

Pengembangan Program Gauge R&R Berbasis R untuk Mendukung Analisis Sistem Pengukuran pada Proses Verifikasi Produk Injektor

Christophorus Brian, Djoko Setyanto*

Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51, Jakarta 12930

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i> Received 06 May 2026 Accepted 18 June 2026 <i>Keywords:</i> Gauge R&R, Measurement System Analysis, Verification Engineering, R	<i>This paper presents the development of an R-based Gauge R&R program to support measurement system analysis in injector product verification. The study is motivated by the reliance on licensed statistical software, limited accessibility, and the need for a more flexible internal workflow. A design-and-development approach was employed, including requirement identification, conceptual design, module and library development, implementation, and initial validation through comparative analysis. The developed program supports crossed and nested study designs, normalized data processing, ANOVA, variance component estimation, study variation analysis, and interpretative graphical outputs. Validation results indicate that the program produces consistent and reliable analytical outputs compared to conventional tools. The findings demonstrate that a modular R-based application can effectively support measurement system analysis, improve analytical efficiency, and enhance decision-making reliability in verification processes.</i>

Info Artikel	Abstrak
<i>Histori Artikel:</i> Diserahkan: 06 Mei 2026 Diterima: 18 Juni 2026 <i>Kata Kunci:</i> Gauge R&R, sistem pengukuran, verification engineering, R	Tulisan ini membahas pengembangan program <i>Gauge R&R</i> berbasis R untuk mendukung analisis sistem pengukuran pada verifikasi produk injektor. Latar belakangnya adalah ketergantungan pada perangkat lunak berlisensi serta kebutuhan akan <i>workflow</i> internal yang lebih fleksibel. Metode meliputi identifikasi kebutuhan, perancangan konsep, pengembangan modul dan <i>library</i> , implementasi, serta validasi awal melalui perbandingan hasil analisis. Program yang dihasilkan mendukung studi <i>crossed</i> dan <i>nested</i> , data ternormalisasi, analisis ANOVA, komponen varians, <i>study variation</i> , serta grafik interpretatif. Hasil menunjukkan bahwa program ini mampu menyediakan analisis yang andal dan fleksibel, serta berpotensi meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengambilan keputusan pada proses verifikasi sistem pengukuran.

1. PENDAHULUAN

Pada perusahaan XYZ khususnya di departemen testing, verification engineer bertanggung jawab memastikan bahwa metode uji, hasil pengukuran, dan keputusan teknis yang diambil telah didukung oleh data yang valid. Dalam lingkungan pengembangan produk injektor, data pengujian digunakan untuk menilai apakah performa produk telah memenuhi kebutuhan verifikasi. Oleh karena itu, kualitas data tidak hanya ditentukan oleh objek yang

*Corresponding author. Djoko Setyanto
Email address: djoko.setyanto@atmajaya.ac.id

diuji, tetapi juga oleh kemampuan sistem pengukuran dalam menghasilkan hasil yang konsisten dan dapat dipercaya.

Analisis sistem pengukuran merupakan bagian penting dalam pengendalian kualitas karena digunakan untuk menilai apakah variasi hasil pengukuran berasal dari sistem pengukuran atau dari objek yang diukur (AIAG, 2010; Montgomery, 2019). Analisis Gauge R&R telah banyak dikaji sebagai metode evaluasi sistem pengukuran dan telah direview secara sistematis dalam literatur (Soares, Peruchi, Silva, dan Rotella Junior, 2022). Dasar perhitungan tabel Gauge R&R juga terdokumentasi pada software statistik komersial seperti Minitab, termasuk untuk ANOVA dan variance components pada crossed Gage R&R (Minitab Support, 2026). Selain itu, implementasi berbasis R juga telah tersedia, misalnya melalui package gageRR yang menyediakan metode ANOVA dan Average/Range untuk studi Gauge R&R (The gageRR Authors, 2024).

Namun, referensi dan tools tersebut belum secara langsung menjawab kebutuhan pada konteks pekerjaan spesifik, terutama terkait pembacaan format data pengujian yang beragam, dukungan studi crossed dan nested dalam satu workflow internal, keluaran analisis yang sesuai kebutuhan pengguna, serta pengolahan data yang tetap menjaga kerahasiaan internal. Atas dasar itu, penelitian ini berfokus pada perancangan dan perwujudan program Gauge R&R berbasis R yang disesuaikan dengan kebutuhan tersebut.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana menyusun program Gauge R&R berbasis R sebagai alternatif analisis internal yang mampu mendukung verification engineering. Kebutuhan utama yang harus dijawab oleh program tersebut meliputi pengurangan ketergantungan pada software berlisensi, penyesuaian keluaran analisis terhadap format data pengujian dan kebutuhan ringkasan internal, serta pengolahan data yang tetap berada dalam workflow internal yang aman. Atas dasar itu, tujuan perancangan penelitian ini adalah menyusun program Gauge R&R berbasis R yang mampu membaca data hasil pengukuran, melakukan analisis crossed dan nested, serta menampilkan hasil analisis berupa tabel dan chart secara benar dan konsisten. Untuk menjaga kerahasiaan perusahaan, cuplikan kode dan tampilan program yang ditampilkan pada naskah ini merupakan versi umum/ilustratif yang telah disederhanakan, namun konsep dan alur logikanya tetap sama dengan program yang diwujudkan.

