

ARSITEKTUR DAN ORGANISASI KOMPUTER

Laporan Subbab 1.5 dan 1.6



Disusun Oleh:

Varian Avila Faldi - 140810210055

**PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PADJADJARAN
JATINANGOR**

2022

Bagian 1

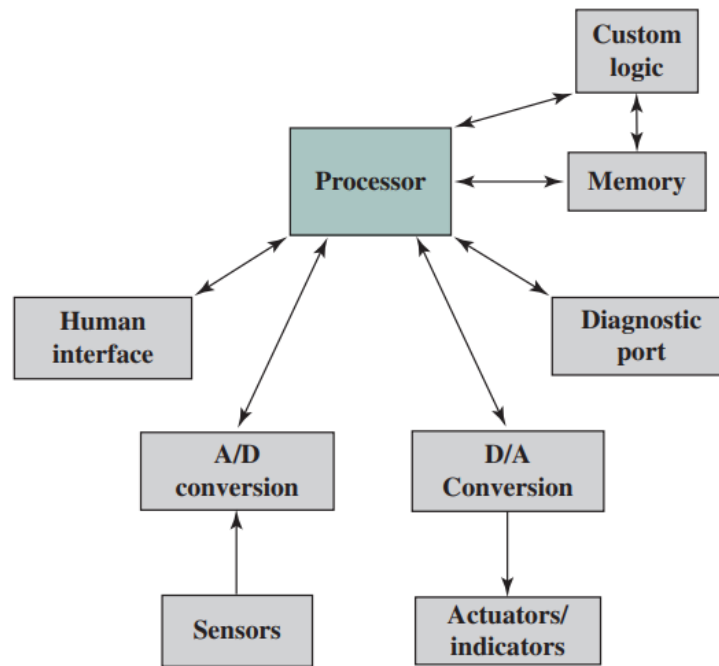
Konsep Dasar dan Evolusi Komputer

1.5 Sistem Tertanam (Embedded Systems)

Istilah sistem tertanam mengacu pada penggunaan alat elektronik dan perangkat lunak dalam sebuah produk, berbeda dengan komputer biasa seperti laptop atau sistem dekstop. Terdapat jutaan komputer yang terjual setiap tahunnya. Sebaliknya, terdapat milyaran sistem komputer diproduksi setiap tahun yang tertanam di dalam perangkat yang lebih besar. Saat ini kebanyakan perangkat elektronik memiliki sistem komputasi tertanam di dalamnya. Kemungkinan dalam waktu dekat semua perangkat akan memiliki sistem komputasi tertanam.

Banyak sekali jenis sistem tertanam, contohnya ponsel, kamera, kalkulator, oven microwave, sistem keamanan rumah, mesin cuci, sistem pencahayaan, sistem otomotif (misalnya, kontrol transmisi, sistem suspensi, injeksi bahan bakar), raket tenis, sikat gigi, dan berbagai jenis sensor serta aktuator dalam sistem otomatis.

Seringkali sistem tertanam dipasangkan dengan lingkungannya. Hal ini menimbulkan kendala real-time yang dipaksakan oleh kebutuhan untuk berinteraksi dengan lingkungan. Batasan seperti kecepatan gerak yang diperlukan, ketepatan pengukuran yang diperlukan, durasi waktu yang diperlukan, menentukan waktu pengoperasian perangkat lunak. Jika beberapa aktivitas dilakukan secara bersamaan, hal ini menimbulkan kendala real-time yang lebih kompleks.



Gambar 1 Organisasi dalam Sistem Tertanam

Gambar di atas menunjukkan organisasi dalam sistem tertanam. Selain prosesor dan memori, ada sejumlah elemen yang berbeda dari komputer dekstop atau laptop biasa :

- Terdapat berbagai antarmuka yang memungkinkan sistem untuk mengukur, memanipulasi, dan berinteraksi dengan lingkungan eksternal. Sistem tertanam yang sering berinteraksi dengan menggunakan sensor dan aktuator biasa disebut sistem reaktif. Sistem reaktif berada dalam interaksi terus-menerus dengan lingkungan luar dan dijalankan dengan kecepatan yang ditentukan oleh lingkungan itu.
- Antarmuka manusia mungkin sederhana lampu berkedip atau serumit penglihatan robot secara real-time. Dalam banyak kasus, sistem tertanam tidak memiliki antarmuka manusia.
- Port diagnostik dapat digunakan untuk mendiagnosis sistem yang sedang dikontrol dan tidak hanya untuk mendiagnosis komputer.
- Program bidang khusus, aplikasi khusus, atau bahkan perangkat non-digital dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja atau keandalan.
- Perangkat lunak sering memiliki fungsi yang tetap dan khusus pada tiap aplikasi.
- Efisiensi adalah hal terpenting dalam sistem tertanam. Mereka dioptimalkan untuk energi, ukuran kode, waktu eksekusi, berat dan dimensi, serta biaya.

