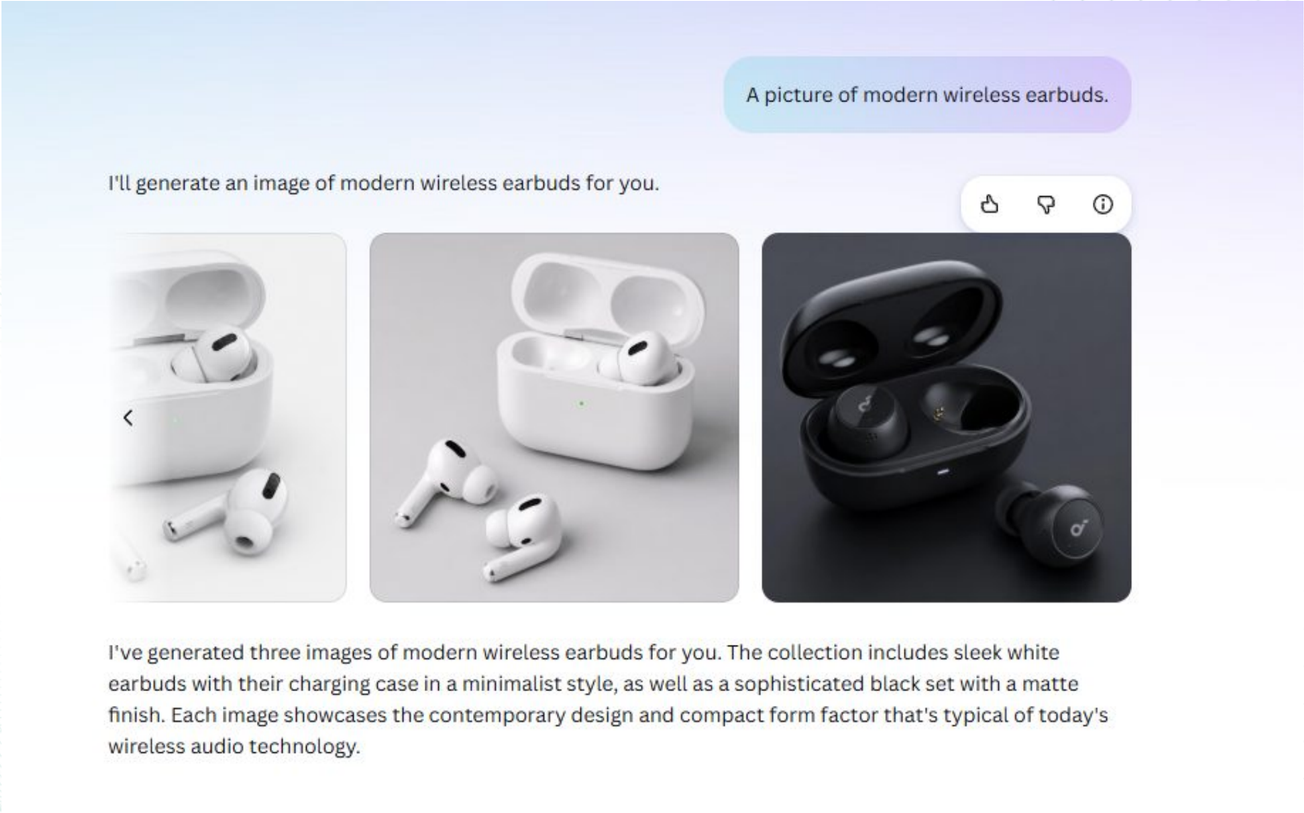
Wireless Earbuds

Turning Innovation Into
Everyday Value.

Mr.Hironobu Chaikasem 2610717302048
Computer Engineering and Artificial Intelligence

การสร้างรูปด้วย AI
(AI Image Generation)

Prompt แรก (Zero-shot Prompt)



ผลลัพธ์ของ Prompt แรก (Zero-shot Result)

การถาม-ตอบ / ปรับแต่ง Prompt (Few-shot & Context Prompt)

Commercial product screenshot of sleek matte-black wireless earbuds sitting inside an open minimalist charging case, floating in mid-air, neon blue and violet atmospheric backlighting, shallow depth of field, 8k resolution, highly detailed product photography, futuristic tech aesthetic.

I'll generate that commercial product shot with the futuristic aesthetic and dramatic lighting you described.

Perfect! I've created three stunning commercial product shots featuring sleek matte-black wireless earbuds in their minimalist charging case. Each image captures that futuristic tech aesthetic you wanted, with dramatic neon blue and violet atmospheric backlighting creating a high-end, cinematic look. The earbuds appear to float in mid-air with beautiful depth of field, giving them that premium product photography feel ideal for marketing materials.

ผลลัพธ์ ของ **Prompt** ใหม่

สะท้อนการเรียนรู้ของการได้มาของ ผลลัพธ์แรก กับ ผลลัพธ์ใหม่

Zero-shot ให้ภาพตรงตามคำศัพท์ แต่ไม่อบอุ่น/ดึงดูดไม่พอ

ให้ภาพหูฟังสีดำด้าน ลอยเหนือกล่องเคส มีแสงนีออนสีฟ้า-ม่วง มีมิติความชัดลึก (Bokeh) ดูเหมือนภาพโฆษณาระดับมืออาชีพ

การอธิบายความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์
(Desmos Calculator)

Prompt แรก (Zero-shot Prompt)

ขอสมการกราฟคลื่นเสียง attenuation สำหรับหูฟังตัดเสียงรบกวน (ANC) นำไปใส่ใน Desmos

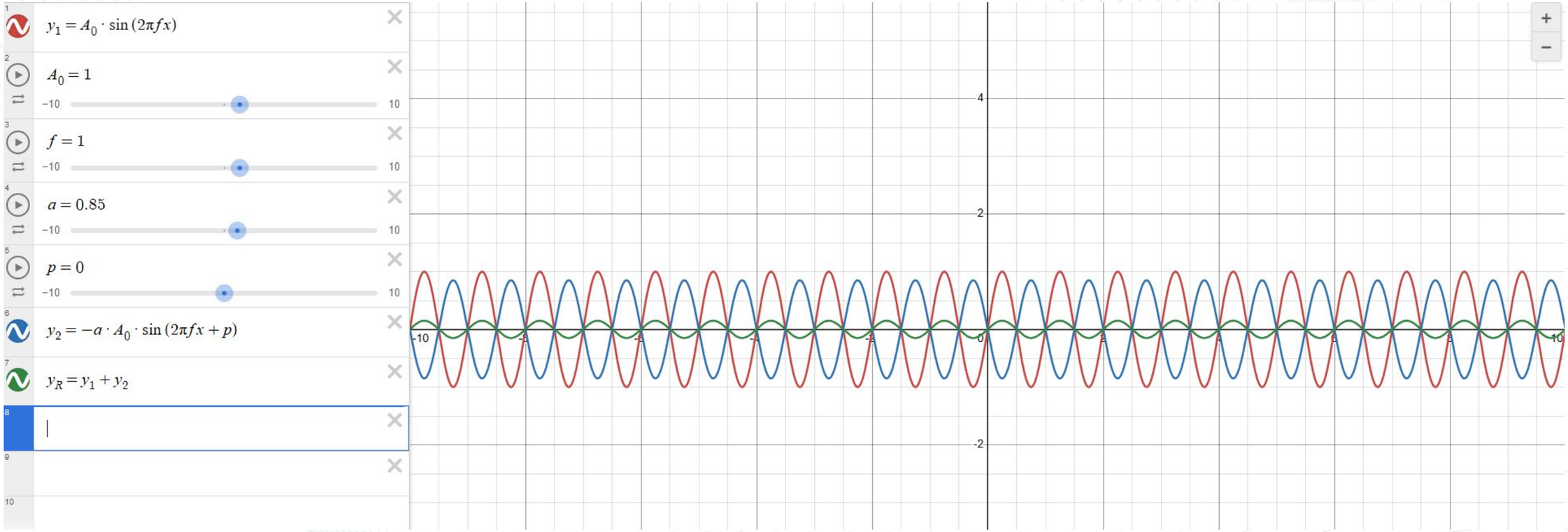
สมการจำลองการถดถอยของคลื่นเสียง (Attenuation) เมื่อผ่านระบบขจัดเสียงรบกวนแบบแอคทีฟ (Active Noise Cancellation: ANC) สำหรับนำไปวางใน Desmos โดยสมการนี้จะแสดง **คลื่นเสียงดั้งเดิม (Original Wave)**, **คลื่นเสียงต้าน/คลื่นหักลบ (Anti-Noise Wave)**, และ **ผลลัพธ์ของเสียงที่เหลืออยู่หลังหักลบ (Attenuated Wave)**

คัดลอกสมการไปวางใน Desmos

ก๊อปปี้บรรทัดสมการด้านล่างนี้ ทีละบรรทัด เข้าไปในช่องพิมพ์สมการของ Desmos ได้เลย:

1. **คลื่นเสียงดั้งเดิม (ความถี่ f, แอมพลิจูด A_0):**
   `y_1 = A_0 \cdot \sin(2\pi f x)`
2. **ประสิทธิภาพการตัดเสียงของ ANC (ค่า 0 ถึง 1, โดย 1 คือตัดเสียงได้ 100%):**
   `a = 0.85`
3. **ความคลาดเคลื่อนของเฟสตัดเสียง (Phase Shift Inaccuracy ในหน่วยเรเดียน):**
   `p = 0`
4. **คลื่นเสียงต้านจากหูฟัง (Anti-Noise Wave):**
   `y_2 = -a \cdot A_0 \cdot \sin(2\pi f x + p)`
5. **ผลลัพธ์คลื่นเสียงหลังตัดเสียง (Attenuated Wave / Residual Noise):**
   `y_R = y_1 + y_2`

ผลลัพธ์ของ **Prompt** แรก **(Zero-shot Result)**



การถาม-ตอบ / ปรับแต่ง Prompt (Few-shot & Context Prompt)

เพิ่มการอธิบายระบบ Active Noise Cancellation ของ Wireless Earbuds โดยมี
1.คลื่นเสียงรบกวนภายนอก N(x) = A * sin(w * x)
2.คลื่นต้าน phase-inverted A(x) = -A * sin(w * x - phi) โดยใช้

ชุดสมการสำหรับคัดลอกวางใน Desmos ได้ทันที พร้อมการตั้งค่าตัวแปร (Sliders) และคำอธิบายการทำงานของระบบ Active Noise Cancellation (ANC) ในหูฟังไร้สาย

ชุดโค้ดสมการสำหรับ Desmos (Copy-Paste)

คัดลอกสมการแต่ละบรรทัดด้านล่างไปวางในช่องใส่สมการของ Desmos ได้เลย:

Plaintext

```
N(x) = A \cdot \sin(w \cdot x)
```

Plaintext

```
A_n(x) = -A \cdot \sin(w \cdot x - \phi)
```

Plaintext

```
R(x) = N(x) + A_n(x)
```

Plaintext

```
A = 1
```

Plaintext

```
w = 5
```

Plaintext

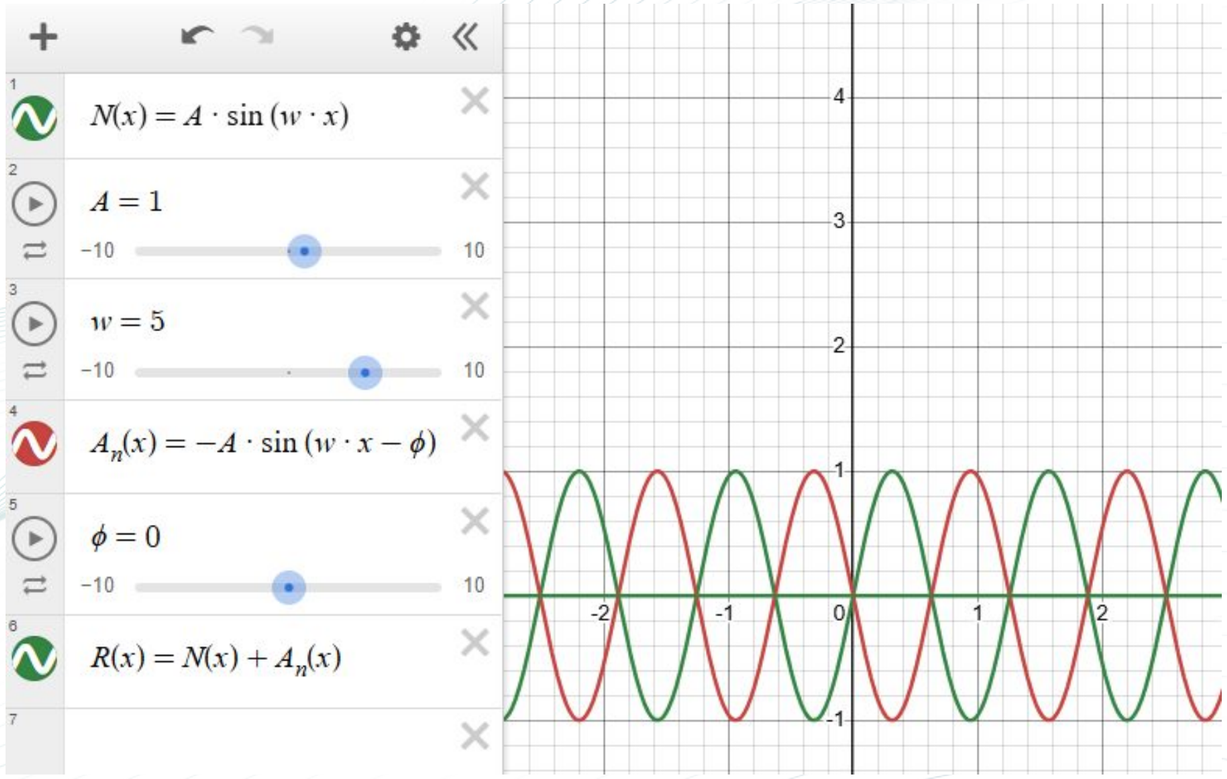
```
\phi = 0
```

(หมายเหตุ: เปลี่ยนชื่อฟังก์ชันคลื่นต้านเป็น $A_n(x)$ เพื่อไม่ให้ซ้ำกับตัวแปรแอมพลิจูด A)