2. METODE PELAKSANAAN

2.1 Identifikasi Masalah dan Solusi

Ada tiga objek dari program yang perlu diidentifikasi masalah dan solusinya:

- Pembacaan dan Normalisasi Data Hasil Pengukuran.
- Perhitungan Crossed dan Nested.
- Penampilan Hasil Analisis dalam Bentuk Tabel dan Diagram.

2.1.1 Pembacaan dan Normalisasi Data Hasil Pengukuran.

Spesifikasi yang dibutuhkan: mampu menerima input file maupun input manual, membedakan sumber input, membaca data hasil pengukuran dari format yang berbeda, menormalisasi data ke struktur Part–Operator–Trial–Value, dan memvalidasi kelayakan data sebelum analisis dilakukan.

Tabel 1.**Pemilihan Spesifikasi Subfungsi Pembacaan dan Normalisasi Data Hasil Pengukuran**

Subfungsi	Solusi		
	1	2	3
1. Membaca sumber data	Penataan manual di Excel	Pembacaan file langsung lalu susun manual	Fungsi pembacaan khusus (read_measurement_source, read_measurement_text)
2. Menentukan sumber input	Satu jalur tetap	Pemilihan manual di luar program	Logika kondisional berdasarkan input\$data source
3. Normalisasi dan validasi	Biarkan format asli	Susun ulang manual	Normalisasi otomatis ke Part-Operator-Trial-Value dan validasi data

Berdasarkan perbandingan tersebut, solusi yang paling sesuai adalah 3-3-3. Oleh karena itu, sub fungsi pembacaan data diwujudkan melalui fungsi pembacaan khusus, logika kondisional sumber input, serta proses normalisasi dan validasi otomatis agar data dapat langsung diproses pada tahap analisis.

2.1.2 Perhitungan Crossed dan Nested

Spesifikasi yang dibutuhkan: mampu menentukan jalur analisis berdasarkan desain studi dan batas spesifikasi, membedakan mode one spec limit dan two spec limits, serta menghitung keluaran utama berupa ANOVA, variance components, dan study variation secara konsisten.

Tabel 2.**Pemilihan Spesifikasi Subfungsi Perhitungan Crossed dan Nested**

Subfungsi	Solusi		
	1	2	3
1. Jalur analisis	Satu script besar untuk semua kasus	Perhitungan manual di UI	Modul terpisah crossed_one, crossed_two, nested_one, nested_two
2. Penentuan batas spesifikasi	Tidak dibedakan	Diisi manual di luar alur	Mode one spec limit dan two spec limits di UI
3. Hasil statistik	Ringkasan sederhana	ANOVA saja	ANOVA, variance components, dan study variation

Berdasarkan perbandingan tersebut, solusi yang paling sesuai adalah 3-3-3. Dengan demikian, perhitungan statistik diwujudkan melalui modul analisis yang dipisahkan menurut desain crossed atau nested dan mode batas spesifikasi, sehingga jalur analisis menjadi lebih jelas dan lebih mudah divalidasi.

2.1.3 Penampilan Hasil Analisis dalam Bentuk Tabel dan Diagram

Spesifikasi yang dibutuhkan: mampu menampilkan keluaran numerik dan visual pada antarmuka pengguna, menyajikan normalized data, ANOVA, variance components, study variation, serta menyediakan laporan PDF yang dapat digunakan sebagai dokumentasi hasil analisis.

Tabel 3.**Pemilihan Spesifikasi Subfungsi Penampilan Hasil Analisis dalam Bentuk Tabel dan Diagram**

Subfungsi	Solusi		
	1	2	3
1. Tampilan hasil numerik	Print angka di console	Tabel statis	Tabel interaktif pada UI (renderDT)
2. Visualisasi hasil	Tidak ada chart	Chart dibuat manual di luar program	Chart otomatis pada UI (renderPlot)
3. Dokumentasi hasil	Tidak ada laporan	Ekspor manual terpisah	Laporan PDF melalui downloadHandler

Berdasarkan perbandingan tersebut, solusi yang paling sesuai adalah 3-3-3. Oleh karena itu, penyajian output diwujudkan dalam bentuk tabel interaktif, diagram pada UI, serta laporan PDF sehingga hasil analisis dapat dibaca dan didokumentasikan secara lebih konsisten.