Ada beberapa persamaan dengan sistem komputer pada umumnya yang harus diperhatikan :

- Bahkan dengan perangkat lunak yang fungsi nominalnya tetap, kemampuan untuk melakukan peningkatan lapangan untuk memperbaiki bug, meningkatkan keamanan, dan menambah fungsionalitas telah menjadi sangat penting untuk sistem tertanam dan tidak hanya dalam perangkat konsumen saja.
- Salah satu perkembangan yang relatif baru adalah platform sistem tertanam yang mendukung berbagai macam aplikasi. Contohnya adalah smartphone dan perangkat audio/visual seperti smart Tv.

The Internet of Things

Internet of Things adalah istilah yang mengacu pada perluasan interkoneksi perangkat pintar, mulai dari peralatan hingga sensor kecil. Tema yang dominan adalah penyematan transceiver seluler jarak pendek ke dalam beragam gadget dan barang sehari-hari, hal ini memungkinkan bentuk komunikasi baru antara orang dan barang, dan juga antara barang itu sendiri. Internet sekarang mendukung interkoneksi miliaran objek industri dan pribadi, biasanya melalui sistem cloud. Objek mengirimkan informasi sensor lalu bertindak dalam lingkungannya, dan dalam beberapa kasus dapat memodifikasi diri mereka sendiri untuk membuat manajemen keseluruhan dari sistem yang lebih besar seperti pabrik atau kota.

IoT digerakan oleh perangkat yang tertanam di dalamnya. Perangkat ini merupakan perangkat dengan bandwidth rendah, pengambilan data dengan pengulangan rendah, dan penggunaan data rendah yang berkomunikasi satu sama lain dan menyediakan data melalui antarmuka pengguna. Peralatan tertanam, seperti kamera keamanan video resolusi tinggi, telepon VoIP video, dan beberapa lainnya, memerlukan kemampuan streaming bandwidth tinggi. Namun produk yang tak terhitung jumlahnya hanya membutuhkan paket data yang akan dikirimkan sebentar-sebentar.

Dengan mengacu pada sistem yang sampai saat ini masih didukung, internet telah melalui empat generasi penyebaran yang berpuncak pada IoT:

1. Information Technology (IT): PC, server, router, firewall, dan sebagainya dibeli sebagai perangkat TI oleh perusahaan TI dan terutama menggunakan konektivitas kabel.
2. Operational Technology (OT): Mesin/peralatan dengan IT tertanam yang dibuat oleh perusahaan non-IT, seperti mesin medis, SCADA, dan kios dibeli sebagai peralatan oleh perusahaan. Menggunakan konektivitas kabel.
3. Personal Technology: smartphone, tablet, dan pembaca e-book yang dibeli sebagai perangkat IT oleh konsumen (karyawan) secara eksklusif menggunakan konektivitas nirkabel dan seringkali berbagai bentuk konektivitas nirkabel.
4. Sensor/actuator technology: perangkat serba guna yang dibeli oleh konsumen, IT, dan OT secara eksklusif menggunakan konektivitas nirkabel, umumnya dalam satu bentuk, sebagai bagian dari sistem yang lebih besar.

Ini adalah generasi keempat yang dianggap sebagai IoT, dan ini ditandai dengan penggunaan miliaran perangkat tertanam.

Sistem Operasi Tertanam

Ada dua pendekatan umum untuk mengembangkan sistem operasi tertanam (OS). Pendekatan pertama adalah mengambil OS yang ada dan mengadaptasinya untuk aplikasi yang disematkan. Misalnya, ada versi tertanam Linux, Windows, dan Mac, serta sistem operasi komersial dan eksklusif lainnya yang khusus untuk sistem tertanam. Pendekatan lainnya adalah merancang dan mengimplementasikan OS yang ditujukan semata-mata untuk penggunaan tertanam. Contoh yang terakhir adalah TinyOS, banyak digunakan dalam jaringan sensor nirkabel.