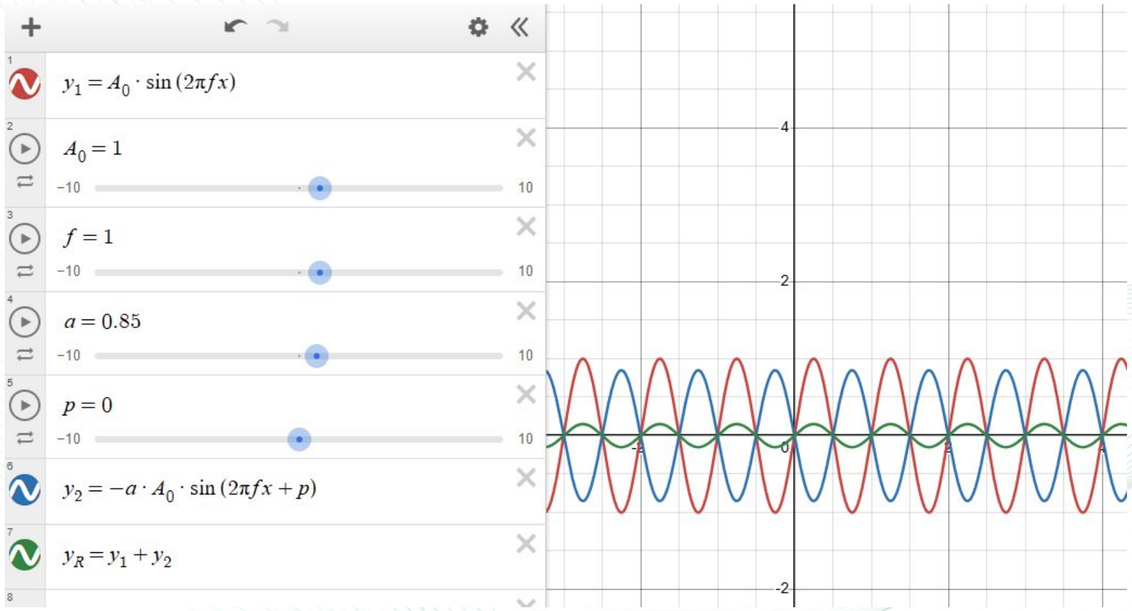
ผลลัพธ์ ของ **Prompt** ใหม่

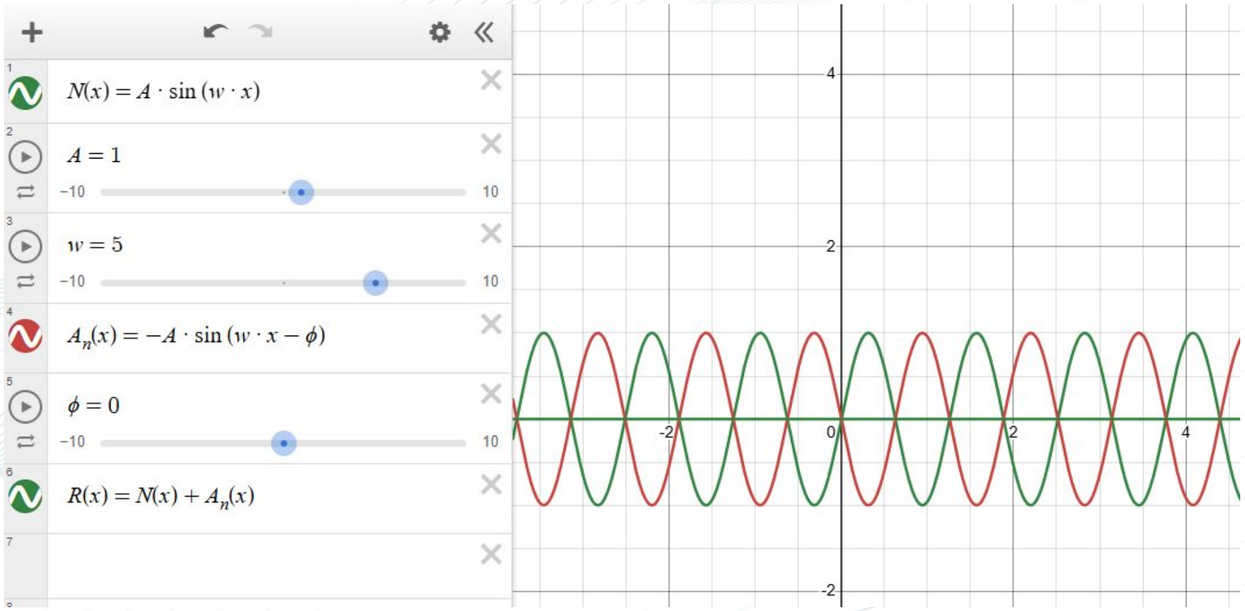
รายละเอียดการทำงานของแต่ละส่วนใน Desmos

1. **คลื่นเสียงรบกวนภายนอก $N(x)$:**
   - เปรียบเสมือนเสียงมลภาวะทางเสียงภายนอก เช่น เสียงเครื่องยนต์ เสียงแอร์ หรือเสียงพัดลม
   - A ควบคุมระดับความดัง (Amplitude)
   - w ควบคุมระดับความถี่เสียง (Frequency)
2. **คลื่นต้านหักล้าง $A_n(x)$:**
   - เครื่องหมายลบด้านหน้าเป็นการสั่ง **Invert เฟส 180°** เพื่อให้ยอดคลื่นตรงข้ามกับท้องคลื่นของเสียงรบกวน
   - ตัวแปร ϕ (Phi) ทำหน้าที่เป็น **Phase Shift Slider** ไว้จำลองความล่าช้า (Latency) ในการประมวลผลของชิป DSP ในหูฟังไร้สาย
3. **คลื่นผลลัพธ์ $R(x)$ (Residual Noise):**
   - คือเสียงจริงที่หลงเหลือและผ่านเข้าไปถึงแก้วหูของผู้ใช้
   - **สภาวะ สมบูรณ์แบบ ($\phi = 0$):** กราฟ $R(x)$ จะกลายเป็นเส้นตรงทับแกน X ($y = 0$) พอดี หมายถึง เสียงรบกวนโดนหักล้างหมดจด 100%
   - **สภาวะ มี Delay ($\phi \neq 0$):** ลองเลื่อน Slider ϕ ออกจาก 0 จะเห็นว่ากราฟ $R(x)$ เริ่มมีลูกคลื่นปรากฏขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายิ่งหูฟังประมวลผลช้า เสียงรบกวนก็จะยิ่งเล็ดลอดเข้ามาได้มากขึ้น



สะท้อนการเรียนรู้ของการได้มาของ ผลลัพธ์แรก กับ ผลลัพธ์ใหม่





ให้สมการ y = \sin(x) หรือ y = e^{-x} แบบโดดๆ ซึ่งไม่ได้แสดงการหักลบของคลื่นเสียง (Destructive Interference) หรือความถี่ของเสียงรบกวนอย่างชัดเจน

ได้ชุดสมการพร้อมแถบปรับค่า (Slider phi) เมื่อปรับ phi = 0 คลื่นผลลัพธ์ R(x) จะกลายเป็นเส้นตรง y=0 แสดงการหักลบกันสมบูรณ์แบบ

การสร้าง Diagrams จาก Mermaid Code (Mermaid.ai)

Prompt แรก (Zero-shot Prompt)

เขียน Mermaid code แสดงการทำงานของ Wireless Earbuds

นี่คือ Mermaid code สำหรับแสดงขั้นตอนและกระบวนการทำงานของ Wireless Earbuds (หูฟังไร้สาย) ตั้งแต่การเชื่อมต่อ Bluetooth ไปจนถึงการประมวลผลเสียงออกมาเป็น Waveform ครับ

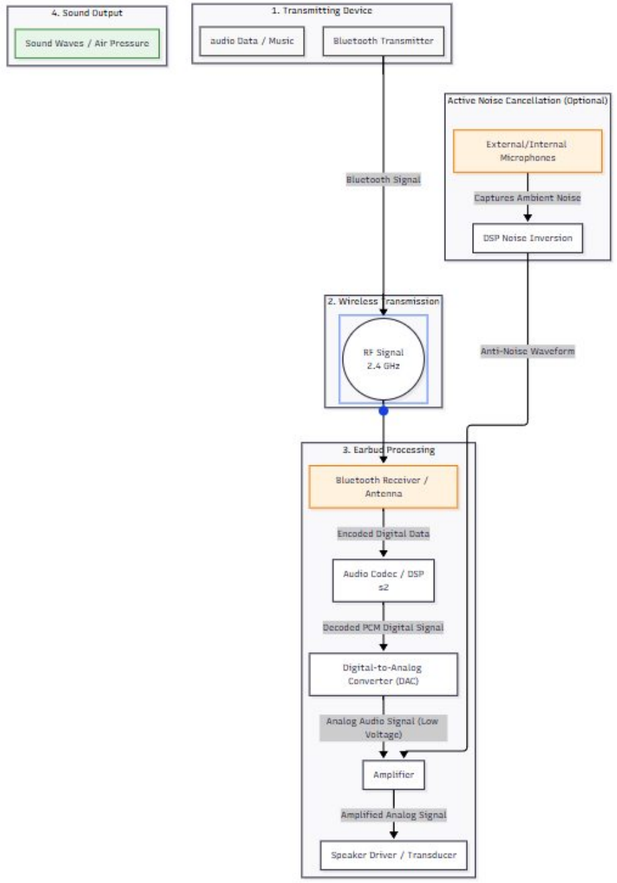
ข้อมูลโค้ด

```
graph TD
    %% Define Styles
    classDef device fill:#f9f9f9,stroke:#333,stroke-width:2px;
    classDef process fill:#e1f5fe,stroke:#0288d1,stroke-width:2px;
    classDef hardware fill:#fff3e0,stroke:#f57c00,stroke-width:2px;
    classDef output fill:#e8f5e9,stroke:#388e3c,stroke-width:2px;

    subgraph Source["1. Transmitting Device"]
        AudioData[" audio Data / Music"] :::device
```

ผลลัพธ์ของ Prompt แรก (Zero-shot Result)