2.2 Konsep Rancangan

2.2.1 Konsep Rancangan Pembacaan dan Normalisasi Data Hasil Pengukuran.

Program dirancang untuk menerima data hasil pengukuran dari file CSV/Excel maupun dari input manual. Data yang masuk tidak langsung dianalisis, tetapi terlebih dahulu dibaca sesuai sumber inputnya, kemudian dinormalisasi menjadi struktur baku Part–Operator–Trial–Value. Konsep ini dipilih agar data dari berbagai format tetap dapat diproses oleh jalur analisis yang sama. Pada subfungsi ini juga diletakkan validasi awal agar data yang tidak lengkap atau tidak sesuai format dapat dihentikan sebelum memasuki tahap perhitungan statistik.

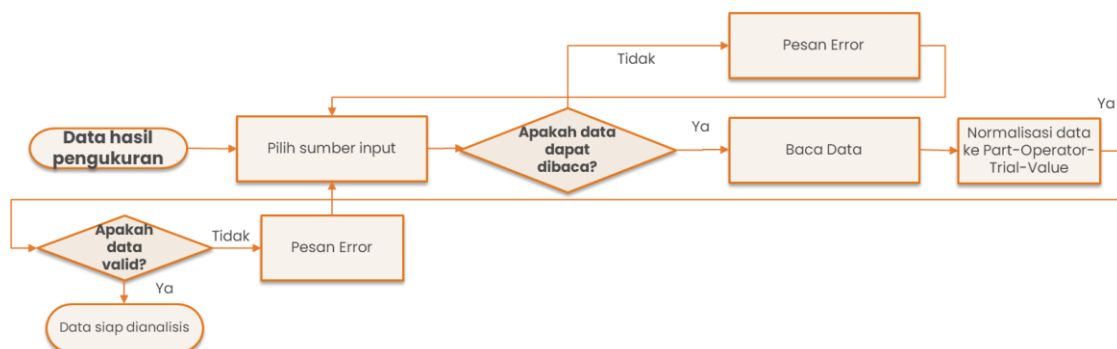
2.2.2 Konsep Rancangan Penampilan Hasil Analisis dalam Bentuk Tabel dan Diagram

Program dirancang untuk menyajikan hasil analisis dalam bentuk yang mudah dibaca oleh pengguna. Hasil numerik ditampilkan sebagai normalized data, tabel ANOVA, variance components, dan study variation, sedangkan hasil visual ditampilkan dalam bentuk diagram seperti Measurements by Part, R Chart, Xbar Chart, dan Interaction Plot. Selain itu, program juga menyediakan keluaran laporan dalam format PDF agar hasil analisis dapat didokumentasikan dan digunakan sebagai bukti perhitungan dalam workflow internal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN PERANCANGAN DAN PEMBUATAN PROGRAM

3.1 Perancangan dan Perwujudan Program Gauge R&R dengan Fungsi Pembacaan dan Normalisasi Data Hasil Pengukuran

3.1.1 Perancangan Program Gauge R&R dengan Fungsi Pembacaan dan Normalisasi Data Hasil Pengukuran



Gambar 1.

Diagram Alir Perancangan Program Gauge R&R dengan Fungsi Pembacaan dan Normalisasi Data Hasil Pengukuran

Perancangan program pembacaan dan normalisasi dimulai dari penerjemahan kebutuhan input menjadi struktur aplikasi. Bahasa R dipilih sebagai mesin komputasi statistik (R Core Team, 2024), sedangkan Shiny dipilih untuk mewujudkan antarmuka pengguna (Chang, Cheng, Allaire, Xie, dan McPherson, 2024). Pada tahap ini ditetapkan bahwa pembacaan data tidak boleh dilakukan secara manual setiap kali analisis dijalankan, sehingga dibutuhkan fungsi pembacaan khusus yang dapat menangani sumber input berbeda. Struktur program kemudian dipisahkan ke dalam modul readers, utils, analisis

crossed, analisis nested, dan chart agar tiap fungsi dapat dikembangkan dan diperiksa secara terpisah.

Pada tahap perancangan juga ditetapkan bahwa data mentah harus diubah lebih dahulu ke struktur Part–Operator–Trial–Value sebelum dianalisis. Keputusan ini penting karena perbedaan format input akan langsung memengaruhi hasil statistik. Oleh sebab itu, subfungsi pembacaan tidak hanya membaca data, tetapi juga menyiapkan, memeriksa, dan memvalidasi data sebelum tahap perhitungan.

3.1.2 Perwujudan Program Gauge R&R dengan Fungsi Pembacaan dan Normalisasi Data Hasil Pengukuran

Perwujudan program pembacaan dimulai ketika pengguna menekan tombol Run analysis pada UI. Program kemudian memeriksa sumber data melalui logika kondisional `if(input$data_source == "upload")` untuk menentukan apakah pembacaan dilakukan dari file yang diunggah atau dari input manual. Berdasarkan keputusan ini, program memanggil fungsi `read_measurement_source(...)` atau `read_measurement_text(...)`, sehingga pengguna tidak perlu mengubah kode setiap kali sumber input berbeda.