Prosesor Aplikasi Versus Prosesor Khusus

Dalam subbagian ini, dan dua subbagian berikutnya, kami secara singkat memperkenalkan beberapa istilah yang umum ditemukan dalam literatur tentang sistem tertanam. Prosesor aplikasi ditentukan oleh kemampuan prosesor untuk menjalankan sistem operasi yang kompleks, seperti Linux, Android, dan Chrome. Dengan demikian, prosesor aplikasi bersifat umum. Contoh yang baik dari penggunaan prosesor aplikasi tertanam adalah smartphone. Sistem tertanam dirancang untuk mendukung banyak aplikasi dan melakukan banyak berbagai fungsi.

Sebagian besar sistem tertanam menggunakan prosesor khusus yang didedikasikan untuk satu atau sejumlah kecil tugas spesifik yang diperlukan oleh perangkat utama. Karena sistem tertanam didedikasikan untuk tugas atau tugas tertentu, prosesor dan komponen terkait dapat direkayasa untuk mengurangi ukuran dan biaya.

Microprocessor versus Microcontrollers

Chip mikroprosesor awal termasuk register, ALU, dan semacam unit kontrol atau logika pemrosesan instruksi. Ketika kepadatan transistor meningkat, terdapat kemungkinan untuk meningkatkan kompleksitas arsitektur set instruksi, dan akhirnya untuk menambah memori dan lebih dari satu prosesor. Chip mikroprosesor kontemporer mencakup banyak inti dan sejumlah besar memori cache.

Sebuah chip mikrokontroler membuat penggunaan ruang logika yang tersedia secara substansial berbeda. Gambar 1 menunjukkan secara umum elemen-elemen yang biasanya ditemukan pada chip mikrokontroler. Seperti yang ditunjukkan, mikrokontroler adalah chip tunggal yang berisi prosesor, memori non-volatil untuk program (ROM), memori volatil untuk input dan output (RAM), jam, dan unit kontrol I/O. Bagian prosesor mikrokontroler memiliki area silikon yang jauh lebih rendah daripada mikroprosesor lain dan efisiensi energi yang jauh lebih tinggi.

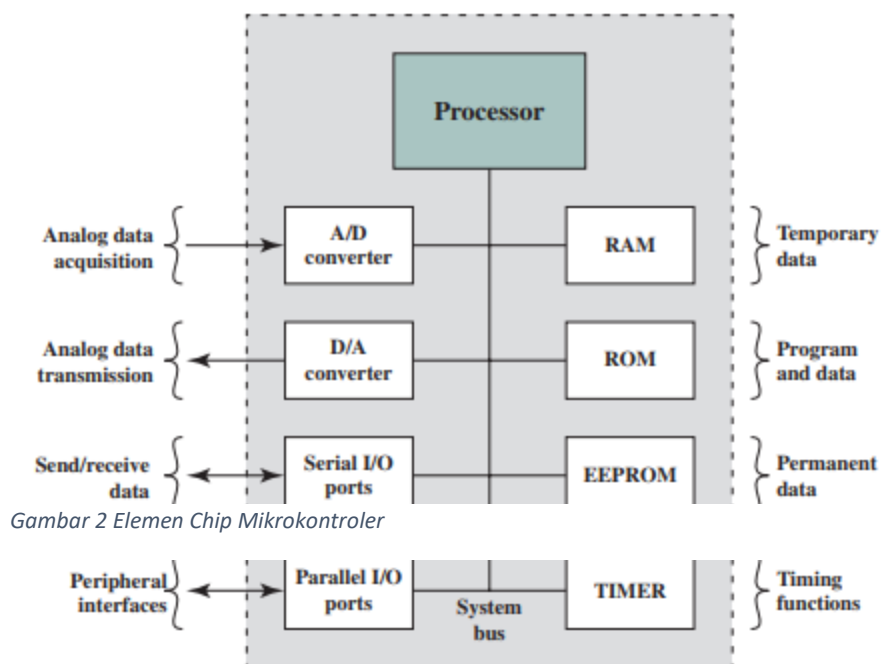
Mikrokontroler juga disebut "komputer dalam sebuah chip", miliaran unit mikrokontroler tertanam setiap tahun dalam berbagai produk mulai dari mainan, peralatan, hingga mobil. Misalnya, satu kendaraan dapat menggunakan 70 atau lebih mikrokontroler. Biasanya untuk mikrokontroler yang lebih kecil dan lebih murah, mereka digunakan sebagai prosesor khusus untuk tugas-tugas tertentu. Misalnya, mikrokontroler banyak digunakan dalam proses otomatisasi. Dengan memberikan reaksi sederhana terhadap input, mereka dapat mengontrol mesin, menghidupkan dan mematikan kipas, membuka dan menutup katup, dan sebagainya. Mikrokontroler adalah bagian dari teknologi industri modern dan merupakan salah satu cara paling murah untuk menghasilkan mesin yang dapat menangani fungsi yang sangat kompleks.