Code Auto-Update Docs

```
---
config:
  layout: elk
---
graph TD
    classDef device fill:#f9f9f9,stroke:#333,stroke-width:2px
    classDef process fill:#e1f5fe,stroke:#0288d1,stroke-width:2
    classDef hardware fill:#fff3e0,stroke:#f57c00,stroke-width:
    classDef output fill:#e8f5e9,stroke:#388e3c,stroke-width:2p

    subgraph Source["1. Transmitting Device"]
        AudioData[" audio Data / Music"]
        BT_Tx["Bluetooth Transmitter"]
    end

    subgraph Transmission["2. Wireless Transmission"]
        RF_Signal(("RF Signal <br> 2.4 GHz"))
        BT_Tx -- "Bluetooth Signal" --> RF_Signal
    end

    subgraph Earbud["3. Earbud Processing"]
        BT_Rx["Bluetooth Receiver / Antenna"]
        Codec["Audio Codec / DSP <br>s2"]
        DAC["Digital-to-Analog Converter (DAC)"]
        Amp["Amplifier"]
        Driver["Speaker Driver / Transducer"]

        RF_Signal --> BT_Rx
        BT_Rx -- "Encoded Digital Data" --> Codec
        Codec -- "Decoded PCM Digital Signal" --> DAC
        DAC -- "Analog Audio Signal (Low Voltage)" --> Amp
        Amp -- "Amplified Analog Signal" --> Driver
    end

    subgraph ANC_Module["Active Noise Cancellation (Optional)"]
        Mic["External/Internal Microphones"]
        DSP_ANC["DSP Noise Inversion"]

        Mic -- "Captures Ambient Noise" --> DSP_ANC
```



การถาม-ตอบ / ปรับแต่ง Prompt (Few-shot & Context Prompt)

อยากให้เพิ่ม Mermaid Code ประเภท sequenceDiagram แสดงกระบวนการทำงานของ Wireless Earbuds ดังนี้:
1. การเชื่อมต่อ Bluetooth (Pairing/Handshake) ระหว่าง Smartphone และ Earbuds (Primary/Secondary)
2. การส่งสัญญาณ A2DP Audio Stream
3. การประมวลผลภายในหูฟัง: รับสัญญาณ ผ่าน DSP Engine เปิดระบบ ANC ส่งไปยัง Speaker Driver
ขอเป็นบล็อกโค้ด ```mermaid เท่านั้น

ข้อมูลโค้ด

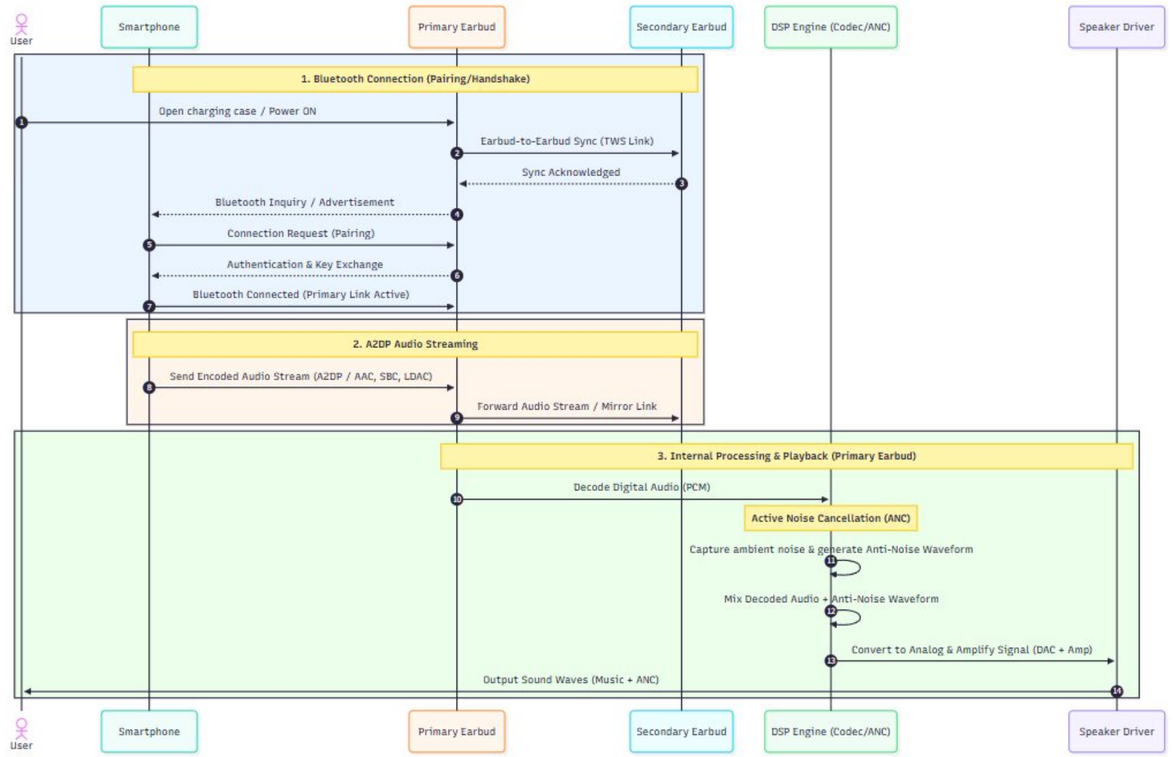
```
sequenceDiagram
    autonumber
    actor User
    participant Phone as Smartphone
```

ผลลัพธ์ ของ **Prompt** ใหม่

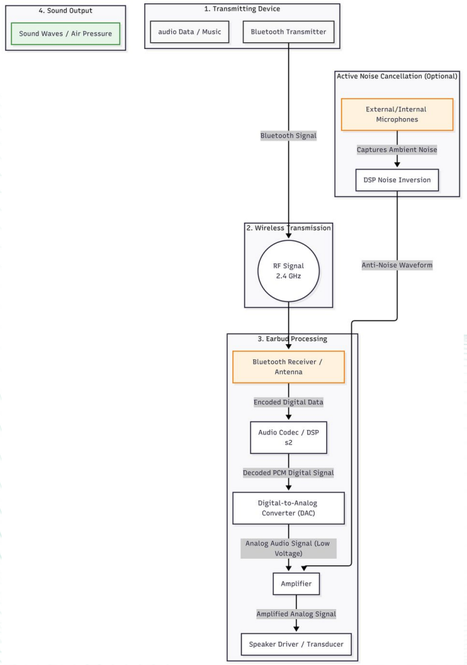
Code Auto-Update Docs

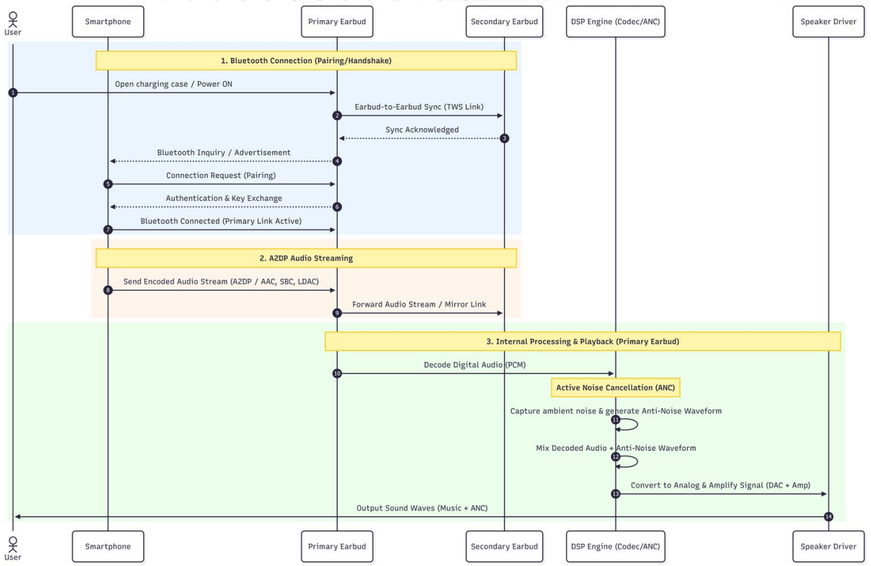
```
sequenceDiagram
    autonumber
    actor User
    participant Phone as Smartphone
    participant PE as Primary Earbud
    participant SE as Secondary Earbud
    participant DSP as DSP Engine (Codec/ANC)
    participant Driver as Speaker Driver

    %% 1. Bluetooth Pairing & Handshake
    rect rgb(235, 245, 255)
        note over Phone, SE: 1. Bluetooth Connection (Pairing/H
        User->>PE: Open charging case / Power ON
        PE->>SE: Earbud-to-Earbud Sync (TWS Link)
        SE-->>PE: Sync Acknowledged
        PE-->>Phone: Bluetooth Inquiry / Advertisement
        Phone->>PE: Connection Request (Pairing)
        PE-->>Phone: Authentication & Key Exchange
        Phone->>PE: Bluetooth Connected (Primary Link Active)
    end

    %% 2. A2DP Audio Streaming
    rect rgb(255, 245, 235)
        note over Phone, SE: 2. A2DP Audio Streaming
        Phone->>PE: Send Encoded Audio Stream (A2DP / AAC, SBC,
        PE->>SE: Forward Audio Stream / Mirror Link
    end

    %% 3. Internal Earbud Processing
    rect rgb(235, 255, 235)
        note over PE, Driver: 3. Internal Processing & Playback
        PE->>DSP: Decode Digital Audio (PCM)

        note over DSP: Active Noise Cancellation (ANC)
        DSP->>DSP: Capture ambient noise & generate Anti-Noise
        DSP->>DSP: Mix Decoded Audio + Anti-Noise Waveform

        DSP->>Driver: Convert to Analog & Amplify Signal (DAC +
```

Redux Color th



สะท้อนการเรียนรู้ของการได้มาของ ผลลัพธ์แรก กับ ผลลัพธ์ใหม่





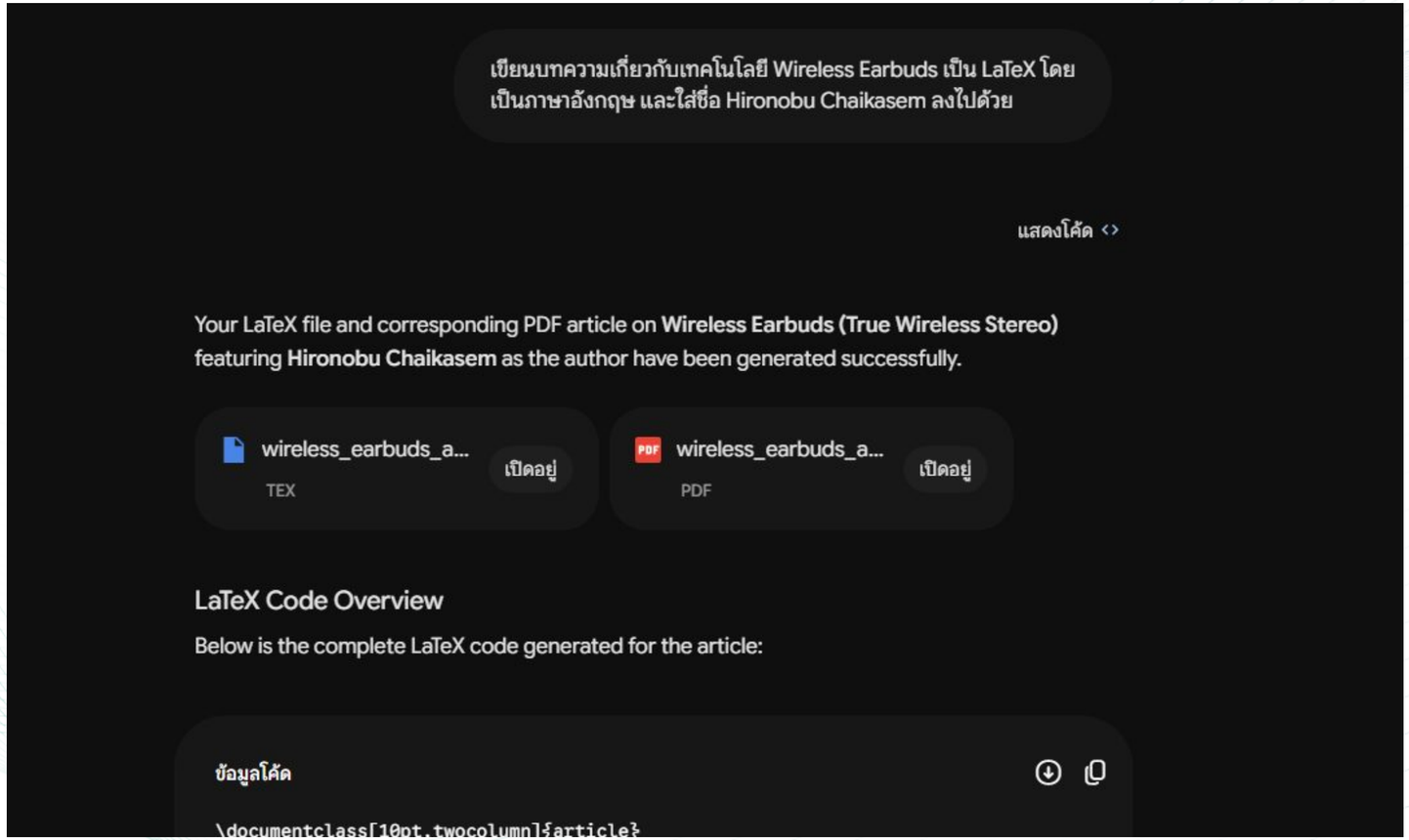
ได้ไดอะแกรมแบบง่าย เช่น [Phone] -> [Earbuds] -> [Speaker] ซึ่งขาดรายละเอียดเชิงเทคนิคและสถาปัตยกรรมบลูทูธ