Data mentah yang telah dibaca selanjutnya dinormalisasi ke struktur Part–Operator–Trial–Value. Pada tahap ini Part, Operator, dan Trial diperlakukan sebagai faktor, sedangkan Value diperlakukan sebagai nilai numerik. Nilai yang kosong dibuang, lalu fungsi `validate(...)` memastikan bahwa data memang layak untuk dianalisis. Hasil dari tahap ini diwujudkan ke dalam aplikasi yang memiliki area input dan area output, dengan dukungan library seperti Shiny, DT, dplyr, tidyr, ggplot2, readxl, openxlsx, stringr, dan purrr. Penggunaan library tersebut juga didukung oleh ekosistem R dan tidyverse untuk pengolahan data (Wickham *et al.*, 2019).

```
1 library(shiny)
2 library(DT)
3 library(dplyr)
4 library(tidyr)
5 library(ggplot2)
6 library(readxl)
7 library(openxlsx)
8 library(stringr)
9 library(purrr)
```

Gambar 2.

Library Program

Contoh tampilan area input dan logika pembacaan data yang telah digeneralisasi ditunjukkan pada gambar berikut untuk memperlihatkan bahwa subfungsi pembacaan dan normalisasi telah diwujudkan ke dalam antarmuka program.

```
95 ui <- fluidPage(
96   titlePanel("Gauge R&R 'R' Program"),
97   sidebarLayout(
98     sidebarPanel(
99       radioButtons(
100         "data_source", "Input data",
101         choices = c("Upload file" = "upload", "Paste data" = "paste"),
102         selected = "upload"
103       ),
104       selectInput(
105         "analysis_design", "Analysis design",
106         choices = c("Crossed" = "crossed", "Nested" = "nested"),
107         selected = "crossed"
108       ),
109       selectInput(
110         "spec_mode", "Specification limits",
111         choices = c("One Spec Limit" = "one", "Two Spec Limits" = "two"),
112         selected = "two"
113     ),
```

Gambar 3.

Code Program Line 95-113

```

113     ),
114     conditionalPanel(
115       "input.spec_mode == 'one'",
116       selectInput(
117         "limit_side", "Limit to use",
118         choices = c("USL" = "usl", "LSL" = "ls1"),
119         selected = "us1"
120       ),
121       numericInput("one_limit_value", "Limit value", value = 12.5)
122     ),
123     conditionalPanel(
124       "input.spec_mode == 'two'",
125       numericInput("ls1", "LSL", value = 9.5),
126       numericInput("us1", "USL", value = 12.5)
127     ),
128     selectInput(
129       "format_type", "Input format",
130       choices = c(
131         "Auto / Long format" = "auto",

```

Gambar 4.

Code Program Line 113-131

```

131       "Auto / Long format" = "auto",
132       "Format A - Pasted / simple table" = "A",
133       "Format B - CSV / Instron-like" = "B",
134       "Format C - JOHO Excel (Report)" = "C",
135       "Format D - Vortex XLS (test)" = "D",
136       "Format E - Custom / mm sheet" = "E"
137     ),
138     selected = "auto"
139   ),
140   conditionalPanel(
141     "input.data_source == 'upload'",
142     fileInput("file_upload", "Upload CSV / XLSX / XLS", multiple = FALSE),
143     textInput("sheet_name", "Sheet name (optional)", value = "")
144   ),
145   conditionalPanel(
146     "input.data_source == 'paste'",
147     textAreaInput(
148       "pasted_text", "Paste data here",
149       rows = 10,
150       placeholder = "Paste tabular data here. Supports tab, comma, or semicolon separated data."

```

Gambar 5.

Code Program Line 131-150

```

150       placeholder = "Paste tabular data here. Supports tab, comma, or semicolon separated data."
151     )
152   ),
153   selectInput(
154     "layout_mode", "Sequence / layout mode",
155     choices = c(
156       "Auto detect" = "auto",
157       "Operator first" = "operator_first",
158       "Trial first" = "trial_first"
159     ),
160     selected = "auto"
161   ),
162   numericInput("n_parts", "Number of parts", value = 3, min = 1),
163   numericInput("n_operators", "Number of operators", value = 3, min = 1),
164   numericInput("n_trials", "Number of trials", value = 3, min = 1),
165   numericInput("sigma_multiplier", "Sigma multiplier", value = 6, min = 1, step = 1),
166   actionButton("run_analysis", "Run analysis", class = "btn-primary"),
167   br(), br(),
168   downloadButton("download_report_pdf", "Download PDF report")
169 )

```

Gambar 6.