Mikrokontroler datang dalam berbagai ukuran fisik dan kekuatan pemrosesan. Prosesor berkisar dari arsitektur 4-bit hingga 32-bit. Mikrokontroler cenderung jauh lebih lambat daripada mikroprosesor, biasanya beroperasi dalam rentang MHz daripada kecepatan mikroprosesor GHz.

Fitur khas lain dari mikrokontroler adalah tidak menyediakan interaksi manusia. Mikrokontroler diprogram untuk tugas tertentu, tertanam di perangkatnya, dan dijalankan sesuai kebutuhan.

Embedded versus Deeply Embedded Systems

Kita telah mendefinisikan konsep sistem tertanam. Sebuah subset dari sistem tertanam, dan subset yang cukup banyak, disebut sebagai sistem yang sangat tertanam (deeply embedded systems). Meskipun istilah ini banyak digunakan dalam literatur teknis dan komersial, Anda akan sia-sia mencari di Internet (atau setidaknya saya pernah melakukannya) untuk definisi langsung. Secara umum, kita dapat mengatakan bahwa sistem yang tertanam dalam memiliki prosesor yang perilakunya sulit diamati baik oleh programmer maupun pengguna. Sistem yang tertanam dalam menggunakan mikrokontroler daripada mikroprosesor, tidak dapat diprogram setelah logika program untuk perangkat telah dibakar ke dalam ROM (memori hanya-baca), dan tidak memiliki interaksi dengan pengguna.



Sistem yang tertanam dalam adalah perangkat dengan tujuan tunggal yang berdedikasi yang mendeteksi sesuatu pada lingkungan, melakukan pemrosesan tingkat dasar, dan kemudian

melakukan sesuatu dengan hasilnya. Sistem yang tertanam dalam sering kali memiliki kemampuan nirkabel dan muncul dalam konfigurasi jaringan, seperti jaringan sensor yang ditempatkan di area yang luas (misalnya, pabrik, ladang pertanian). Internet of things sangat bergantung pada sistem yang tertanam dalam. Biasanya, sistem yang tertanam dalam memiliki batasan sumber daya yang ekstrem dalam hal memori, ukuran prosesor, waktu, dan konsumsi daya.

1.6 ASITEKTUR ARM (ARM ARCHITECTURE)

Arsitektur ARM mengacu pada arsitektur prosesor yang telah berkembang dari prinsip-prinsip desain RISC dan digunakan dalam sistem tertanam.

Evolusi ARM

ARM adalah keluarga mikroprosessor dan mikrokontroler berbasis RISC yang dirancang oleh ARM Holdings, Cambridge, Inggris. Perusahaan tidak membuat prosesor melainkan merancang mikroprosessor dan arsitektur multicore lalu melisensikannya kepada produsen. Secara khusus, ARM Holdings memiliki dua jenis produk yang dapat dilisensikan: prosesor dan arsitektur prosesor. Untuk prosesor, pelanggan membeli hak untuk menggunakan desain yang disediakan ARM dalam chip mereka sendiri. Untuk arsitektur prosesor, pelanggan membeli hak untuk merancang prosesor mereka sendiri yang sesuai dengan arsitektur ARM.

Chip ARM adalah prosesor berkecepatan tinggi yang dikenal dengan ukuran die yang kecil dan kebutuhan daya yang rendah. Chip ARM banyak digunakan di smartphone dan perangkat genggam lainnya, termasuk sistem permainan, serta berbagai macam produk konsumen. Chip ARM adalah prosesor di perangkat iPod dan iPhone Apple yang populer, dan juga digunakan di hampir semua ponsel pintar Android. ARM mungkin adalah arsitektur prosesor tertanam yang paling banyak digunakan dan memang arsitektur prosesor yang paling banyak digunakan di dunia.