การระบุโครงสร้าง Sequence Diagram และระบุ Actor/Participant แต่ละฝ่าย ช่วยให้ได้โค้ด Mermaid ที่แสดงวิศวกรรมระบบ (Systems Architecture) ได้อย่างเป็นมืออาชีพ

การสร้างบทความ หรือ หนังสือ จาก

LaTeX (Overleaf)

Prompt แรก (Zero-shot Prompt)



ผลลัพธ์ของ Prompt แรก (Zero-shot Result)

main.tex

Code Visual Editing

```latex
\documentclass[10pt,twocolumn]{article}
\usepackage[margin=0.75in]{geometry}
\usepackage{amsmath,amsfonts,amssymb}

\title{\textbf{Evolution, Architecture, and Future Horizons of True Wireless Stereo (TWS) Audio Systems}}
\author{\textbf{Hironobu Chaikasem} \\
\small Department of Consumer Electronics \& Embedded Systems \\
\small \texttt{hironobu.chaikasem@example.com}}
\date{\today}

\begin{document}

\maketitle

\begin{abstract}
Wireless earbuds, commonly referred to as True Wireless Stereo (TWS) devices, have transitioned from niche acoustic novelties to ubiquitous personal computing platforms over the past decade. This article provides a comprehensive technical overview of modern wireless earbud architecture, exploring fundamental advancements in short-range RF communication, digital signal processing (DSP), advanced acoustic transducer design, active noise cancellation (ANC), and battery management systems. Furthermore, we examine emerging paradigms including bio-sensing integration, spatial audio rendering, AI-driven contextual listening, and the transition toward Bluetooth LE Audio with the LC3 codec.
\end{abstract}

\section{Introduction}
The consumer audio landscape has undergone a radical paradigm shift since the elimination of the traditional 3.5mm analog headphone jack from flagship smartphone architectures around 2016. The resulting market vacuum catalyzed rapid innovation in miniaturized, wire-free audio reproduction systems, leading to the proliferation of True Wireless Stereo (TWS) earbuds.

Unlike legacy Bluetooth headphones where a physical cable bridges the left and right drivers, TWS architecture requires two physically decoupled endpoints capable of achieving precise sub-millisecond audio synchronization while communicating wirelessly with a host source device (e.g., smartphone, smartwatch). Today's TWS systems serve not only as acoustic transducers but as sophisticated ultra-low-power Edge-AI compute nodes.

\section{System Architecture}
A modern TWS earbud represents a marvel of high-density System-in-Package (SiP) engineering. Each acoustic node incorporates several critical hardware subsystems within a shell volume typically under $5$--$8\text{ cm}^3$.
```

Recompile

Evolution, Architecture, and Future Horizons of True Wireless Stereo (TWS) Audio Systems

Hironobu Chaikasem
Department of Consumer Electronics & Embedded Systems
hironobu.chaikasem@example.com

September 8, 2026

Abstract

Wireless earbuds, commonly referred to as True Wireless Stereo (TWS) devices, have transitioned from niche acoustic novelties to ubiquitous personal computing platforms over the past decade. This article provides a comprehensive technical overview of modern wireless earbud architecture, exploring fundamental advancements in short-range RF communication, digital signal processing (DSP), advanced acoustic transducer design, active noise cancellation (ANC), and battery management systems. Furthermore, we examine emerging paradigms including bio-sensing integration, spatial audio rendering, AI-driven contextual listening, and the transition toward Bluetooth LE Audio with the LC3 codec.

1 Introduction

The consumer audio landscape has undergone a radical paradigm shift since the elimination of the traditional 3.5mm analog headphone jack from flagship smartphone architectures around 2016. The resulting market vacuum catalyzed rapid innovation in miniaturized, wire-free audio reproduction systems, leading to the proliferation of True Wireless Stereo (TWS) earbuds.

Unlike legacy Bluetooth headphones where a physical cable bridges the left and right drivers, TWS architecture requires two physically decoupled endpoints capable of achieving precise sub-millisecond audio synchronization while communicating wirelessly with a host source device (e.g., smartphone, smartwatch). Today's TWS systems serve not only as acoustic transducers but as sophisticated ultra-low-power Edge-AI compute nodes.

2 System Architecture

A modern TWS earbud represents a marvel of high-

2.1 RF Communication and Synchronous Topology

Early TWS iterations utilized a primary-secondary relay architecture. The host transmitter dispatched a stereo Bluetooth stream (typically via A2DP) to the primary earbud, which decoded the packet, routed the left channel, re-encoded the right channel, and forwarded it across the human head to the secondary earbud. This approach suffered from extreme latency, dynamic body-attenuation packet losses, and asymmetrical power draw.

Modern TWS architectures utilize dual-initiator sniffing and direct transmission topologies. Both earbuds simultaneously listen to or establish concurrent synchronous links with the host device. Key protocol improvements include:

- **Qualcomm TrueWireless Mirroring / Dual Connect**: The source maintains a direct link with one earbud while the secondary earbud passively sniffs the encrypted RF frames.
- **Bluetooth LE Audio (LC3 Codec)**: Operating over Bluetooth 5.2[1], Low Energy Isochronous Channels (LEIS) enable natively synchronized multi-stream audio to multiple independent endpoints with significantly lowered bitrates and power consumption.

2.2 Audio Processing and DSP Framework

At the core of the TWS processor lies an integrated System-on-Chip (SoC) combining a multi-core RISC/ARM application processor, dedicated audio DSPs, and high-performance fixed-point hardware accelerators.

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} b_k x[n-k] - \sum_{l=1}^{N} a_l y[n-l] \qquad (1)$$

Digital filter pipelines execute adaptive equalizers, dy-

การถาม-ตอบ / ปรับแต่ง Prompt (Few-shot & Context Prompt)

อยากให้ทำในรูปแบบบทความวิชาการ (IEEE Format) หัวข้อ "Evolution and Technical Architecture of Modern Wireless Earbuds"
โดยมีเงื่อนไขดังนี้:
1. ใช้ documentclass{article} พร้อม package hyperref, booktabs, graphicx
2. มี Abstract, Keywords, Section: Introduction, Core Technologies (Bluetooth Codecs, ANC, Battery Management)
3. มี ตารางเปรียบเทียบ Codecs (SBC vs AAC vs LDAC) โดยใช้ booktabs
4. ให้โค้ดพร้อมคอมไพล์บน Overleaf ได้ทันทีโดยไม่ติด Error
5.ใส่ชื่อ Mr.Hironobu Chaikasem
Computer Engineering and Artificial Intelligenceลงไปด้วย

นี่คือโค้ด **LaTeX** สมบูรณ์สำหรับบทความวิชาการ (IEEE Style / Double-Column) ในหัวข้อ **"Evolution and Technical Architecture of Modern Wireless Earbuds"**

โค้ดนี้ถูกออกแบบและจัดเตรียมแพ็กเกจให้ถูกต้องตามเงื่อนไขทุกประการ สามารถนำไปคัดลอกลงใน Overleaf แล้วกด **Recompile** ได้ทันทีโดยไม่ติด Error ครับ

ข้อมูลโค้ด

```
\documentclass[10pt,twocolumn]{article}
```

ผลลัพธ์ ของ **Prompt** ใหม่

main.tex

```latex
\documentclass[10pt,twocolumn]{article}

% --- Essential Packages ---
\usepackage[margin=0.75in]{geometry}
\usepackage{amsmath,amsfonts,amssymb}
\usepackage{graphicx}
\usepackage{booktabs}
\usepackage{hyperref}

% --- Hyperref Setup ---
\hypersetup{
    colorlinks=true,
    linkcolor=blue,
    citecolor=blue,
    urlcolor=blue
}

% --- Article Metadata ---
\title{\Large\bfseries Evolution and Technical Architecture of Modern Wireless Earbuds}

\author{%
  \textbf{Mr. Hironobu Chaikasem} \\
  \small Computer Engineering and Artificial Intelligence \\
}

\date{\today}

\begin{document}

\maketitle

% --- Abstract ---
\begin{abstract}
Over the past decade, wireless earbuds have transitioned from rudimentary mono headsets into sophisticated, high-density edge computing platforms. Modern True Wireless Stereo (TWS) systems integrate real-time digital signal processing, advanced audio codecs, complex active noise cancellation (ANC) feedback loops, and dynamic battery management systems within ultra-compact form factors. This paper explores the underlying hardware architecture, wireless communication topologies, and signal processing mechanisms that power contemporary TWS devices, evaluating key engineering trade-offs in audio fidelity, latency, and power consumption.
\end{abstract}

\textbf{\textit{Keywords---}} Wireless Earbuds, True Wireless Stereo (TWS), Bluetooth Codecs,
```

Recompile 1 / 2

Evolution and Technical Architecture of Modern Wireless Earbuds

Mr. Hironobu Chaikasem
Computer Engineering and Artificial Intelligence

September 8, 2026

Abstract

Over the past decade, wireless earbuds have transitioned from rudimentary mono headsets into sophisticated, high-density edge computing platforms. Modern True Wireless Stereo (TWS) systems integrate real-time digital signal processing, advanced audio codecs, complex active noise cancellation (ANC) feedback loops, and dynamic battery management systems within ultra-compact form factors. This paper explores the underlying hardware architecture, wireless communication topologies, and signal processing mechanisms that power contemporary TWS devices, evaluating key engineering trade-offs in audio fidelity, latency, and power consumption.

Keywords— Wireless Earbuds, True Wireless Stereo (TWS), Bluetooth Codecs, Active Noise Cancellation (ANC), Power Management, Edge Computing.

1 Introduction

The global phase-out of the traditional 3.5 mm analog headphone interface in mobile devices acted as a catalyst for the rapid advancement of True Wireless Stereo (TWS) earbud technology. Unlike legacy Bluetooth headphones that rely on a physical wire connecting the left and right acoustic drivers, TWS architecture requires two completely decoupled wireless nodes communicating synchronously with a host source device.

To deliver uninterrupted high-fidelity audio reproduction within strict volumetric constraints (typically $<$ 8 cm^3 per earbud), modern TWS engineering converges multiple disciplines: ultra-low-power radio frequency (RF) design, miniaturized System-in-Package (SiP) integration, low-latency audio codecs, and adaptive noise mitigation algorithms.

2 Core Technologies

2.1 Bluetooth Audio Codecs

Bluetooth Low Energy and Classic audio topologies transmit acoustic data via packetized bitstreams over the 2.4 GHz ISM band. Because raw pulse-code modulation (PCM) audio exceeds bandwidth limits and energy budgets, psychoacoustic lossy compression codecs are deployed.

- **SBC (Subband Coding):** The baseline legacy codec mandated by the A2DP profile. It employs subband decomposition with simple bit-allocation algorithms, prioritizing low computational complexity over dynamic bandwidth efficiency.
- **AAC (Advanced Audio Coding):** Utilizes modified discrete cosine transform (MDCT) algorithms and sophisticated perceptual modeling. It yields superior acoustic preservation at lower bitrates but requires higher computational overhead for encoding and decoding.
- **LDAC:** A high-resolution proprietary codec capable of operating up to 990 kbps. It preserves 24-bit/96 kHz PCM streams using adaptive packet scheduling based on real-time RF signal-to-noise ratios (SNR).

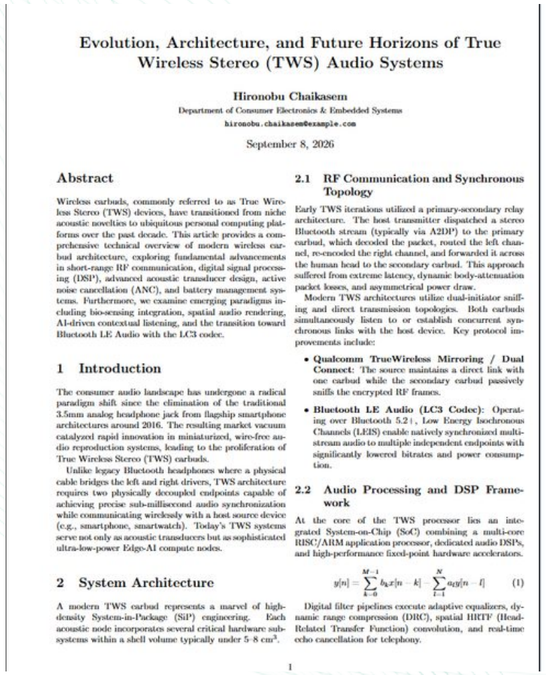
2.2 Active Noise Cancellation (ANC)

Active Noise Cancellation operates on the principle of destructive acoustic phase interference. Microphones embedded inside and outside the ear cavity capture external pressure waves $x(t)$ and generate an anti-phase acoustic wave $y(t) = -x(t)$ through the dynamic driver, canceling unwanted ambient sound at the tympanic membrane.