Code Program Line 150-169

```

170   mainPanel(
171     tabsetPanel(
172       tabPanel("Normalized data", br(), DTOutput("normalized_table")),
173       tabPanel("ANOVA", br(), DTOutput("anova_table")),
174       tabPanel("Variance components", br(), DTOutput("varcomp_table"), br(), DTOutput("studyvar_table")),
175       tabPanel(
176         "Charts", br(),
177         plotOutput("plot_measurements", height = "350px"),
178         plotOutput("plot_r", height = "350px"),
179         plotOutput("plot_xbar", height = "350px"),
180         plotOutput("plot_interaction", height = "350px")
181       ),
182       tabPanel("Messages", br(), verbatimTextOutput("messages"))
183     )
184   )
185 )
186 )

```

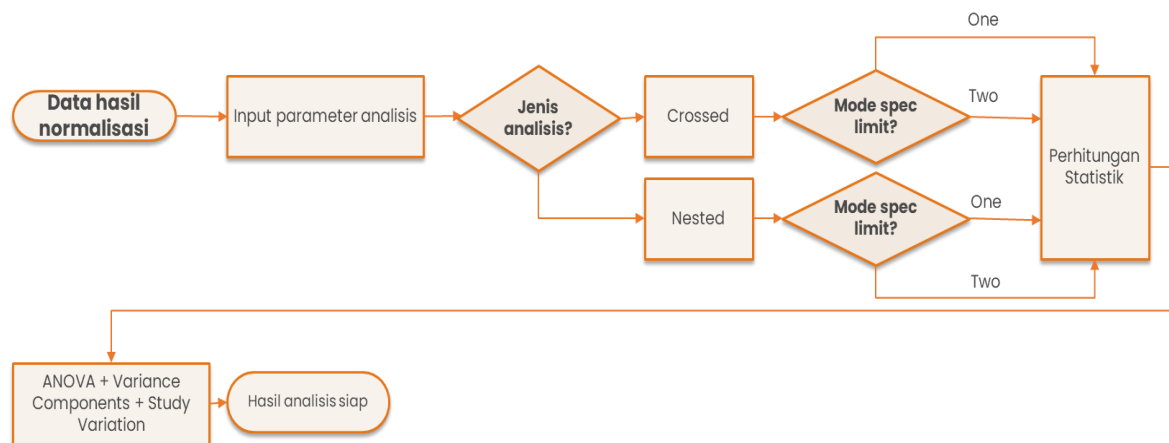
Gambar 7.

Code Program Line 170-186

Gambar 3. sampai Gambar 7. menunjukkan potongan alur program pada tahap pembacaan dan normalisasi data, mulai dari penerimaan input, pemilihan sumber data, pembacaan data, normalisasi struktur, hingga validasi data sebelum analisis dilakukan.

3.2 Perancangan dan Perwujudan Program Gauge R&R dengan Fungsi Perhitungan Crossed dan Nested

3.2.1 Perancangan Program Gauge R&R dengan Fungsi Perhitungan Crossed dan Nested



Gambar 8.

Diagram Alir Perancangan Program Gauge R&R dengan Fungsi Perhitungan Crossed dan Nested

Perancangan program perhitungan dimulai dari pemisahan logika statistik ke dalam empat modul, yaitu `crossed_one`, `crossed_two`, `nested_one`, dan `nested_two`. Pemisahan ini dipilih karena desain `crossed` dan `nested` memiliki struktur variasi yang berbeda, dan mode one spec limit serta two spec limits juga memengaruhi parameter toleransi yang digunakan. Dengan pemisahan modul ini, jalur analisis menjadi lebih mudah ditelusuri dan divalidasi.

3.2.2 Perwujudan Program Gauge R&R dengan Fungsi Perhitungan Crossed dan Nested

Perwujudan program perhitungan dimulai setelah data dinormalisasi. Program membaca `analysis_design` dan `spec_mode`, lalu membentuk `analysis_key` seperti `crossed_one` atau `nested_two` untuk memilih fungsi analisis yang sesuai. Pada studi `crossed`, model dasar yang digunakan dapat dinyatakan sebagai $y_{ijk} = \mu + P_i + O_j + (PO)_{ij} + \epsilon_{ijk}$, sehingga variasi dapat dipisahkan menjadi variasi part, operator, interaksi part-operator, dan error pengukuran. Dari model tersebut kemudian dibentuk tabel ANOVA, lalu dihitung variance components dan study variation. Pada studi `nested`, struktur perhitungan disesuaikan dengan kondisi ketika part tidak diukur oleh semua operator yang sama.

Implementasi mesin analisis dari ANOVA, variance components, dan study variation diwujudkan di dalam modul analisis statistik. Pemisahan jalur ini memastikan bahwa ketika pengguna memilih desain `crossed/nested` dan mode one/two spec limits, program langsung masuk ke modul perhitungan yang tepat tanpa harus mencampur seluruh kasus dalam satu script besar.

```

215 - analysis_result <- eventReactive(input$run_analysis, {
216   df <- raw_data()
217   req(nrow(df) > 0)
218
219   df <- df %>%
220     mutate(
221       Part = as.factor(Part),
222       Operator = as.factor(Operator),
223       Trial = as.factor(Trial),
224       Value = as.numeric(Value)
225     ) %>%
226     filter(!is.na(Value))
227
228   validate(
229     need(nrow(df) > 0, "No usable numeric values found."),
230     need(all(c("Part", "Operator", "Trial", "Value") %in% names(df)), "Normalized data must contain Part, Operator, Trial, and Value")
231   )

```

Gambar 9.