Asal usul teknologi ARM dapat ditelusuri kembali ke perusahaan Acorn Computers yang berbasis di Inggris. Pada awal 1980-an, Acorn dianugerahi kontrak oleh British Broadcasting Corporation (BBC) untuk mengembangkan arsitektur mikrokomputer baru untuk Proyek Literasi Komputer BBC. Keberhasilan kontrak ini memungkinkan Acorn untuk terus mengembangkan prosesor RISC komersial pertama, Acorn RISC Machine (ARM). Versi pertama, ARM1, mulai beroperasi pada tahun 1985 dan digunakan untuk penelitian dan pengembangan internal serta digunakan sebagai koprosesor di mesin BBC.

Pada tahap awal ini, Acorn menggunakan perusahaan Teknologi VLSI untuk melakukan fabrikasi chip prosesor yang sebenarnya. VLSI dilisensikan untuk memasarkan chipnya sendiri dan berhasil membuat perusahaan lain menggunakan ARM dalam produk mereka, terutama sebagai prosesor tertanam.

Desain ARM cocok dengan kebutuhan komersial yang berkembang akan kinerja tinggi, konsumsi daya rendah, ukuran kecil, dan prosesor berbiaya rendah untuk aplikasi tertanam. Tetapi pengembangan lebih lanjut berada di luar cakupan kemampuan Acorn. Oleh karena itu, sebuah perusahaan baru didirikan. Dengan Acorn, VLSI, dan Apple Computer sebagai mitra pendiri, yang dikenal sebagai ARM Ltd. Mesin RISC Acorn menjadi Mesin RISC Lanjutan.

Arsitektur Set Instruksi

Set instruksi ARM sangat teratur, dirancang untuk implementasi prosesor yang efisien dan eksekusi yang efisien. Semua instruksi panjangnya 32 bit dan mengikuti format biasa. Hal ini membuat ARM ISA (Instruction Set Architecture) cocok untuk diterapkan pada berbagai produk.

Menambah dasar dari arsitektur set instruksi ARM yaitu set instruksi Thumb. Ini merupakan subset yang dikodekan ulang dari set instruksi ARM. Thumb dirancang untuk meningkatkan kinerja implementasi ARM yang menggunakan bus data memori 16-bit atau lebih sempit, dan untuk memungkinkan kepadatan kode yang lebih baik daripada yang disediakan oleh set instruksi ARM. Set instruksi Thumb berisi subset dari set instruksi ARM 32-bit yang dikodekan ulang menjadi instruksi 16-bit. Versi yang ditentukan saat ini adalah Thumb-2.

Produk ARM

ARM Holdings melisensikan sejumlah mikroprosesor khusus dan teknologi terkait, tetapi sebagian besar lini produk mereka adalah keluarga arsitektur mikroprosesor Cortex. Ada tiga arsitektur Cortex, yang diberi label dengan inisial A, R, dan M.

Cortex-A / Cortex-A50

Cortex-A dan Cortex-A50 adalah prosesor aplikasi, ditujukan untuk perangkat mobile seperti smartphone dan pembaca e-book, serta perangkat konsumen seperti TV digital dan gateway rumah (misalnya, DSL dan modem Internet kabel). Prosesor ini berjalan pada frekuensi clock yang lebih tinggi (lebih dari 1 GHz), dan mendukung unit manajemen memori (MMU), yang diperlukan untuk OS berfitur lengkap seperti Linux, Android, MS Windows, dan OS seluler. MMU adalah modul perangkat keras yang mendukung memori virtual dan paging dengan menerjemahkan alamat virtual ke alamat fisik.

Kedua arsitektur tersebut menggunakan set instruksi ARM dan Thumb-2; perbedaan utama adalah bahwa Cortex-A adalah mesin 32-bit, dan Cortex-A50 adalah mesin 64-bit.