Modern ANC implementations typically employ a **Hybrid Topology**:

1. **Feedforward Loop:** An exterior microphone samples ambient acoustic signals before they propagate through the ear tip, targeting mid-to-high frequency noise.
2. **Feedback Loop:** An interior microphone positioned

สะท้อนการเรียนรู้ของการได้มาของ ผลลัพธ์แรก กับ ผลลัพธ์ใหม่



Evolution, Architecture, and Future Horizons of True Wireless Stereo (TWS) Audio Systems

Hironobu Chaikasem
Department of Consumer Electronics & Embedded Systems
hironobu.chaikasem@example.com

September 8, 2026

Abstract

Wireless earbuds, commonly referred to as True Wireless Stereo (TWS) devices, have transitioned from niche acoustic novelties to ubiquitous personal computing platforms over the past decade. This article provides a comprehensive technical overview of modern wireless earbud architecture, exploring fundamental advancements in short-range RF communication, digital signal processing (DSP), advanced acoustic transducer design, active noise cancellation (ANC), and battery management systems. Furthermore, we examine emerging paradigms including bio-sensing integration, spatial audio rendering, AI-driven contextual listening, and the transition toward Bluetooth LE Audio with the LC3 codec.

1 Introduction

The consumer audio landscape has undergone a radical paradigm shift since the elimination of the traditional 3.5mm analog headphone jack from flagship smartphone architectures around 2016. The resulting market vacuum catalyzed rapid innovation in miniaturized, wire-free audio reproduction systems, leading to the proliferation of True Wireless Stereo (TWS) earbuds.

Unlike legacy Bluetooth headphones where a physical cable bridges the left and right drivers, TWS architecture requires two physically decoupled endpoints capable of achieving precise sub-millisecond audio synchronization while communicating wirelessly with a host source device (e.g., smartphone, smartwatch). Today's TWS systems serve not only as acoustic transducers but as sophisticated ultra-low-power Edge-AI compute nodes.

2 System Architecture

A modern TWS earbud represents a marvel of high-density System-in-Package (SiP) engineering. Each acoustic node incorporates several critical hardware subsystems within a shell volume typically under 5–8 cm^3.

2.1 RF Communication and Synchronous Topology

Early TWS iterations utilized a primary-secondary relay architecture. The host transmitter dispatched a stereo Bluetooth stream (typically via A2DP) to the primary earbud, which decoded the packet, routed the left channel, re-encoded the right channel, and forwarded it across the human head to the secondary earbud. This approach suffered from extreme latency, dynamic body-attenuation packet losses, and asymmetrical power draw.

Modern TWS architectures utilize dual-initiator sniffing and direct transmission topologies. Both earbuds simultaneously listen to or establish concurrent synchronous links with the host device. Key protocol improvements include:

- **Qualcomm TrueWireless Mirroring / Dual Connect:** The source maintains a direct link with one earbud while the secondary earbud passively sniffs the encrypted RF frames.
- **Bluetooth LE Audio (LC3 Codec):** Operating over Bluetooth 5.2+, Low Energy Isochronous Channels (LEIS) enable natively synchronized multi-stream audio to multiple independent endpoints with significantly lowered bitrates and power consumption.

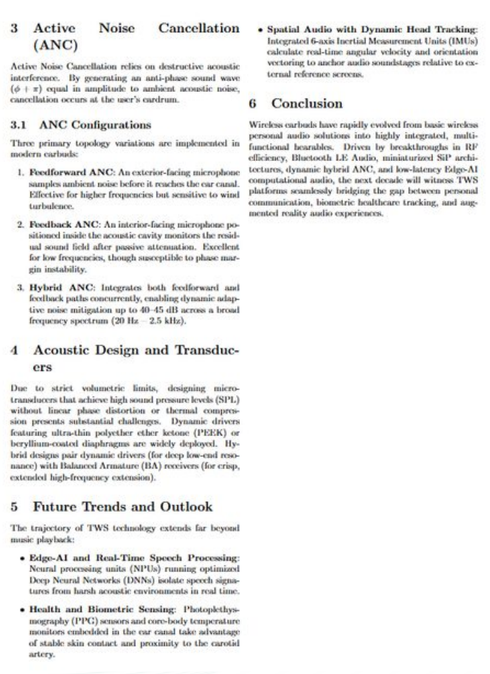
2.2 Audio Processing and DSP Framework

At the core of the TWS processor lies an integrated System-on-Chip (SoC) combining a multi-core RISC/ARM application processor, dedicated audio DSPs, and high-performance fixed-point hardware accelerators.

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} b_k x[n-k] - \sum_{l=1}^{N} a_l y[n-l] \quad (1)$$

Digital filter pipelines execute adaptive equalizers, dynamic range compression (DRC), spatial HRTF (Head-Related Transfer Function) convolution, and real-time echo cancellation for telephony.

1



3 Active Noise Cancellation (ANC)

Active Noise Cancellation relies on destructive acoustic interference. By generating an anti-phase sound wave ($\phi + \pi$) equal in amplitude to ambient acoustic noise, cancellation occurs at the user's eardrum.

3.1 ANC Configurations

Three primary topology variations are implemented in modern earbuds:

1. **Feedforward ANC:** An exterior-facing microphone samples ambient noise before it reaches the ear canal. Effective for higher frequencies but sensitive to wind turbulence.
2. **Feedback ANC:** An interior-facing microphone positioned inside the acoustic cavity monitors the residual sound field after passive attenuation. Excellent for low frequencies, though susceptible to phase margin instability.
3. **Hybrid ANC:** Integrates both feedforward and feedback paths concurrently, enabling dynamic adaptive noise mitigation up to 40–45 dB across a broad frequency spectrum (20 Hz – 2.5 kHz).

4 Acoustic Design and Transducers

Due to strict volumetric limits, designing micro-transducers that achieve high sound pressure levels (SPL) without linear phase distortion or thermal compression presents substantial challenges. Dynamic drivers featuring ultra-thin polyether ether ketone (PEEK) or beryllium-coated diaphragms are widely deployed. Hybrid designs pair dynamic drivers (for deep low-end resonance) with Balanced Armature (BA) receivers (for crisp, extended high-frequency extension).

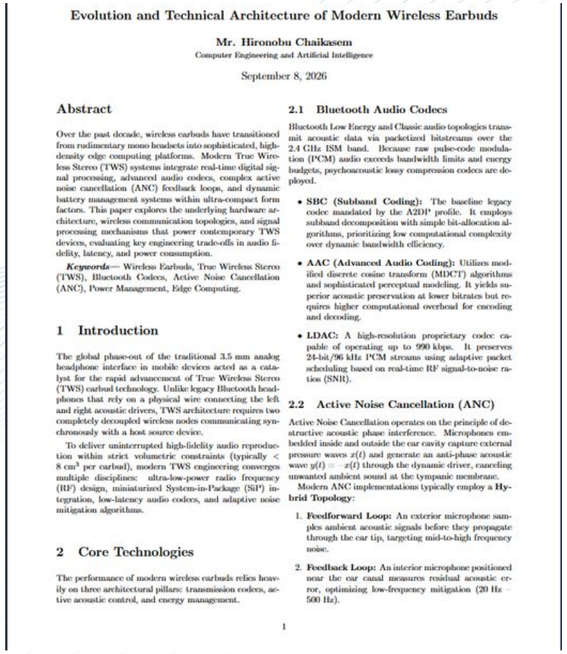
5 Future Trends and Outlook

The trajectory of TWS technology extends far beyond music playback:

- **Edge-AI and Real-Time Speech Processing:** Neural processing units (NPUs) running optimized Deep Neural Networks (DNNs) isolate speech signatures from harsh acoustic environments in real time.
- **Health and Biometric Sensing:** Photoplethysmography (PPG) sensors and core-body temperature monitors embedded in the ear canal take advantage of stable skin contact and proximity to the carotid artery.
- **Spatial Audio with Dynamic Head Tracking:** Integrated 6-axis Inertial Measurement Units (IMUs) calculate real-time angular velocity and orientation vectoring to anchor audio soundstages relative to external reference screens.

6 Conclusion

Wireless earbuds have rapidly evolved from basic wireless personal audio solutions into highly integrated, multi-functional hearables. Driven by breakthroughs in RF efficiency, Bluetooth LE Audio, miniaturized SiP architectures, dynamic hybrid ANC, and low-latency Edge-AI computational audio, the next decade will witness TWS platforms seamlessly bridging the gap between personal communication, biometric healthcare tracking, and augmented reality audio experiences.



Evolution and Technical Architecture of Modern Wireless Earbuds

Mr. Hironobu Chaikasem
Computer Engineering and Artificial Intelligence

September 8, 2026

Abstract

Over the past decade, wireless earbuds have transitioned from rudimentary mono headsets into sophisticated, high-density edge computing platforms. Modern True Wireless Stereo (TWS) systems integrate real-time digital signal processing, advanced audio codecs, complex active noise cancellation (ANC) feedback loops, and dynamic battery management systems within ultra-compact form factors. This paper explores the underlying hardware architecture, wireless communication topologies, and signal processing mechanisms that power contemporary TWS devices, evaluating key engineering trade-offs in audio fidelity, latency, and power consumption.

***Keywords*— Wireless Earbuds, True Wireless Stereo (TWS), Bluetooth Codecs, Active Noise Cancellation (ANC), Power Management, Edge Computing.**

1 Introduction

The global phase-out of the traditional 3.5 mm analog headphone interface in mobile devices acted as a catalyst for the rapid advancement of True Wireless Stereo (TWS) earbud technology. Unlike legacy Bluetooth headphones that rely on a physical wire connecting the left and right acoustic drivers, TWS architecture requires two completely decoupled wireless nodes communicating synchronously with a host source device.

To deliver uninterrupted high-fidelity audio reproduction within strict volumetric constraints (typically < 8 cm^3 per earbud), modern TWS engineering converges multiple disciplines: ultra-low-power radio frequency (RF) design, miniaturized System-in-Package (SiP) integration, low-latency audio codecs, and adaptive noise mitigation algorithms.

2 Core Technologies

The performance of modern wireless earbuds relies heavily on three architectural pillars: transmission codecs, active acoustic control, and energy management.

2.1 Bluetooth Audio Codecs

Bluetooth Low Energy and Classic audio topologies transmit acoustic data via packetized bitstreams over the 2.4 GHz ISM band. Because raw pulse-code modulation (PCM) audio exceeds bandwidth limits and energy budgets, psychoacoustic lossy compression codecs are deployed.

- **SBC (Subband Coding):** The baseline legacy codec mandated by the A2DP profile. It employs subband decomposition with simple bit-allocation algorithms, prioritizing low computational complexity over dynamic bandwidth efficiency.
- **AAC (Advanced Audio Coding):** Utilizes modified discrete cosine transform (MDCT) algorithms and sophisticated perceptual modeling. It yields superior acoustic preservation at lower bitrates but requires higher computational overhead for encoding and decoding.
- **LDAC:** A high-resolution proprietary codec capable of operating up to 990 kbps. It preserves 24-bit/96 kHz PCM streams using adaptive packet scheduling based on real-time RF signal-to-noise ratios (SNR).

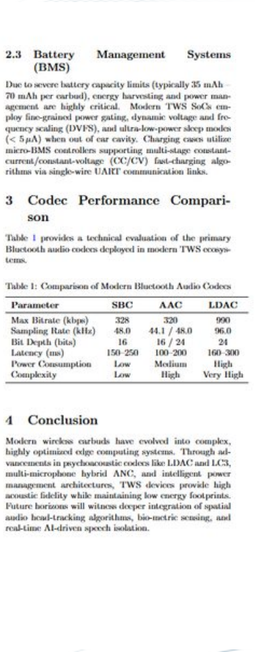
2.2 Active Noise Cancellation (ANC)

Active Noise Cancellation operates on the principle of destructive acoustic phase interference. Microphones embedded inside and outside the ear cavity capture external pressure waves $x(t)$ and generate an anti-phase acoustic wave $y(t) = -x(t)$ through the dynamic driver, canceling unwanted ambient sound at the tympanic membrane.