Code Program Line 215-231

Potongan kode pada Gambar 9. menunjukkan pembentukan jalur analisis berdasarkan parameter pengguna, yang selanjutnya menentukan pemanggilan modul crossed atau nested yang sesuai.

Pada bagian UI, pengguna dapat memilih desain analisis, mode batas spesifikasi one spec limit atau two spec limits, mengunggah file, dan menetapkan parameter dasar seperti jumlah part, operator, dan trial. Parameter ini kemudian diteruskan ke backend untuk menentukan jalur perhitungan statistik yang sesuai.

Gambar 10.

Tampilan UI Menu Utama

3.3 Perancangan dan Perwujudan Program Gauge R&R dengan Fungsi Penampilan Hasil Analisis dalam Bentuk Tabel dan Diagram

3.3.1 Perancangan Program Gauge R&R dengan Fungsi Penampilan Hasil Analisis dalam Bentuk Tabel dan Diagram

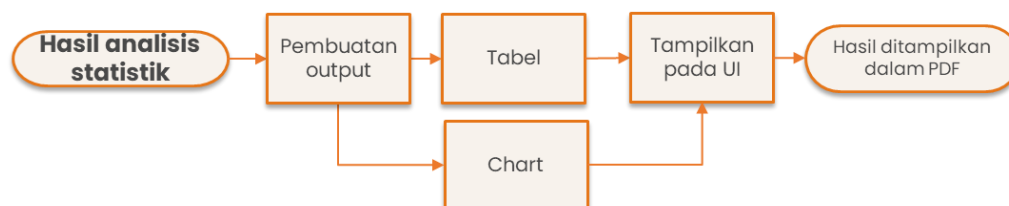
**Gambar 11.**

Diagram Alir Perancangan Program Gauge R&R dengan Fungsi Penampilan Hasil Analisis dalam Bentuk Tabel dan Diagram

Perancangan program penyajian output dimulai dari kebutuhan bahwa hasil analisis harus dapat dibaca langsung oleh pengguna tanpa membuka kode program. Oleh karena itu, keluaran numerik, visual, dan dokumentasi dirancang sejak awal agar berasal dari objek hasil analisis yang sama. Pada tahap ini dipilih penggunaan `renderDT(...)` untuk tabel interaktif, `renderPlot(...)` untuk diagram, dan `downloadHandler(...)` untuk laporan PDF.

3.3.2 Perwujudan Program Gauge R&R dengan Fungsi Penampilan Hasil Analisis dalam Bentuk Tabel dan Diagram

Perwujudan program output dilakukan dengan menampilkan normalized data, ANOVA, variance components, study variation, chart, messages, dan laporan PDF hasil analisis pada UI. Dengan demikian, hasil analisis tidak berhenti pada level perhitungan internal, tetapi langsung dapat dibaca, ditinjau, dan didokumentasikan oleh pengguna.

```

272 ~ output$normalized_table <- renderDT({
273 ~   req(analysis_result())
274 ~   datatable(analysis_result()$normalized, options = list(pageLength = 15, scrollX = TRUE))
275 ~ })
276 ~
277 ~ output$anova_table <- renderDT({
278 ~   req(analysis_result())
279 ~   datatable(analysis_result()$anova, options = list(dom = "t", scrollX = TRUE))
280 ~ })
281 ~
282 ~ output$varcomp_table <- renderDT({
283 ~   req(analysis_result())
284 ~   datatable(analysis_result()$variance_components, options = list(dom = "t", scrollX = TRUE))
285 ~ })
286 ~
287 ~ output$studyvar_table <- renderDT({
288 ~   req(analysis_result())
289 ~   datatable(analysis_result()$study_variation, options = list(dom = "t", scrollX = TRUE))
290 ~ })
291 ~
292 ~ output$plot_measurements <- renderPlot({
293 ~   req(analysis_result())
294 ~   plot_measurements_by_part(analysis_result()$normalized)
295 ~ })
296 ~
297 ~ output$plot_r <- renderPlot({
298 ~   req(analysis_result())
299 ~   plot_r_chart_by_operator(analysis_result()$normalized)
300 ~ })

```

Gambar 12.

Code Program Line 272-300

```

302 ~ output$plot_xbar <- renderPlot({
303 ~   req(analysis_result())
304 ~   plot_xbar_chart_by_operator(analysis_result()$normalized)
305 ~ })
306 ~
307 ~ output$plot_interaction <- renderPlot({
308 ~   req(analysis_result())
309 ~   if (analysis_result()$analysis_design == "crossed") {
310 ~     plot_part_operator_interaction(analysis_result()$normalized)
311 ~   }
312 ~ })
313 ~
314 ~ output$messages <- renderPrint({
315 ~   req(analysis_result())
316 ~   analysis_result()$messages
317 ~ })

```

Gambar 13.

