 68 Items
Fungsi Bahan Pengikat, Pengembang, dll 11 Items	Teknik Pengolahan Metode: panggang, kukus, goreng 3 Methods			

Gambar 14. Dashboard Admin