Modern ANC implementations typically employ a **Hybrid Topology**:

1. **Feedforward Loop:** An exterior microphone samples ambient acoustic signals before they propagate through the ear tip, targeting mid-to-high frequency noise.
2. **Feedback Loop:** An interior microphone positioned near the ear canal measures residual acoustic error, optimizing low-frequency mitigation (20 Hz – 500 Hz).

1



2.3 Battery Management Systems (BMS)

Due to severe battery capacity limits (typically 35 mAh – 70 mAh per earbud), energy harvesting and power management are highly critical. Modern TWS SoCs employ fine-grained power gating, dynamic voltage and frequency scaling (DVFS), and ultra-low-power sleep modes (< 5 μA) when out of ear cavity. Charging cases utilize micro-BMS controllers supporting multi-stage constant-current/constant-voltage (CC/CV) fast-charging algorithms via single-wire UART communication links.

3 Codec Performance Comparison

Table 1 provides a technical evaluation of the primary Bluetooth audio codecs deployed in modern TWS ecosystems.

Table 1: Comparison of Modern Bluetooth Audio Codecs

Parameter	SBC	AAC	LDAC
Max Bitrate (kbps)	328	320	990
Sampling Rate (kHz)	48.0	44.1 / 48.0	96.0
Bit Depth (bits)	16	16 / 24	24
Latency (ms)	150–250	100–200	160–300
Power Consumption	Low	Medium	High
Complexity	Low	High	Very High

4 Conclusion

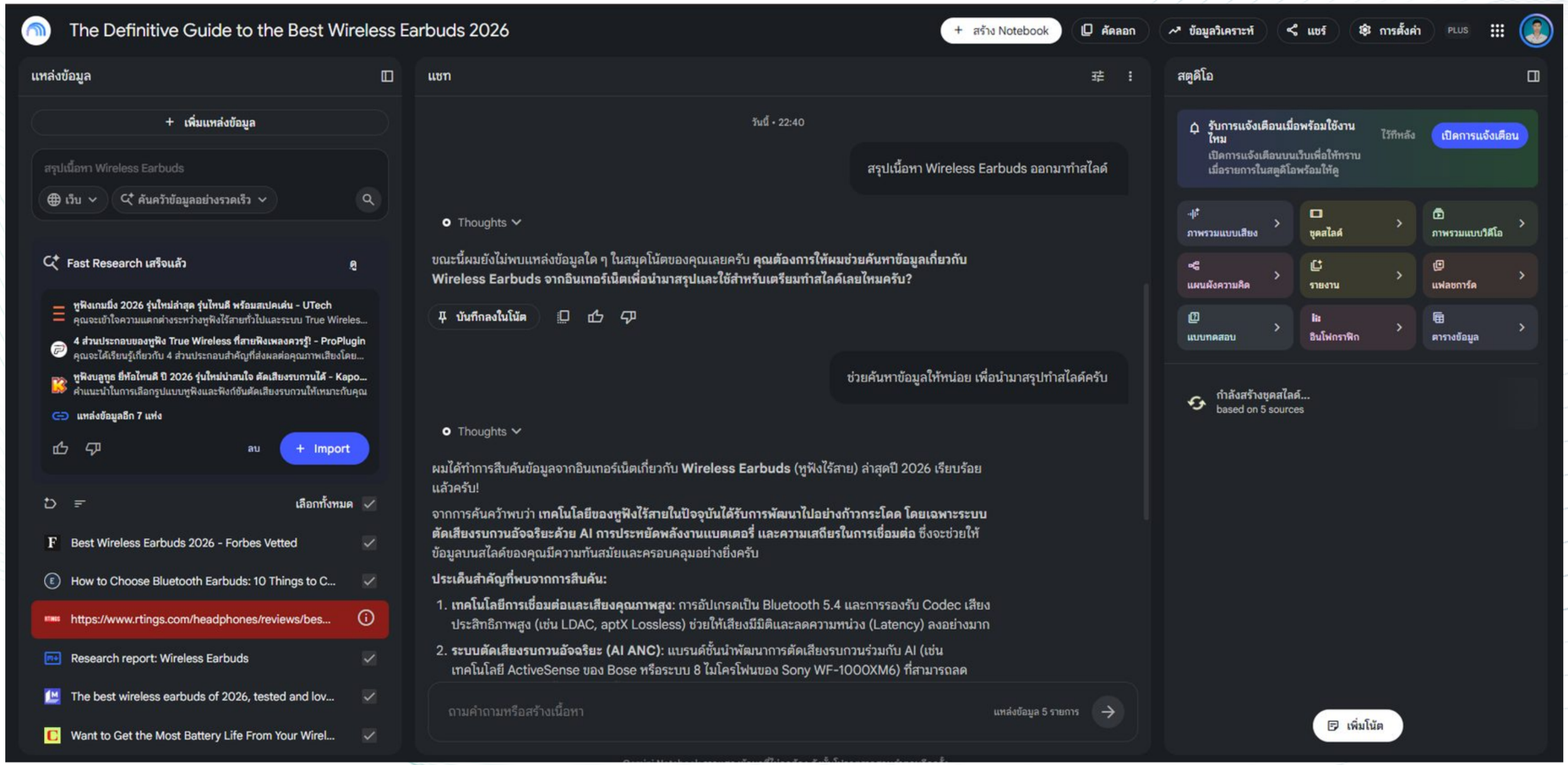
Modern wireless earbuds have evolved into complex, highly optimized edge computing systems. Through advancements in psychoacoustic codecs like LDAC and LC3, multi-microphone hybrid ANC, and intelligent power management architectures, TWS devices provide high acoustic fidelity while maintaining low energy footprints. Future horizons will witness deeper integration of spatial audio head-tracking algorithms, bio-metric sensing, and real-time AI-driven speech isolation.

ได้โค้ดที่มีแค่บทความ ไม่มีโครงสร้างตาราง การอ้างอิง หรือส่วนประกอบของเอกสารวิชาการที่สมบูรณ์

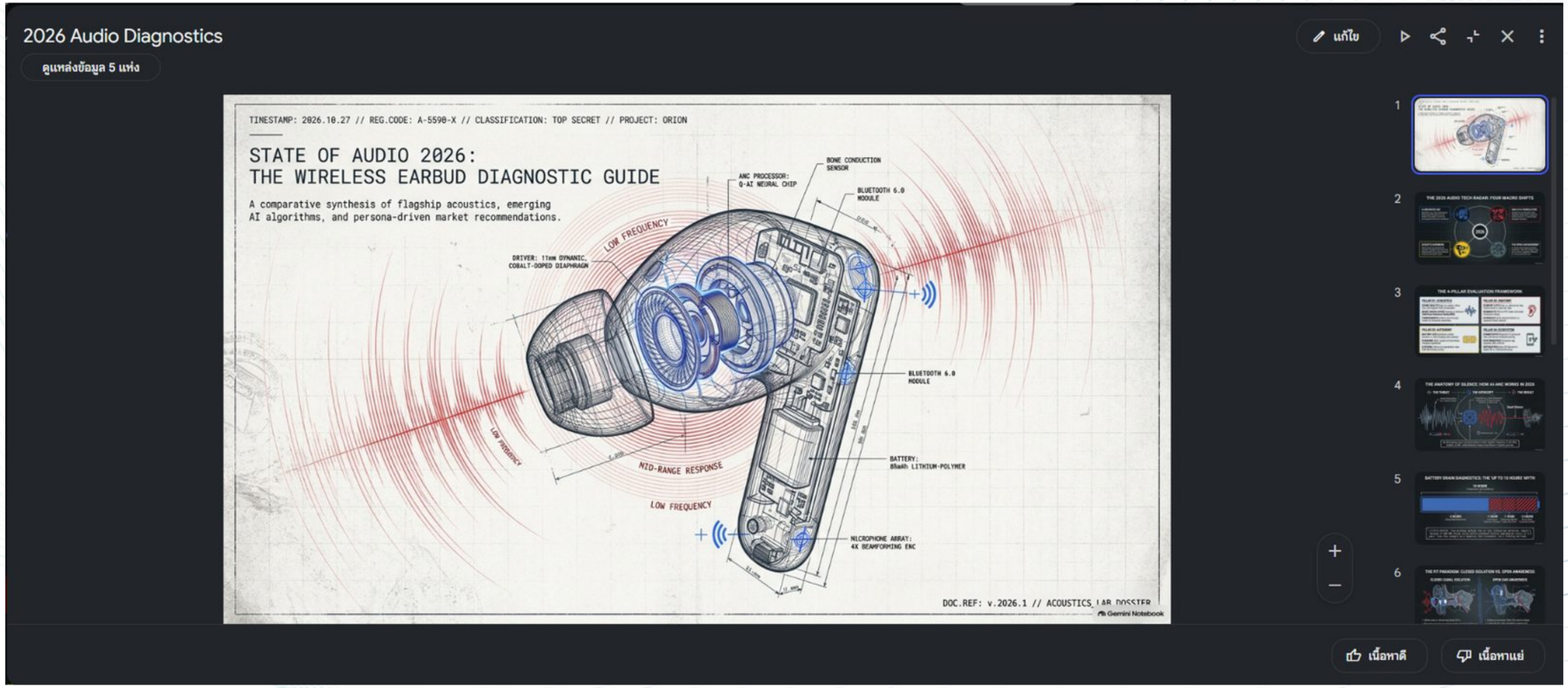
ได้ซอร์สโค้ด LaTeX ที่มีโครงสร้างบทความวิจัยสมบูรณ์ จัดหน้าสวยงาม มีตารางเปรียบเทียบ Codec ที่ใช้ \toprule, \midrule, \bottomrule พร้อมนำไปวางใน Overleaf เพื่อกด Compile เป็น PDF ได้ทันที

การสร้าง **Slide** สรุปงานด้วย **NotebookLM**

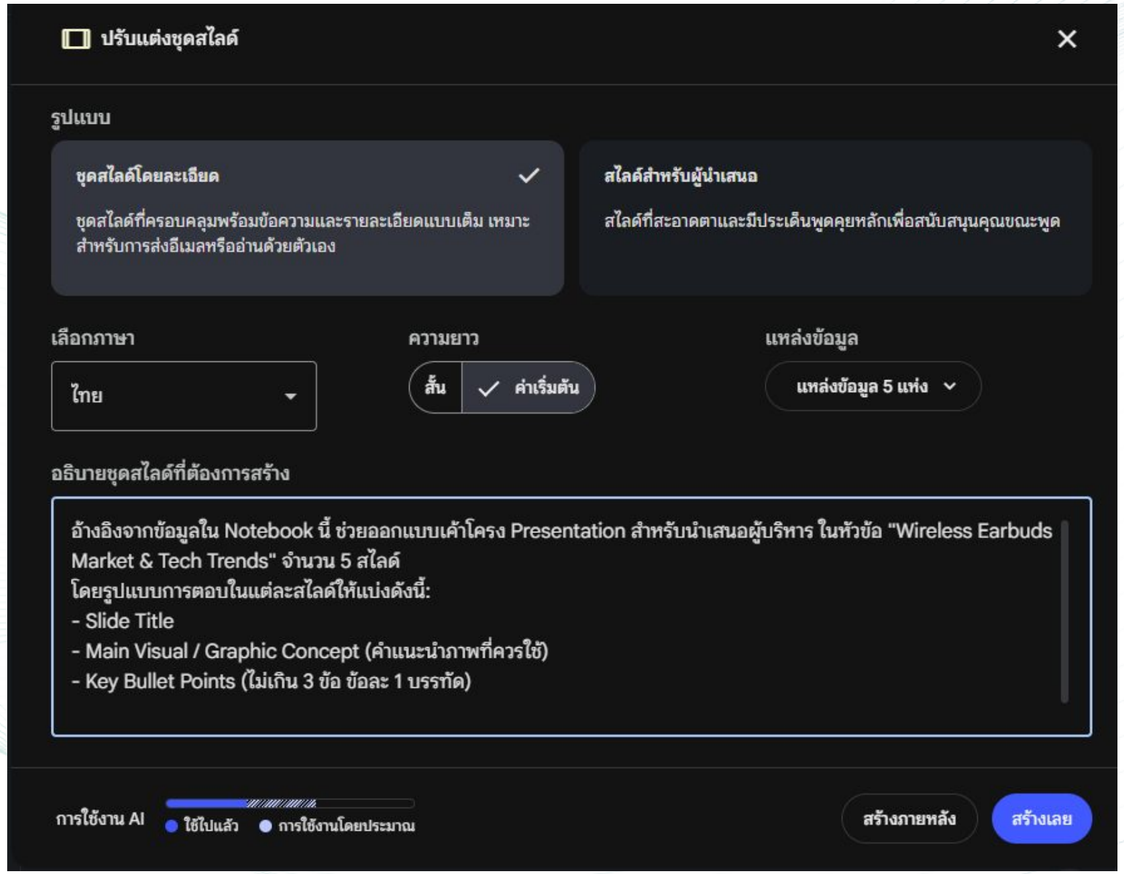
Prompt แรก (Zero-shot Prompt)