Code Program Line 302-317

```

319 ~ output$download_report_pdf <- downloadHandler(
320 ~   filename = function() {
321 ~     paste0("gauge_rr_report_", Sys.Date(), ".pdf")
322 ~   },
323 ~   content = function(file) {
324 ~     req(analysis_result())
325 ~     build_pdf_report(file, analysis_result())
326 ~   }
327 ~ )
328 ~ }
329 ~
330 ~ shinyApp(ui, server)

```

Gambar 14.

Code Program Line 319-330

Potongan kode pada Gambar 12. Sampai Gambar 13. menunjukkan mekanisme penampilan keluaran hasil analisis pada UI dalam bentuk tabel, chart, dan messages. Selanjutnya, Gambar 14. menunjukkan mekanisme pembentukan laporan hasil analisis dalam format PDF, sehingga keluaran program tidak hanya dapat dibaca langsung pada UI tetapi juga dapat didokumentasikan.

Normalized data					ANOVA	Variance components	Charts	Messages
Show 15 entries					Search:			
	Part	Operator	Trial	Value				
1	1	A	1	10.2				
2	1	A	2	10.1				
3	1	A	3	10.3				
4	1	B	1	10.4				
5	1	B	2	10.3				
6	1	B	3	10.5				
7	1	C	1	10.1				
8	1	C	2	10				
9	1	C	3	10.2				
10	2	A	1	11.1				
11	2	A	2	11				
12	2	A	3	11.2				
13	2	B	1	11.3				

Gambar 15.

Tampilan UI Hasil Normalisasi Data

Normalized data					ANOVA	Variance components	Charts	Messages
	Source	Df	Sum_Sq	Mean_Sq	F_value	Pr(>F)		
1	Part	2	14.046667	7.023333	702.333333	0		
2	Operator	2	0.606667	0.303333	30.333333	0.000002		
3	Part:Operator	4	0.013333	0.003333	0.333333	0.851906		
4	Residuals	18	0.18	0.01				

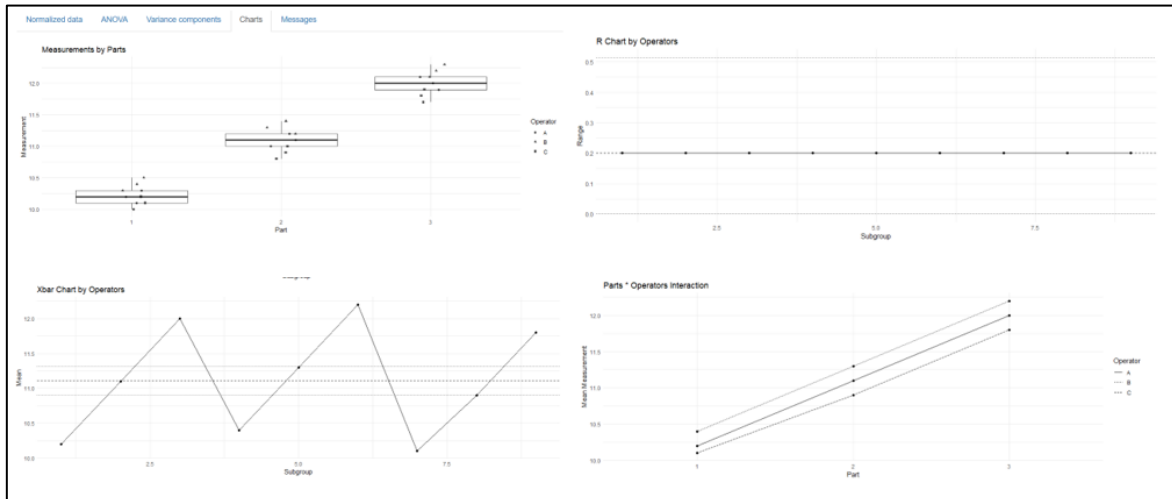
Gambar 16.

Tampilan UI Hasil Analisis ANOVA

Normalized data					ANOVA	Variance components	Charts	Messages
	Source	Variance_Component	Percent_Contribution					
1	Repeatability	0.00999999999999986	0.5917159763313615					
2	Reproducibility_Operator	0.03333333333333335	0.5917159763313615					
3	Operator_by_Part	0	0.5917159763313615					
4	Total_Gage_RR	0.04333333333333334	0.5917159763313615					
5	Part_to_Part	0.7799999999999998	0.5917159763313615					
6	Total_Variation	0.8233333333333314	0.5917159763313615					
	Source	SD	Study_Var	Percent_Study_Var	Percent_Tolerance			
1	Repeatability	0.09999999999999994	0.5999999999999996	7.692307692307696	19.999999999999999			
2	Reproducibility_Operator	0.1825741858350554	1.095445115010333	7.692307692307696	36.51483716701109			
3	Operator_by_Part	0	0	7.692307692307696	0			
4	Total_Gage_RR	0.2081665999466133	1.24899959967968	7.692307692307696	41.63331998932265			
5	Part_to_Part	0.8831760866327836	5.299056519796702	7.692307692307696	176.6352173265567			
6	Total_Variation	0.9073771725877455	5.444263035526474	7.692307692307696	181.4754345175491			

Gambar 17.

