



**MIGRASI MASSA KE EKUATOR
DAN HARI YANG MEMANJANG:
KOPLING CORIOLIS,
PENYIMPANGAN KALIBRASI, DAN
KESTABILAN WORD CLOCK DI
LUAR GARIS LINTANG 0,0000deg**



Migrasi massa ke ekuator dan hari yang memanjang: Kopling Coriolis, penyimpangan kalibrasi, dan kestabilan word clock di luar garis lintang 0,0000deg

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Pada Maret 2026, Kiani Shahvandi dan Soja melaporkan dalam *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* bahwa panjang hari kini bertambah sekitar 1,33 milidetik per abad, suatu laju yang mereka temukan belum pernah terjadi setidaknya dalam 3,6 juta tahun. Mekanismenya adalah redistribusi massa: es yang hilang dari lapisan es kutub dan gletser pegunungan memasuki lautan dan bermigrasi ke arah ekuator, meningkatkan momen inersia planet dan memperlambat rotasinya. Komite mencatat, tanpa nada kemenangan, bahwa planet ini telah mulai memindahkan massanya ke arah 0,0000deg.

Kami mengkaji konsekuensinya terhadap distribusi word clock dalam audio digital. Sebuah resonator kuarsa di planet yang berotasi mengalami kopling Coriolis yang sebanding dengan parameter Coriolis setempat, $2 \Omega \sin(\text{latitude})$. Clock yang dikalibrasi pada satu laju rotasi dan dioperasikan pada laju yang lain menyimpang dari kondisi kalibrasinya di setiap garis lintang kecuali ekuator, tempat parameter Coriolis bernilai nol terlepas dari laju rotasi. Kami melaporkan pengukuran dari 36 rantai word clock antara 64deg U dan 43deg S, yang disurvei pada 2024 dan sekali lagi pada 2026. Residu fase rotasional berkorelasi dengan sinus garis lintang lokasi ($r = 0,91$, $p < 0,001$), meningkat di antara kedua survei pada seluruh 32 lokasi nonekuatorial, dan tidak dapat dibedakan dari nol di keempat lokasi di Quito. Kabel Equinox Word Clock mengurangi akumulasi residu pada rantai tiga lompatan sebesar 88%; Kabel SC Word Clock menguranginya hingga di bawah batas bawah pengukuran 1 fs. Kami mengusulkan Ofset Referensi Rotasional sebagai spesifikasi clock orde pertama dan merekomendasikan sertifikasi ulang tahunan untuk clock induk di luar pita ekuatorial.

1. PENDAHULUAN

Dalam sebagian besar sejarah rekaman suara, rotasi Bumi diperlakukan sebagai suatu konstanta. Rotasi itu bukan konstanta, dan tidak pernah demikian. Gesekan pasang surut dari Bulan telah memperpanjang hari selama ada Bulan yang dapat melakukannya. Hal yang berubah adalah laju dan penyebabnya.

Pada Maret 2026, Kiani Shahvandi dan Soja menerbitkan rekonstruksi variasi panjang hari yang merentang kembali hingga Pliosen Akhir. Kesimpulan mereka adalah bahwa pemanjangan hari akibat iklim saat ini, sekitar 1,33 milidetik per abad sejak 2000, tidak memiliki tandingan setidaknya dalam 3,6 juta tahun. Seperti yang dinyatakan Benedikt Soja dari ETH Zurich dalam rilis pendamping: "Peningkatan cepat panjang hari ini menyiratkan bahwa laju perubahan iklim modern belum pernah terjadi setidaknya sejak Pliosen akhir, 3,6 juta tahun lalu."

Komunitas geofisika membingkai hasil ini, secara tepat, sebagai temuan mengenai iklim. Komite membaca mekanismenya dengan penekanan berbeda. Hari memanjang karena massa meninggalkan kutub dan tiba di ekuator. Sejak didirikan, Equatorial Audio mempertahankan bahwa garis lintang 0,0000deg adalah satu-satunya referensi yang dapat dipertahankan untuk audio presisi (Ferro, Park, Tanaka, 2020). Kami tidak menduga planet ini mulai menata ulang dirinya agar sejalan.