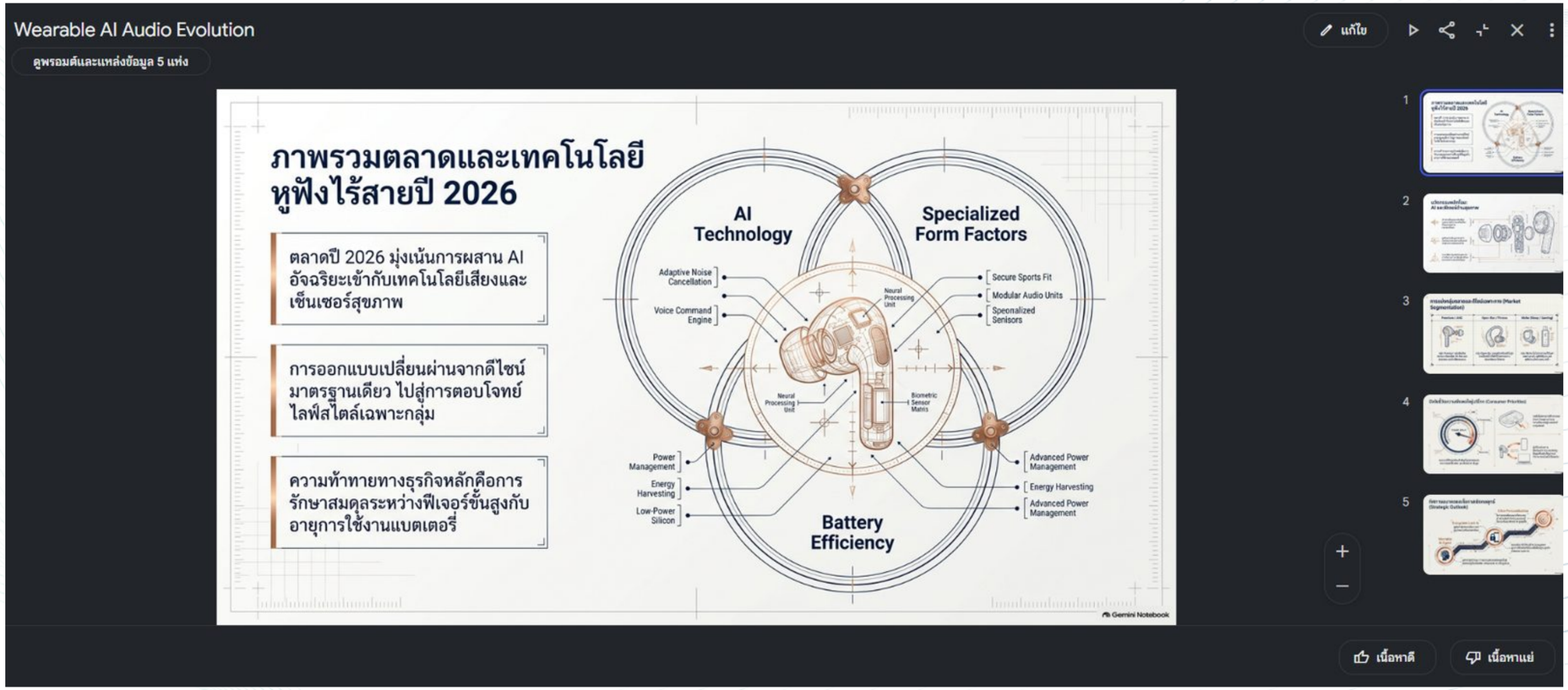
ผลลัพธ์ของ **Prompt** แรก **(Zero-shot Result)**



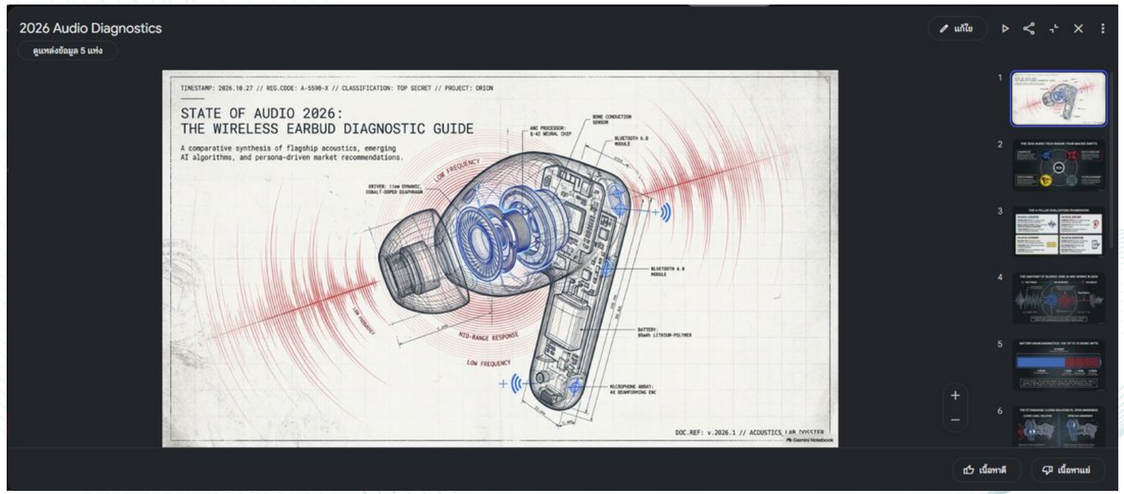
การถาม-ตอบ / ปรับแต่ง Prompt (Few-shot & Context Prompt)