Tampilan UI Hasil Analisis Variance Components

**Gambar 18.**

Tampilan UI Diagram Hasil Perhitungan Gauge R&R

Gambar 15. sampai Gambar 18. menunjukkan bahwa keluaran numerik dan visual berhasil diwujudkan pada UI dan dapat digunakan langsung untuk membaca hasil analisis sistem pengukuran.

Pengujian dan validasi dilakukan dengan menggunakan dataset yang sama pada program dan referensi, kemudian membandingkan struktur normalized data, nilai utama ANOVA, variance components, dan pola chart. Jika ditemukan selisih, penelusuran dilakukan pada urutan data, logika normalisasi, model analisis, dan pembentukan chart, lalu modul yang terkait direvisi dan diuji kembali. Dengan pendekatan ini, program yang diwujudkan tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga diperkuat konsistensinya terhadap referensi.

Program menghasilkan keluaran utama berupa normalized data, tabel ANOVA, variance components, study variation, serta chart interpretatif seperti Measurements by Part, Xbar/R Chart, dan Interaction Plot. Keluaran-keluaran ini dipilih karena merupakan hasil yang dibutuhkan pengguna untuk membaca performa sistem pengukuran dan menafsirkan apakah variasi lebih banyak disebabkan oleh part atau oleh sistem pengukuran itu sendiri.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan perwujudan, program Gauge R&R berbasis R berhasil dikembangkan untuk mendukung analisis sistem pengukuran pada proses verifikasi produk injektor. Program ini mampu membaca data hasil pengukuran melalui input file maupun input manual, kemudian menormalisasi data ke struktur Part–Operator–Trial–Value dan memvalidasinya sebelum analisis dilakukan melalui fungsi `read_measurement_source(...)`, `read_measurement_text(...)`, dan `validate(...)`. Selain itu, program mampu melakukan perhitungan crossed dan nested dengan mempertimbangkan mode one spec limit maupun two spec limits melalui modul `crossed_one`, `crossed_two`, `nested_one`, dan `nested_two`. Hasil analisis juga dapat disajikan pada antarmuka pengguna dalam bentuk tabel normalized data, ANOVA, variance components, study variation, serta chart melalui fungsi `renderDT(...)` dan `renderPlot(...)`. Hasil tersebut juga dapat didokumentasikan dalam laporan PDF melalui fungsi `downloadHandler(...)`. Dengan demikian, program yang diwujudkan dapat menjadi alternatif analisis internal yang lebih fleksibel, konsisten, dan mendukung kebutuhan verification engineering.

4.2 Saran

Program Gauge R&R berbasis R yang diwujudkan pada penelitian ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut sesuai kebutuhan analisis di lapangan. Library yang digunakan pada implementasi saat ini, seperti Shiny, readxl, openxlsx, dplyr, tidyr, DT, dan ggplot2, tidak harus bersifat tetap, tetapi dapat diperluas atau diganti sesuai kebutuhan fungsi tambahan. Pengembangan berikutnya dapat diarahkan pada penanganan format data yang lebih beragam, metode statistik yang lebih khusus, visualisasi yang lebih spesifik, serta mekanisme pelaporan yang lebih detail agar program semakin sesuai dengan kebutuhan pengguna dan workflow internal perusahaan.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. AIAG. (2010). *Measurement Systems Analysis (MSA)*, 4th Edition. Southfield, MI: Automotive Industry Action Group.
2. Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., & McPherson, J. (2024). shiny: Web Application Framework for R. R package version 1.9.1. (<https://CRAN.R-project.org/package=shiny>). Diakses tanggal 6 Mei 2026
3. Minitab Support. (2026). *Methods and formulas for gage R&R table in Crossed Gage R&R Study*. (<https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/crossed-gage-r-r-study/methods-and-formulas/gage-r-r-table/>). Diakses tanggal 6 Mei 2026.
4. Montgomery, D. C. (2019). *Introduction to Statistical Quality Control*, 8th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons.
5. R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (<http://www.R-project.org/>). Diakses tanggal 6 Mei 2026
6. Soares, W. d. O. S., Peruchi, R. S., Silva, R. A. V., & Rotella Junior, P. (2022). Gage R&R studies in measurement system analysis: A systematic literature review. *Quality Engineering*, 34(3), 382–403. <https://doi.org/10.1080/08982112.2022.2069505>
7. The gageRR Authors. (2024). *Analyzing Gage Repeatability and Reproducibility with gageRR*. CRAN package vignette. (https://cran.r-project.org/web/packages/gageRR/vignettes/gageRR_vignette.html). Diakses tanggal 6 Mei 2026.
8. Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K., & Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>