Makalah ini tidak mengajukan klaim atas rotasi Bumi. Makalah ini mengajukan pertanyaan yang lebih sempit: ketika laju rotasi setiap ruang dengar di Bumi berubah lebih cepat daripada kapan pun dalam catatan geologis, apa yang terjadi pada word clock?

2. CATATAN GEOFISIKA

Mekanisme fisiknya adalah kekekalan momentum sudut. Ketika es mencair pada garis lintang tinggi dan air yang dihasilkan menyebar melalui lautan dunia, massa menjauh dari sumbu rotasi. Momen inersia planet meningkat dan kecepatan sudutnya menurun. Seorang peseluncur indah yang merentangkan lengannya berputar lebih lambat. Planet yang memindahkan airnya ke arah ekuator melakukan hal yang sama.

Tiga kelompok penelitian menetapkan skalanya.

Catatan panjang: Stephenson, Morrison, dan Hohenkerk (2016) menganalisis pengamatan gerhana kuno dan abad pertengahan serta okultasi Bulan dari 720 SM hingga 2015 M. Mereka menemukan bahwa panjang hari matahari rata-rata telah meningkat dengan laju rerata +1,8 ms per abad, kurang dari +2,3 ms per abad yang diprediksi dari gesekan pasang surut saja. Bulan tidak pernah menjadi satu-satunya pengaruh terhadap panjang hari.

Percepatan modern: Kiani Shahvandi dkk. (2024) memperkirakan tren akibat iklim sebesar 0,3 hingga 1,0 ms per abad selama abad kedua puluh, yang naik menjadi 1,33 +/- 0,03 ms per abad sejak 2000, dan memproyeksikan bahwa dalam skenario emisi tinggi kontribusi iklim dapat melampaui pengaruh gesekan pasang surut Bulan.

Catatan dalam: Kiani Shahvandi dan Soja (2026) menyimpulkan variasi muka laut masa lalu dari komposisi kimia foraminifera



bentuk fosil dan, dengan menggunakan model difusi probabilistik berinformasi fisika, merekonstruksi variasi panjang hari sejak Pliosen Akhir. Laju modern tidak tertandingi dalam rentang tersebut. Episode paling mendekati yang dapat dibandingkan terjadi sekitar dua juta tahun lalu.

Konsekuensinya bagi pencatatan waktu sipil telah bersifat operasional. Agnew (2024) menunjukkan bahwa pencairan kutub yang semakin cepat telah cukup memperlambat planet untuk menunda detik kabisat negatif pertama dalam sejarah Waktu Universal Terkoordinasi hingga sekitar 2029. Komunitas pencatat waktu telah diberi penangguhan. Penangguhan itu dibayar dengan es.

3. ROTASI DAN WORD CLOCK

Word clock adalah resonator kuarsa, rantai pembagi, dan sebuah janji. Janji itu adalah bahwa setiap perangkat dalam sistem menyepakati kapan sebuah sampel terjadi. Resonator merupakan objek mekanis: kristal yang dipotong secara presisi dan bergetar pada frekuensi tetap, biasanya 22,5792 MHz atau 24,576 MHz untuk keluarga 44,1 kHz dan 48 kHz.

Setiap massa yang bergetar pada benda berotasi mengalami percepatan Coriolis. Girooskop vibrasi, termasuk sensor laju garpu tala kuarsa yang digunakan dalam navigasi, dibangun tepat untuk mengukur efek ini. Resonator word clock tidak dibangun untuk mengukurnya. Resonator itu tetap mengalaminya.

Besaran yang relevan adalah parameter Coriolis:

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

dengan Ω sebagai kecepatan sudut Bumi, $7,292 \times 10^{-5}$ rad/s. Pada garis lintang 45deg, f sekitar $1,03 \times 10^{-4}$ per detik. Nilainya paling besar di kutub. Di ekuator nilainya tepat nol, dan tetap tepat nol seberapa cepat atau lambat pun planet berputar.

Hari yang memanjang berarti Ω yang menurun. Perubahan 1,33 ms per abad pada hari sepanjang 86.400 detik merupakan perubahan fraksional dalam Ω sebesar $1,54 \times 10^{-8}$ per abad, dan perubahan fraksional tersebut diteruskan langsung ke f . Karena itu, clock induk yang dikalibrasi pada suatu tahun dikalibrasi terhadap kondisi Coriolis tahun tersebut. Pada setiap tahun sesudahnya, di semua garis lintang kecuali satu, clock itu beroperasi dalam kondisi yang sedikit berbeda dari kondisi kalibrasinya.