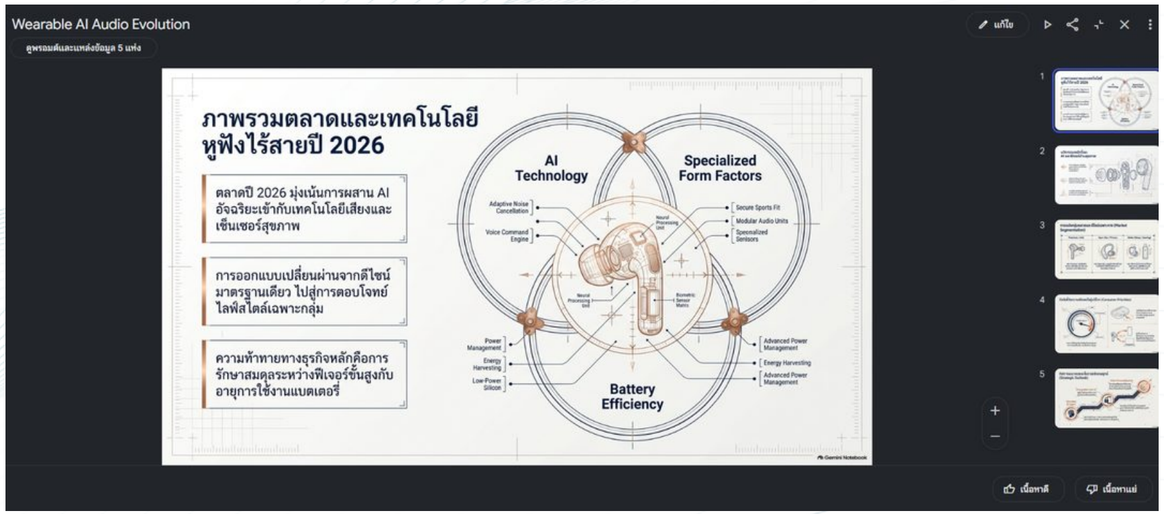


ผลลัพธ์ ของ **Prompt** ใหม่



สะท้อนการเรียนรู้ของการได้มาของ ผลลัพธ์แรก กับ ผลลัพธ์ใหม่



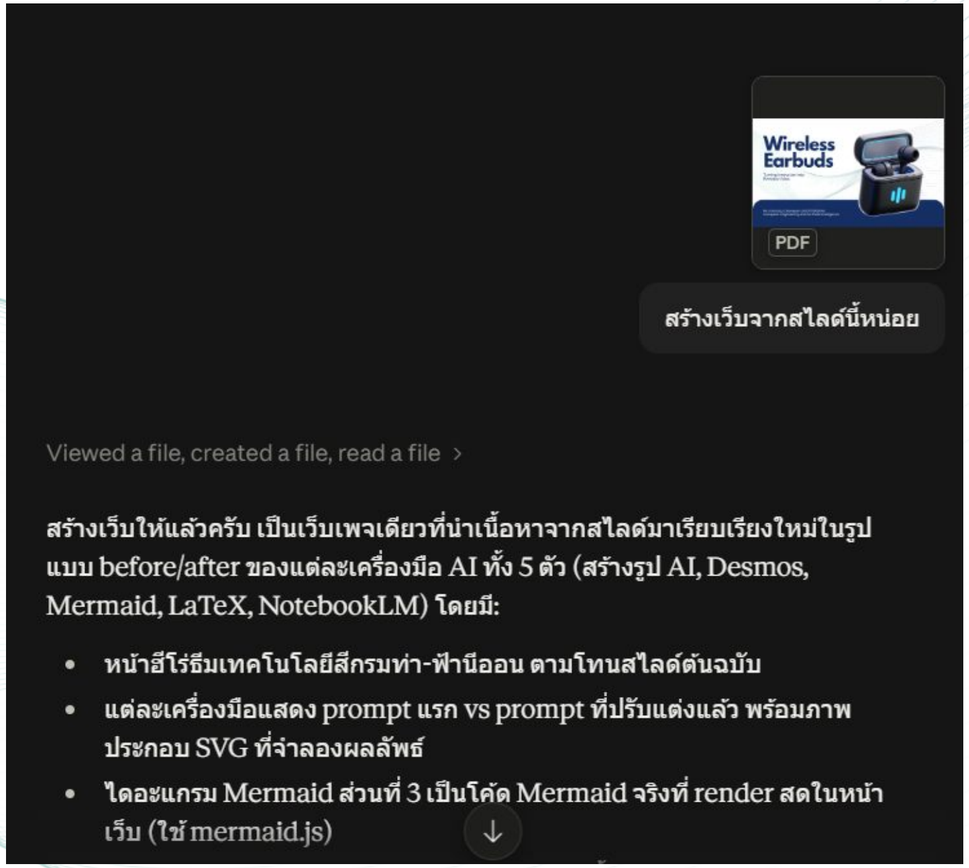


สั่งเพียงให้สรุปเนื้อหาทั่วไป

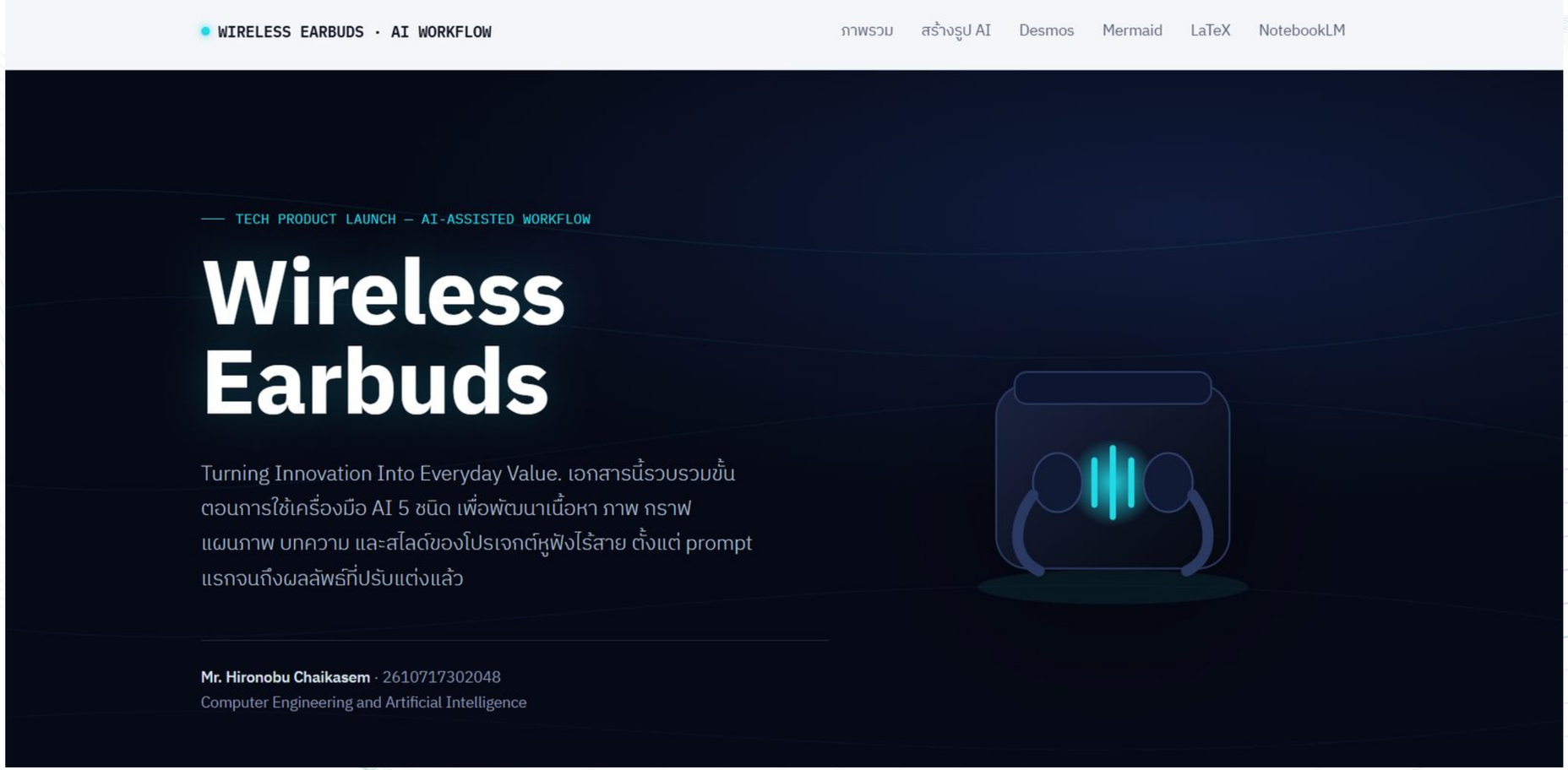
ข้อมูลถูกจัดระเบียบให้เข้าใจง่ายขึ้นทันที เหมาะสำหรับการนำไปสร้างตารางเปรียบเทียบหรือกราฟิกแบบ Split-Screen บนสไลด์

การเขียน **Website** เพื่อไปฝากบน **GitHub Pages**

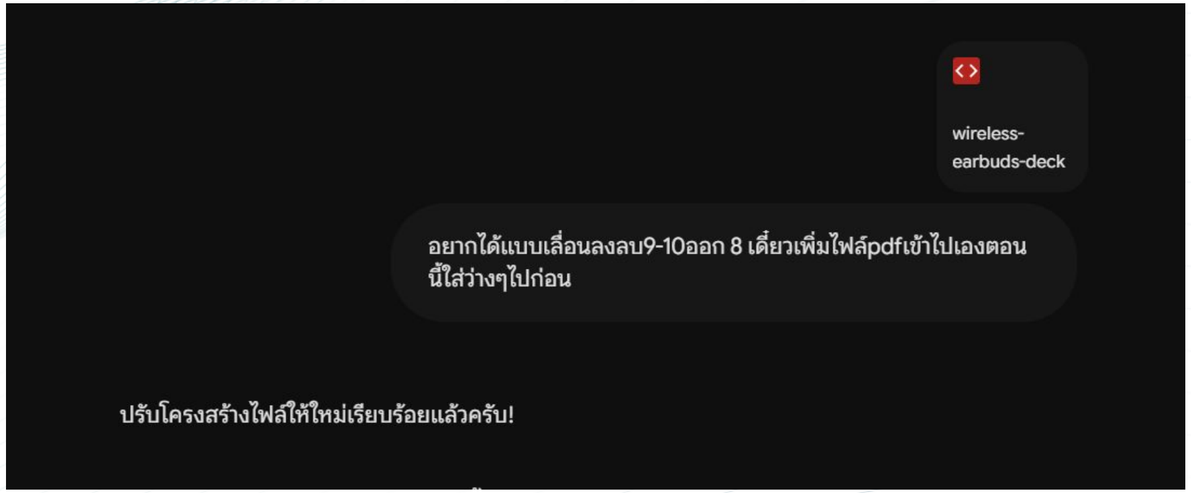
Prompt แรก (Zero-shot Prompt)



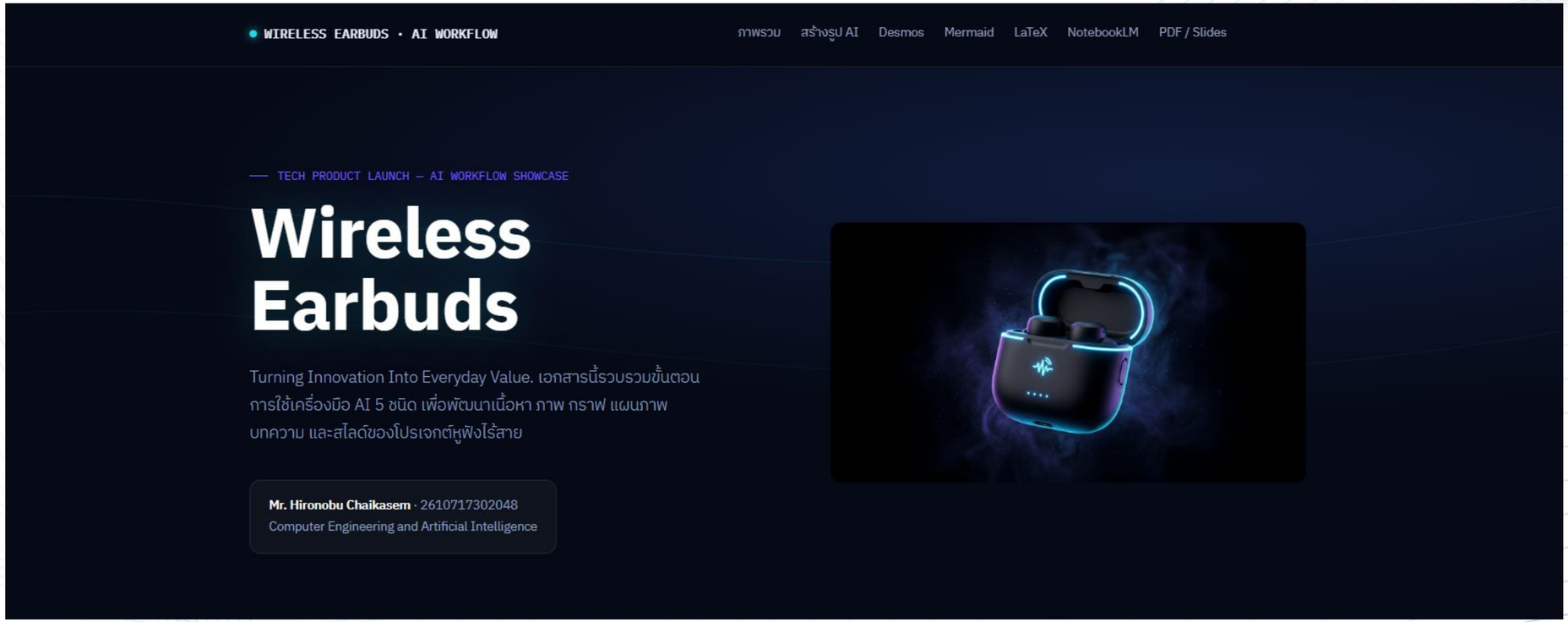
ผลลัพธ์ของ Prompt แรก (Zero-shot Result)



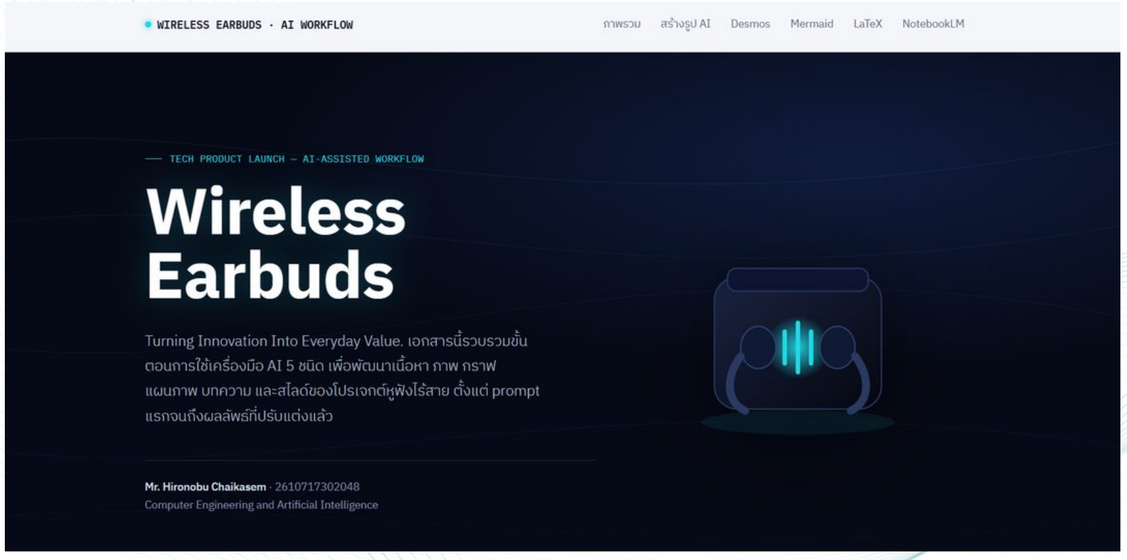
การถาม-ตอบ / ปรับแต่ง Prompt (Few-shot & Context Prompt)

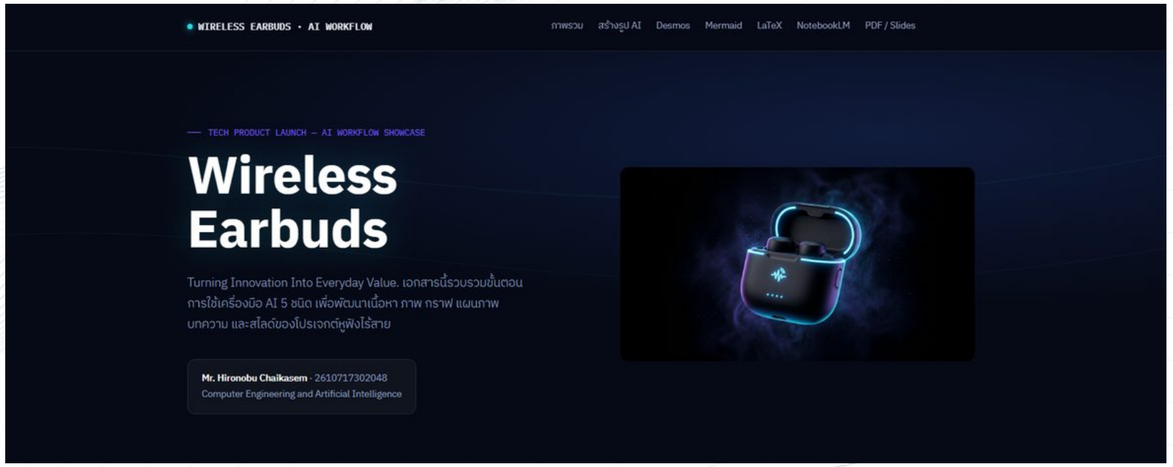


ผลลัพธ์ ของ **Prompt** ใหม่



สะท้อนการเรียนรู้ของการได้มาของ ผลลัพธ์แรก กับ ผลลัพธ์ใหม่





มีการใช้ขนาดตัวอักษรเนื้อหา (Body Text) ที่ค่อนข้างใหญ่เกินไปเมื่อเทียบกับส่วนหัวข้อ (Heading) ทำให้พื้นที่หน้าจอมีความหนาแน่นของข้อความสูง ดูแออัด และลดทอนความเด่นของภาพประกอบสินค้า

รับลดขนาดข้อความอธิบายให้กระชับและสมดุลกับพื้นที่ (Whitespace) ทำให้หน้าเว็บดูโปร่ง สะอาดตา (Clean design) ช่วยดึงสายตาของผู้ใช้งานไปยังตัวสินค้าและหัวข้อหลักได้ดีขึ้น