Cortex-R

Cortex-R dirancang untuk mendukung aplikasi real-time, di mana waktu peristiwa terjadi perlu dikontrol dengan respons cepat terhadap peristiwa tersebut. Mereka dapat berjalan pada frekuensi clock yang cukup tinggi (misalnya, 200MHz hingga 800MHz) dan memiliki latensi respons yang sangat rendah. Cortex-R mencakup peningkatan baik pada set instruksi maupun organisasi prosesor untuk mendukung perangkat real-time yang tertanam dalam. Sebagian besar prosesor ini tidak memiliki MMU; persyaratan data yang terbatas dan jumlah proses simultan yang terbatas menghilangkan kebutuhan akan dukungan perangkat keras dan perangkat lunak yang rumit untuk memori virtual. Cortex-R memang memiliki Memory Protection Unit (MPU), cache, dan fitur memori lainnya yang dirancang untuk aplikasi industri. MPU adalah modul perangkat keras yang melarang satu program dalam memori mengakses memori yang ditetapkan untuk program aktif lainnya secara tidak sengaja. Menggunakan berbagai metode, batas pelindung dibuat di sekitar program, dan instruksi di dalam program dilarang mereferensikan data di luar batas itu.

Contoh sistem tertanam yang akan menggunakan Cortex-R adalah sistem pengereman otomotif, pengontrol penyimpanan massal, dan perangkat jaringan dan pencetakan.

Cortex-M

Prosesor seri Cortex-M telah dikembangkan terutama untuk domain mikrokontroler di mana kebutuhan akan manajemen interupsi yang cepat dan sangat deterministik digabungkan dengan permintaan jumlah gerbang yang sangat rendah dan konsumsi daya serendah mungkin. Seperti seri Cortex-R, arsitektur Cortex-M memiliki MPU tetapi tidak ada MMU. Cortex-M hanya menggunakan set instruksi Thumb-2. Pasar untuk Cortex-M mencakup perangkat IoT, jaringan sensor/aktuator nirkabel yang digunakan di pabrik dan perusahaan lain, elektronik bodi otomotif, dan sebagainya.

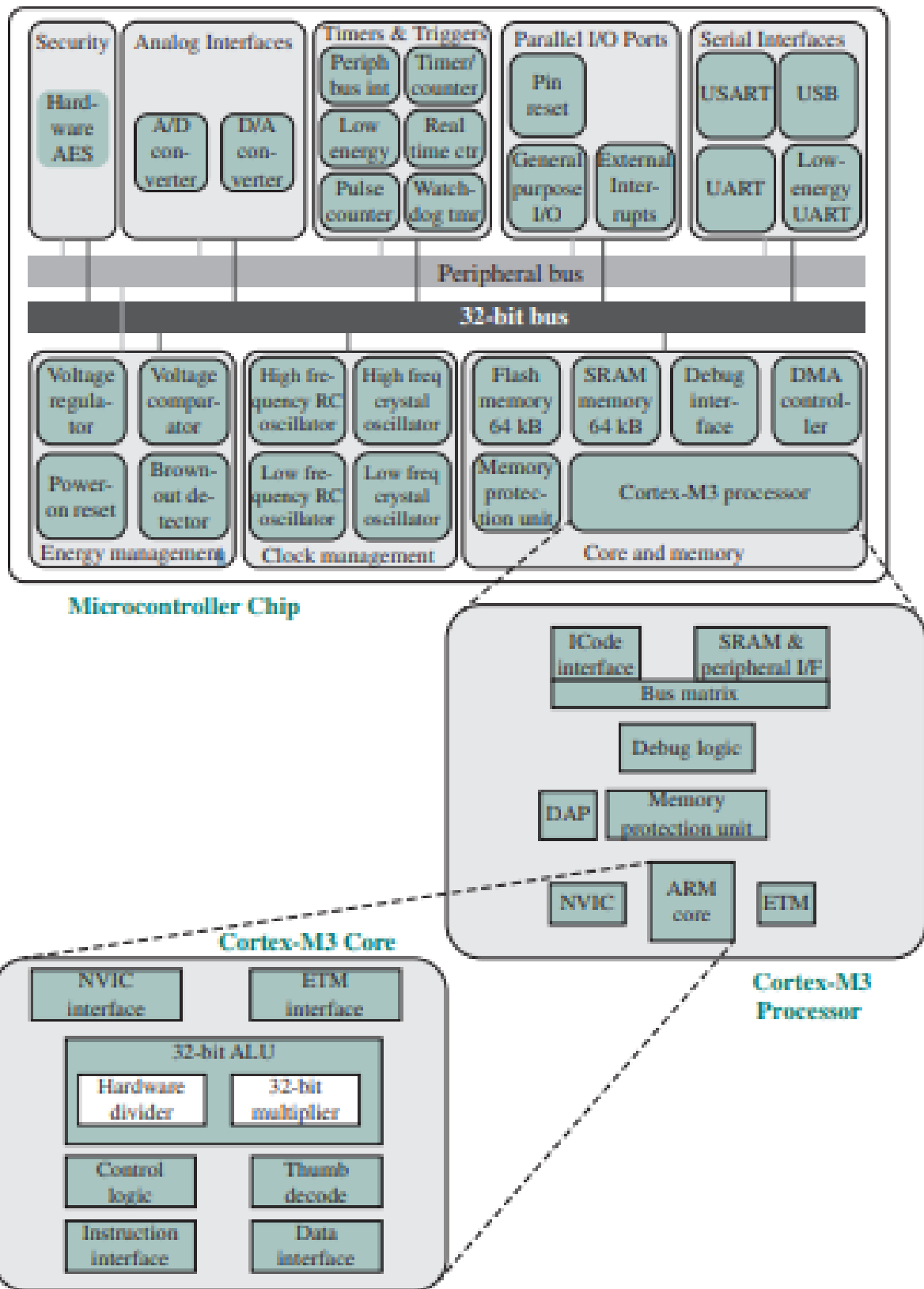
Saat ini terdapat 4 versi dari seri Cortex-M:

- **Cortex-M0:** Dirancang untuk aplikasi 8- dan 16-bit, model ini menekankan biaya rendah, daya sangat rendah, dan kesederhanaan. Ini dioptimalkan untuk ukuran die

silikon kecil (mulai dari gerbang 12k) dan digunakan dalam chip dengan biaya terendah.

- **Cortex-M0+:** Versi M0 yang disempurnakan yang lebih hemat energi.
- **Cortex-M3:** Dirancang untuk aplikasi 16- dan 32-bit, model ini menekankan kinerja dan efisiensi energi. Ini juga memiliki fitur debug dan pelacakan yang komprehensif untuk memungkinkan pengembang perangkat lunak mengembangkan aplikasi mereka dengan cepat.
- **Cortex-M4:** Model ini menyediakan semua fitur Cortex-M3, dengan instruksi tambahan untuk mendukung tugas pemrosesan sinyal digital.

Pada teks ini, kami akan menggunakan ARM Cortex-M3 sebagai contoh prosesor sistem tertanam kami. Ini adalah yang paling cocok dari semua model ARM untuk penggunaan umum mikrokontroler. Cortex-M3 digunakan oleh berbagai produsen produk mikrokontroler. Perangkat mikrokontroler awal dari mitra utama telah menggabungkan prosesor Cortex-M3 dengan flash, SRAM, dan beberapa periferal untuk memberikan penawaran yang kompetitif dengan harga hanya \$1.



Gambar 3 Chip Mikrokontroler Khas Cortex-M3

Gambar 3 menunjukkan diagram blok mikrokontroler EFM32 dari Silicon Labs. Gambar tersebut juga menunjukkan detail prosesor Cortex-M3 dan komponen inti.

Inti Cortex-M3 menggunakan bus terpisah untuk instruksi dan data. Susunan ini kadang-kadang disebut sebagai arsitektur Harvard, berbeda dengan arsitektur von Neumann, yang menggunakan bus sinyal dan memori yang sama untuk instruksi dan data. Dengan kemampuan membaca instruksi dan data dari memori secara bersamaan, prosesor Cortex-M3 dapat melakukan banyak operasi secara paralel, mempercepat eksekusi aplikasi. Inti berisi dekoder untuk instruksi Thumb, ALU canggih dengan dukungan untuk perkalian dan pembagian perangkat keras, logika kontrol, dan antarmuka ke komponen prosesor lainnya. Secara khusus, ada antarmuka ke pengontrol interupsi vektor bersarang (NVIC) dan modul jejak makrosel (ETM) tertanam.