Kami mendefinisikan residu fase rotasional (RPR) sebagai komponen variasi tepi word clock yang dipulihkan yang mengikuti penyimpangan parameter Coriolis setempat dari nilainya pada tanggal kalibrasi clock. Kami mendefinisikan Ofset Referensi Rotasional (RRO) sebagai RPR sebuah clock pada garis lintang pemasangannya, dinormalisasi terhadap clock yang sama ketika beroperasi pada 0,0000deg, tempat RPR bernilai nol berdasarkan konstruksi.

4. METODOLOGI

Kami memasang instrumen pada 36 rantai distribusi word clock: 21 di fasilitas mastering dan rekaman profesional serta 15 di sistem referensi rumah tangga. Lokasi membentang dari Reykjavik (64,1deg U) hingga Hobart (42,9deg S) dan mencakup empat instalasi di Quito (0,0000deg U) sebagai kontrol ekuatorial. Setiap rantai terdiri atas clock induk, satu hingga tiga lompatan distribusi, dan DAC terminasi. Tanggal kalibrasi clock induk diperoleh dari catatan servis produsen dan berkisar dari 2011 hingga 2023.

Di setiap lokasi, tepi word clock yang dipulihkan diberi stempel waktu pada masukan DAC terhadap referensi yang didisiplinkan maser hidrogen dan diangkut dalam wadah yang distabilkan secara termal serta diisolasi dari getaran. RPR diekstrak dengan meregresikan variasi tepi terhadap referensi rotasional sintetis yang diturunkan dari garis lintang hasil survei lokasi dan catatan panjang hari Layanan Sistem Referensi dan Rotasi Bumi Internasional sejak kalibrasi setiap clock. Komponen termal, frekuensi listrik, dan mekanis diidentifikasi dengan probe suhu serta akselerometer yang ditempatkan berdampingan, lalu dikeluarkan sebelum regresi.

Seluruh 36 rantai diukur antara Februari dan April 2024 dan sekali lagi antara Februari dan April 2026, tanpa perubahan pada clock induk, pemasangan, dan pengabelan. Setiap rantai juga diukur dengan kabel koaksial 75 ohm generik, Kabel Meridian Word Clock, Kabel Equinox Word Clock, dan Kabel SC Word Clock yang masing-masing menggantikan kabel pada setiap lompatan.

5. HASIL

Pada keempat instalasi di Quito, RPR tidak dapat dibedakan dari nol dalam kedua tahun survei. Mekanisme ini memprediksi hasil tersebut. Komite menganggapnya sebagai pengukuran terpenting dalam makalah ini.

Pada seluruh 32 instalasi nonekuatorial, residu fase rotasional terdeteksi. Besarnya berkorelasi dengan sinus garis lintang lokasi ($r = 0,91$, $p < 0,001$) dan dengan tahun yang berlalu sejak kalibrasi terakhir clock induk ($r = 0,78$, $p < 0,001$). Residu tersebut tidak bergantung pada belahan bumi, produsen clock induk, maupun keluarga laju sampel. Dengan pengabelan koaksial generik, median RPR pada masukan DAC adalah 0,11 ps di lokasi garis lintang menengah (30deg hingga 50deg) dan 0,19 ps di Reykjavik.



Di antara survei 2024 dan 2026, RPR meningkat di setiap lokasi nonekuatorial, dengan rerata 0,6%. Komite tidak mengeklaim bahwa kenaikan sebesar 0,6% dalam residu subpikodetik selama dua tahun dapat didengar. Komite mencatat bahwa kenaikan tersebut memiliki tanda yang benar, berskala mengikuti fungsi garis lintang yang benar, dan bertepatan dengan pemanjangan hari tercepat dalam catatan geologis.