Inti adalah bagian dari modul yang disebut prosesor Cortex-M3. Istilah ini agak menyesatkan, karena biasanya dalam literatur, istilah inti dan prosesor dipandang setara. Selain inti, prosesor mencakup elemen-elemen berikut:

- **NVIC:** Memberikan kemampuan penanganan interupsi yang dapat dikonfigurasi ke prosesor. NVIC memfasilitasi pengecualian pada latensi rendah dan penanganan interupsi, dan mengontrol manajemen daya.
- **ETM:** Komponen debug opsional yang memungkinkan rekonstruksi eksekusi program. ETM dirancang untuk menjadi alat debug berkecepatan tinggi dan berdaya rendah yang hanya mendukung pelacakan instruksi.
- **Debug access port (DAP):** Menyediakan antarmuka untuk akses debug eksternal ke prosesor.
- **Debug logic:** Fungsionalitas debug dasar mencakup penghentian prosesor, satu langkah, akses register inti prosesor, breakpoint perangkat lunak tak terbatas, dan akses memori sistem penuh.
- **Icode interface:** Mengambil instruksi dari ruang memori kode.
- **SRAM & peripheral interface:** Antarmuka baca/tulis ke memori data dan perangkat periferal.
- **Bus Matrix:** Menghubungkan antarmuka inti dan debug ke bus eksternal di mikrokontroler.

- **Memory protection unit:** Melindungi data penting yang digunakan oleh sistem operasi dari aplikasi pengguna, memisahkan tugas pemrosesan dengan melarang akses ke data satu sama lain, menonaktifkan akses ke wilayah memori, mengizinkan wilayah memori didefinisikan sebagai hanya-baca, dan mendeteksi akses memori tak terduga yang berpotensi merusak sistem.

Bagian atas Gambar 3 menunjukkan diagram blok mikrokontroler tipikal yang dibangun dengan Cortex-M3, dalam hal ini mikrokontroler EFM32. Mikrokontroler ini dipasarkan untuk digunakan di berbagai perangkat, termasuk pengukuran energi, gas, dan air; sistem alarm dan keamanan; perangkat otomasi industri; perangkat otomatisasi rumah; aksesoris pintar; dan perangkat kesehatan dan kebugaran. Chip silikon terdiri dari 10 area utama:

- **Core and memory:** Wilayah ini mencakup prosesor Cortex-M3, memori data RAM statis (SRAM), dan memori flash untuk menyimpan instruksi program dan data aplikasi yang tidak bervariasi. Memori flash tidak mudah menguap (data tidak hilang saat daya dimatikan) dan sangat ideal untuk tujuan ini. SRAM menyimpan data variabel. Area ini juga mencakup antarmuka debug, yang memudahkan untuk memprogram ulang dan memperbaiki sistem di lapangan.
- **Parallel I/O ports:** Dapat dikonfigurasi untuk berbagai skema I/O paralel.
- **Serial interfaces:** Mendukung berbagai skema I/O serial.
- **Analog interfaces:** Logika analog-ke-digital dan digital-ke-analog untuk mendukung sensor dan aktuator.
- **Timers and triggers:** Melacak waktu dan menghitung peristiwa, menghasilkan bentuk gelombang keluaran, dan memicu tindakan berjangka waktu di periferal lain.
- **Clock management:** Mengontrol jam dan osilator pada chip. Beberapa jam dan osilator digunakan untuk meminimalkan konsumsi daya dan menyediakan waktu startup yang singkat.
- **Energy management:** Mengelola berbagai mode operasi hemat energi dari prosesor dan periferal untuk menyediakan manajemen kebutuhan energi secara real-time untuk meminimalkan konsumsi energi.

- **Security:** Chip tersebut berisi implementasi perangkat keras dari Advanced Encryption Standard (AES).
- **32-bit bus:** Menghubungkan semua komponen pada chip
- **Peripheral bus:** Jaringan yang memungkinkan modul periferal yang berbeda berkomunikasi secara langsung satu sama lain tanpa melibatkan prosesor. Itu mendukung operasi waktu-kritis dan mengurangi overhead perangkat lunak.

Tingkat atas sistem komputer mikrokontroler adalah satu chip, sedangkan untuk komputer multicore, tingkat atas adalah motherboard yang berisi sejumlah chip. Perbedaan penting lainnya adalah bahwa tidak ada cache, baik di prosesor Cortex-M3 maupun di mikrokontroler secara keseluruhan, yang memainkan peran penting jika kode atau data berada di memori eksternal. Meskipun jumlah siklus untuk membaca instruksi atau data bervariasi tergantung pada cache hit atau miss, cache sangat meningkatkan kinerja ketika memori eksternal digunakan. Overhead tersebut tidak diperlukan untuk mikrokontroler.

REFERENSI

Stalings, W. (2016). Dalam *Computer Organization and Architecture Designing For Performa 10th Edition*. PEARSON Education.