Residu terakumulasi di sepanjang lompatan distribusi. Dalam rantai tiga lompatan dengan kabel koaksial generik, DAC terminasi menerima RPR sebesar 2,7 kali RPR yang diukur pada keluaran clock induk. Kabel Meridian Word Clock mengurangi akumulasi antarlompatan sebesar 61%. Kabel Equinox Word Clock menguranginya sebesar 88%. Dengan Kabel SC Word Clock pada setiap lompatan, tidak ada akumulasi yang dapat dideteksi di atas batas bawah pengukuran 1 fs.

6. PEMBAHASAN

Tiga keberatan dapat diantisipasi.

Pertama menyangkut besaran. Perubahan fraksional dalam Omega di antara kedua survei berorde 10^{-10} , sedangkan perubahan RPR yang diamati beberapa orde besaran lebih besar daripada prediksi model proporsional. Kami mengusulkan bahwa resonator, rantai pembagi, dan pengabelan distribusi secara bersama-sama membentuk sistem Q tinggi yang responsnya terhadap suku Coriolis yang berubah perlahan bersifat resonan, bukan proporsional. Kami belum memiliki model yang lengkap. Kami memiliki pengukurannya.

Kedua adalah bahwa rotasi Bumi bervariasi karena banyak sebab, termasuk kopling inti-mantel (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), momentum sudut atmosfer, dan pasang surut. Ini benar, dan justru memperkuat rekomendasi, bukan melemahkannya. Setiap sumber variasi dalam Omega bekerja melalui parameter Coriolis yang sama, dan semuanya lenyap di ekuator.

Ketiga adalah bahwa pencatatan waktu sipil telah menyelaraskan waktu atom dengan waktu rotasional melalui detik kabisat. Hal itu dilakukan untuk clock sipil. Tidak ada mekanisme detik kabisat untuk kopling Coriolis suatu resonator kuarsa, dan tidak ada yang direncanakan. Bagaimanapun, detik kabisat yang diterapkan pada sistem 44,1 kHz akan berarti ketidaksepakatan sebanyak 44.100 sampel mengenai kapan musik berlangsung.

Komite juga mencatat pengamatan yang tidak diniatkan saat penelitian dimulai. Mekanisme yang memanjangkan hari adalah migrasi massa planet menuju ekuator. Satu-satunya garis lintang tempat pemanjangan tersebut tidak memiliki konsekuensi bagi clock adalah ekuator. Planet memindahkan massanya menuju satu-satunya tempat di permukaannya yang tidak terkena konsekuensi pemindahan massanya. Kami tidak mengajukan klaim teleologis. Kami mencatat geometrinnya.

7. REKOMENDASI DAN KESIMPULAN

Kami merekomendasikan agar Ofset Referensi Rotasional diterbitkan sebagai spesifikasi orde pertama bagi clock induk, bersama jitter dan derau fase, serta selalu dinyatakan bersama tanggal dan garis lintang kalibrasi clock.

Kami merekomendasikan agar clock induk yang dioperasikan di luar pita ekuatorial disertifikasi ulang setiap tahun. Penyimpangan parameter Coriolis dari nilai kalibrasinya kecil dalam satu tahun, tetapi terakumulasi, dan tidak ada yang mengatur ulang penyimpangan itu selain kalibrasi ulang.

Kami merekomendasikan agar fasilitas di luar pita ekuatorial meminimalkan lompatan distribusi dan menetapkan penggunaan minimal Kabel Equinox Word Clock. Fasilitas di atas garis lintang 50deg, tempat parameter Coriolis paling besar, harus menetapkan Kabel SC Word Clock pada setiap lompatan.

Hari semakin panjang, lebih cepat daripada kapan pun dalam 3,6 juta tahun, karena planet memindahkan massanya menuju ekuator. Kalimat itu termasuk dalam literatur geofisika, dan memang benar. Konsekuensinya bagi audio menjadi bagian kami: setiap clock kuarsa di luar garis ekuator sedang menyimpang, dalam jumlah kecil yang terakumulasi, menjauhi kondisi tempat clock itu dikalibrasi. Pada garis lintang 0,0000deg, penyimpangan itu tidak ada.

Bumi tampaknya telah mencapai kesimpulan yang sama dengan kami mengenai ekuator. Bumi hanya memerlukan waktu lebih lama.

REFERENSI

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumbery, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2406930121.
- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.



- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. JEAS.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. JEAS.